

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE ALIMENTOS

MENCIÓN INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



**MODELAMIENTO DE LA CINÉTICA DE SECADO DE LAS
HOJAS DE SACHACULANTRO (*Eryngium foetidum* L.) POR
CONVECCIÓN FORZADA**

Tesis

**Para optar al Grado Académico de
MAESTRO EN INGENIERÍA DE LOS ALIMENTOS
Mención Ingeniería Agroindustrial**

Presentado por:

HANS JOAN TAFUR PEREDA

TINGO MARÍA – PERU

2018

DEDICATORIA:

A mi familia por su constante paciencia y comprensión

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. MSc. Williams Vicente Roldan Carbajal por su apoyo en la conducción del presente trabajo de investigación.

Al Doctor Pedro Pablo Peláez Sánchez, Presidente del Jurado Calificador por sus aportes y sugerencias para mejorar la presente Tesis.

Al Ing° Jaime Eduardo Basilio Atencio, Miembro de Jurado Calificador, por haber contribuido a través de sus observaciones a mejorar la presente Tesis.

Al Ing° Jorge Enrique Castro Gracey, Miembro de Jurado Calificador, por haber contribuido a través de sus observaciones a mejorar la presente Tesis.

A mis profesores del Posgrado por haber contribuido con mi formación y haberme proporcionado los conocimientos necesarios para poder ejecutar mi Tesis.

A mis amigos y compañeros de la Facultad por su contribución y apoyo desinteresado en mi desarrollo profesional.

NOMENCLATURA

a, b, c, h, g, k, n	Constantes de los modelos matemáticos
MR	Moisture rate o tasa de pérdida de humedad
t	Tiempo
M	Humedad
M_t	Humedad libre en el tiempo t
M_0	Humedad inicial
M_e	Humedad de equilibrio
x, y, z	Coordenadas espaciales
D_{eff}	Difusividad efectiva de la humedad
L	Medio espesor de la lámina
E_a	Energía de activación
D_0	Factor de Arrhenius
R	Constante universal de los gases (8,3143 J/mol.°K)
T	Temperatura (°K)
R^2	Coeficiente de determinación
χ^2	Chi cuadrado
ERMS	Error cuadrático medio
MBE	Media de error de polarización

ÍNDICE GENERAL

	Página
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
I. INTRODUCCIÓN.....	3
II. MATERIALES Y MÉTODOS.....	5
2.1 Lugar de ejecución.....	5
2.2 Materiales	5
2.2.1 Materia prima.....	5
2.2.2 Insumos	5
2.2.3 Equipos e instrumentos de laboratorio	5
2.3 Metodología experimental.....	6
2.3.1 Secado de las hojas de sachaculantro	6
2.3.2 Modelamiento matemático para la cinética de secado	7
2.3.3 Curvas de secado	8
2.3.4 Estimación de la difusividad efectiva de la humedad	8
2.3.5 Determinación de la energía de activación.....	10
2.4 Análisis estadístico	10
III. REVISIÓN DE LITERATURA	12
3.1 Antecedentes.....	12
3.2 Generalidades del sachaculantro	12
3.3 Secado	15
3.3.1 Secado en aire caliente.....	16
3.3.2 Modelamiento matemático del secado de alimentos	16
3.3.3 Modelos matemáticos estudiados	17
3.3.4 Mecanismo de secado	18

IV. RESULTADOS	20
4.1 Curvas de secado	20
4.2 Modelado de la cinética de secado	22
4.3 Cálculo de la difusividad efectiva de la humedad	36
4.4 Energía de activación	37
V. DISCUSIÓN	39
5.1 De las curvas de secado	39
5.2 Modelado de la cinética de secado	40
5.3 Difusividad efectiva de la humedad.....	45
5.4 De la energía de activación.....	46
VI. CONCLUSIONES.....	47
VII. RECOMENDACIONES.....	48
VIII.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49
ANEXOS.....	56

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Modelos matemáticos empíricos de capa fina	18
2. Tiempos de secado de todos los tratamientos.....	23
3. Parámetros estimados de los modelos y análisis estadísticos, velocidad aire de secado 1,5 m/s	24
4. Parámetros estimados de los modelos y análisis estadístico, velocidad de aire de secado 2,0 m/s	28
5. Parámetros estimados de los modelos y análisis estadístico, velocidad de aire de secado 2,5 m/s	32
6. Difusividades efectivas calculadas	36
7. Energía de activación de las hojas de sachaculantro	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Flujograma para el secado de sachaculantro	6
2. <i>Eryngium foetidum</i> L	13
3. Perfil cromatográfico típico del aceite esencial de <i>Eryngium foetidum</i> ...	14
4. Variación de MR en función del tiempo, temperaturas 30, 40, 50, 60 y 70 °C y velocidades 1,5, 2,0 y 2,5 m/s.....	20
5. Curvas de secado, velocidad de aire de 1,5 m/s	21
6. Curvas de secado, velocidad de aire de 2,0 m/s	21
7. Curvas de secado, velocidad de aire de 2,5 m/s	22
8. Cálculo de difusividad efectiva de la humedad	36
9. Cálculo energía de activación, velocidades de aire de secado de (a) 1,50 m/s, (b) 2,0 m/s y (c) 2,5 m/s.....	37
10. Comparación de datos experimentales versus datos estimados por el modelo de Midilli a 70 °C y 1,5 m/s.....	41
11. Comparación de datos experimentales versus datos estimados por el modelo exponencial de dos términos a 50 °C y 1,5 m/s	42
12. Comparación de datos experimentales versus datos estimados por el modelo exponencial de dos términos a 40 °C y 2,0 m/s	43
13. Comparación de datos experimentales versus datos estimados por el modelo exponencial de dos términos a 60 °C y 2,5 m/s	44
14. Difusividad efectiva a diferentes temperaturas y velocidades	45

RESUMEN

Calcular la difusividad efectiva, la energía de activación y realizar el modelamiento de la cinética del secado de las hojas de sachaculantro (*Eryngium foetidum* L.) fueron objetivos de esta investigación; para tal fin, se utilizó un secador de bandejas de aire forzado, donde se procesaron 15 experimentos por triplicado, a temperaturas de 30, 40, 50, 60 y 70 °C y velocidades de aire de 1,5, 2,0 y 2,5 m/s. En cada experimento la muestra fue acondicionada en una bandeja rectangular de 25 x 27 cm hasta un espesor de 5 mm, los datos fueron registrados en forma automática, posteriormente mediante hoja de cálculo y el SPSS v20 se realizaron los cálculos y el análisis estadístico. Se obtuvo la tasa de pérdida de humedad y los datos se ajustaron a 12 modelos matemáticos empíricos con regresión no lineal. Se ha destacado al modelo de Midilli por su coeficiente de determinación R^2 , superior a 0,99 en todos los experimentos, sin embargo, otros modelos como, page, Henderson modificado, exponencial de dos términos, page modificado, dos términos y logarítmico describieron aceptablemente solo algunos experimentos. La difusividad efectiva de la humedad está en el rango de 10^{-11} a 10^{-9} para alimentos secados por este método y finalmente la energía de activación se calculó mediante la ecuación de Arrhenius determinándose 53,365, 58,709 y 55,316 kJ/mol a velocidades de aire de 1,5, 2,0 y 2,5 m/s respectivamente.

Palabras clave: Sachaculantro (*Eryngium foetidum*), cinética de secado, modelos matemáticos

ABSTRACT

Calculating the effective diffusivity, the activation energy and creating a model of the kinetics of the drying of culantro leaves (*Eryngium foetidum* L.) were the objectives of this research; to do so, a forced air dryer with trays was used, where fifteen experiments were processed three times at temperatures of 30, 40, 50, 60 and 70 °C and air speeds of 1.5, 2.0 and 2.5 m/s. For each experiment, the sample was condition on the rectangular tray of 25 x 27 cm up to a thickness of 5 mm, the data was registered in an automatic form; later, using a calculation sheet and the SPSS v20 the calculations and the statistical analysis were done. The rate of loss of humidity was obtained and the data was adjusted to twelve empirical mathematical models with a non-linear regression. The Midilli model stood out due to its R^2 determination coefficient being superior to 0.99 in all of the experiments, however, other models, such as the page, the modified Henderson, the two-term exponential, the modified page, the two terms and the logarithmic acceptably described only some experiments. The effective diffusivity of the humidity is in the range of 10^{-11} to 10^{-9} for food dried using this method and finally, the activation energy was calculated using the Arrhenius equation and determined to be 53.365, 58.709 and 55.316 kJ/mol at air speeds of 1.5, 2.0 and 2.5 m/s, respectively.

Keywords: Culantro (*Eryngium foetidum*), drying kinetics, mathematic models

I. INTRODUCCIÓN

El secado de productos alimenticios generalmente se usa para preservar la inocuidad de los alimentos porque reduce en gran medida los cambios microbianos y enzimáticos durante el período de almacenamiento, extendiendo la vida útil del producto (YOUNIS *et al.*, 2018). El sachaculantro (*Eryngium foetidum L.*) es cada vez más importante como planta de especias cultivada en la India, Vietnam, Australia y otros lugares con procedimientos bien documentados para obtener el máximo rendimiento. También posee una amplia gama de usos etnomedicinales que incluyen tratamiento para quemaduras, dolor de oídos, fiebre, hipertensión, estreñimiento, ataques, asma, dolor de estómago, gusanos, complicaciones de infertilidad, mordeduras de serpientes, diarrea y malaria (PAUL *et al.*, 2011). Es decir, una planta de potencial uso.

El modelado del proceso de secado es uno de los aspectos más importantes de la tecnología de secado. Se ha encontrado que el modelo de secado de capa fina es el más adecuado para caracterizar los parámetros de secado.

Se investigó la modelización del comportamiento de secado en capa fina de las hojas de sachaculantro (*Eryngium foetidum L.*), utilizándose un secador de bandejas de aire forzado con la finalidad de obtener la cinética de secado. Los datos fueron procesados y posteriormente se realizó la regresión no lineal para determinar los parámetros de doce modelos matemáticos empíricos conocidos. El modelo de Midilli resultó ser un modelo que mejor describe el comportamiento de la cinética de secado del sachaculantro, también se determinó la difusividad efectiva de la humedad y la energía de activación.

La investigación tuvo como objetivo modelar la cinética de secado de las hojas de sachaculantro por convección forzada, por lo que, no considera o no pretende demostrar cual o que tratamiento conserva mejor las características

organolépticas, composición química, contenido de vitaminas, cambios de color, y otros. Razón por la cual se consideró como objetivos específicos.

- Determinar las curvas de secado en función de la temperatura y velocidad del aire de secado.
- Modelar la cinética de secado
- Determinar la difusividad efectiva a las diferentes temperaturas y velocidades de aire.
- Calcular la energía de activación a las velocidades de aire de 1,5, 2,0 y 2,5 m/s

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Lugar de ejecución

El proyecto de investigación se desarrolló en el Laboratorio de Ingeniería de Alimentos de la Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias, de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, situada en la ciudad de Tingo María, distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, región Huánuco.

2.2 Materiales

2.2.1 Materia prima

Eryngium foetidum L., más conocido en nuestra localidad como sachaculantro, nombre común citado por MEJÍA y RENGIFO (2000).

La materia prima fue recolectada de la parcela ubicada en las coordenadas 9° 12' 50,483" de latitud y 75° 49' 49,829" de longitud, situada en el distrito de Hermilio Valdizán, provincia de Leoncio prado, región Huánuco.

2.2.2 Insumos

Insumos utilizados:

- Agua destilada
- Etanol al 95%

2.2.3 Equipos e instrumentos de laboratorio

- Secador de bandejas de aire forzado automatizado
- Balanza analítica electrónica OHAUS, modelo AP210s.
- Estufa tipo LP 201/AL con temperatura hasta 200
- Analizador de humedad ADAM EQUIPMENT, modelo PMB - 53
- Selladora manual de bolsas IMPULSE SEALER, modelo PFS - 300

2.3 Metodología experimental

2.3.1 Secado de las hojas de sachaculantro

Se realizó mediante el siguiente flujograma de la Figura 1.

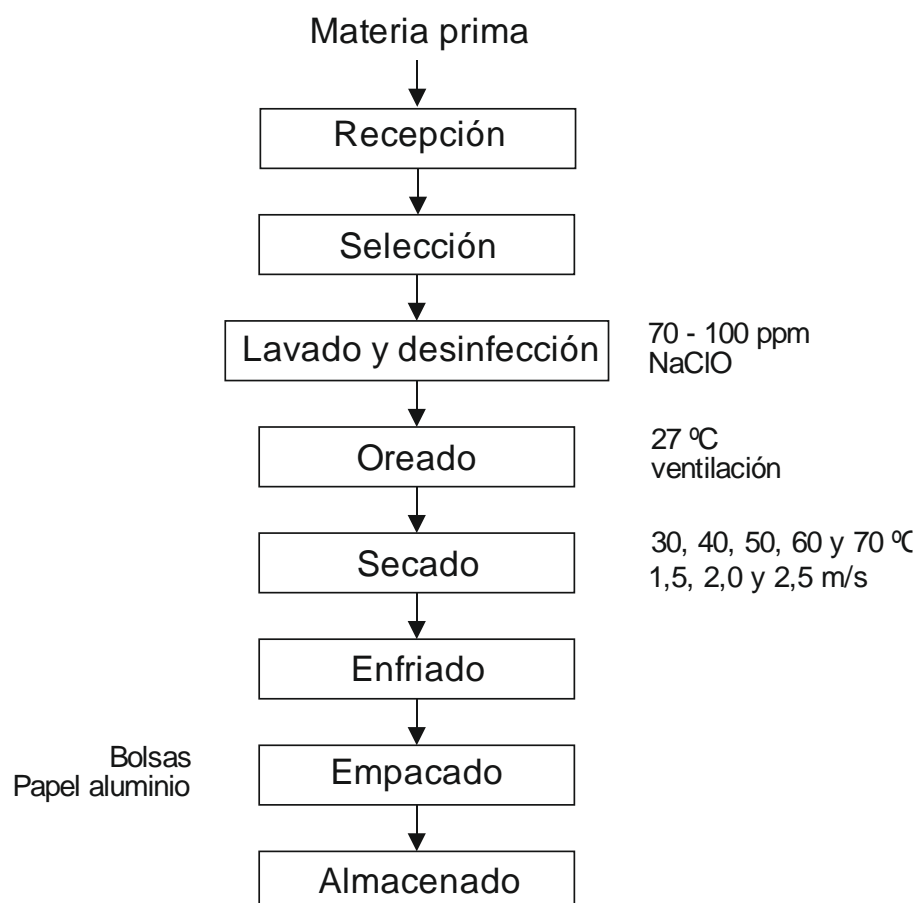


Figura 1. Flujograma para el secado de sachaculantro

Selección

Se seleccionó las hojas de mejor apariencia, tamaño uniforme sin daños físicos, se cortan los tallos y raíces separándolos.

Lavado y desinfección

El objetivo fue eliminar los residuos de tierra y suciedad adheridos a las hojas, durante la cosecha y transporte. Las hojas limpias se sumergieron en una solución de 70 a 100 ppm de hipoclorito de sodio por 10 minutos para su

desinfección. se enjuagó con agua pura para eliminar el exceso de cloro recomendado por (CERDAS y MONTERO, 2016).

Oreado

A temperatura ambiente que en promedio fue de 27 °C, con ventilación para acelerar la operación.

Secado

Las hojas preparadas se colocaron en una bandeja rectangular de 27 x 25 cm, hasta un espesor de 5 mm, introduciéndose en el secador, configurando diferentes condiciones de temperatura y velocidad de aire, según el diseño experimental.

Enfriado

Operación necesaria para el almacenamiento

Empacado

Las hojas secadas de cada experimento fueron empacadas en bolsas de aluminio.

2.3.2 Modelamiento matemático para la cinética de secado

Los datos experimentales del secado de la muestra, fueron procesados para el modelamiento mediante 12 modelos empíricos de capa fina (Cuadro 1). En estos modelos la variable dependiente fue la tasa de pérdida de humedad MR siglas en ingles (moisture rate) Ecuación 1.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

MR relaciona la cantidad de humedad libre en el tiempo t (M_t), con el contenido de humedad inicial (M_0) como referencia. M_e es la humedad de equilibrio, esta última sucede cuando la presión de vapor de agua al interior del alimento habrá igualado la presión de vapor en el ambiente.

Como la humedad de equilibrio M_e es un valor relativamente pequeño en comparación con M_t y M_0 para periodos largos de secado, la ecuación (1) puede escribirse así (DARVISHI *et al.*, 2014).

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

2.3.3 Curvas de secado

Las curvas de secado y modelamiento matemático de los datos experimentales, se ejecutó considerando el modelo difusional de la segunda ley de Fick para una geometría de lámina infinita, tiempos largos y los modelos empíricos que se muestran en el Cuadro 1, los cuales utilizan como variable dependiente la tasa de pérdida de la humedad que relaciona el gradiente de la humedad de la muestra a tiempo real con la humedad inicial (Ecuación 2).

2.3.4 Estimación de la difusividad efectiva de la humedad

Para explicar los procesos de transporte durante el secado, se ha propuesto varios mecanismos para el movimiento de la humedad dentro de los alimentos que incluyen difusión molecular, difusión impulsada por estrés, movimiento capilar y difusión de líquido a través de poros sólidos, difusión de vapor, etc.(DAS y ARORA, 2017), No se puede decir que ninguno de estos mecanismos prevalezca a lo largo del curso del secado. Varios investigadores han recomendado que es ventajoso describir la tasa de transporte interno de humedad mediante una difusividad efectiva promedio, dado que no se puede afirmar un mecanismo que prevalezca a lo largo del secado (ARSLAN y ÖZCAN, 2011; DAS y ARORA, 2017).

Los mecanismos de transporte de humedad durante el secado se pueden modelar matemáticamente a partir de la segunda ley de Fick (MGHAZLI *et al.*, 2017). Si la difusión ocurre en tres dimensiones está gobernada por la ecuación:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

Donde, M es el contenido de humedad, t es el tiempo x , y y z son coordenadas espaciales y D_{eff} es el coeficiente de difusión efectiva.

En la ecuación (3), si $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \right)$ y $M = MR$, la ecuación puede escribirse de la siguiente manera:

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 MR \quad (4)$$

Las soluciones de la ecuación diferencial anterior son diferentes dependiendo de la geometría de las muestras, para geometrías simples como láminas, cilindros, esferas y paralelepípedos (finitos e infinitos) fueron desarrollados por Crank en 1975 (DEROSS *et al.*, 2011).

La solución dada por Crank(1975), asume lo siguiente: Placa plana infinita, difusividad efectiva constante, no considera el encogimiento de la muestra y ausencia de cualquier resistencia al transporte de masa es la siguiente ecuación (GIRALDO-ZUNIGA *et al.*, 2010).

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp \left[-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right] \quad (5)$$

En la ecuación anterior, L es el medio espesor de la lámina finita y n es el número de series de la sumatoria, utilizando el primer término (n=1) de la serie cuando los tiempos de secado son considerables, esta ecuación podría reducirse a (MGHAZLI *et al.*, 2017):

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp \left[-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right] \quad (6)$$

Finalmente al aplicar logaritmo natural a ambas partes de la ecuación 6, se obtiene la expresión matemática para calcular experimentalmente la difusividad efectiva de la humedad.

$$\ln(MR) = -0.21 + \left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \right) t \quad (7)$$

Al realizar un gráfico con los datos experimentales, donde el eje de las ordenadas tomaría los valores de $\ln(MR)$ y el eje de las abscisas el tiempo en segundos, entonces la pendiente de la ecuación lineal sería:

$$pendiente = -\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}$$

Despejando D_{eff} se obtiene:

$$D_{eff} = - \frac{4L^2 \text{pendiente}}{\pi^2} \quad (8)$$

2.3.5 Determinación de la energía de activación

La energía de activación en un proceso de secado, E_a es la cantidad mínima de energía que debe superarse para que este proceso sea realizable. El valor E_a está estrechamente relacionado con el coeficiente D_{eff} y su dependencia de la temperatura puede expresarse mediante el modelo de Arrhenius (KOUKOUCH *et al.*, 2017).

El origen de la difusión es la agitación térmica. La difusión se activa térmicamente y el coeficiente de difusión se calcula tradicionalmente mediante el uso de la ley de Arrhenius (KOUKOUCH *et al.*, 2017).

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (9)$$

Dónde:

D_{eff} : Difusividad efectiva (m^2 / s)

D_0 : Factor de Arrhenius (m^2 / s)

E_a : Energía de activación (kJ / mol)

R : Constante universal de los gases ($8,3143 \text{ J} / \text{mol} \cdot \text{°K}$)

T : Temperatura ($^{\circ}\text{K}$)

2.4 Análisis estadístico

La selección del mejor modelo matemático para predecir la cinética de secado de las hojas de sachaculantro se decide en función de diversos parámetros estadísticos, como el coeficiente de determinación, la reducción de error cuadrático medio, la raíz del error cuadrático medio, error de desviación media y la media del error absoluto (AVHAD y MARCHETTI, 2016).

El coeficiente de determinación (R^2) es considerado como uno de los criterios principales para la selección del mejor modelo. Además, la evaluación de la bondad del ajuste del modelo fue también determinada por diversos parámetros estadísticos ampliamente utilizados, tales como chi cuadrado (χ^2), el error cuadrático medio (ERMS), con una media de error de polarización (MBE), y el error absoluto medio (MAE) (AVHAD y MARCHETTI, 2016).

La expresión de los parámetros mencionados anteriormente se escribe como:

$$x^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{EXP} - MR_{PRE})^2}{N - z} \quad (10)$$

$$ERMS = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{EXP} - MR_{PRE})^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{EXP} - MR_{PRE}) \quad (12)$$

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Antecedentes

SANKAT y MAHARAJ (1994), secaron hojas de sachaculantro (*Eryngium foetidum* L.) mediante un secador de convección natural; las temperaturas de secado fueron 35, 45, 55 y 65 °C. Los resultados demostraron la influencia de la temperatura del aire en la velocidad de secado; sin embargo, las temperaturas más altas tenían un efecto perjudicial en el olor y el sabor del aceite extraído de la hierba.

Se han investigado dos tipos de secadores solares de convección natural, secador solar de armario directo y secador solar de armario indirecto, como técnica de preservación para el secado de la hierba aromática sachaculantro en la Amazonía peruana. El secador solar directo, logró una temperatura de 65 °C y una humedad relativa menor del 11% en el aire de secado, mientras que el secador solar indirecto alcanzó 51 °C de temperatura y 27% de humedad relativa. El secador solar directo mostró una mayor velocidad de secado y una mayor eficiencia de secado 10,3%, en comparación con el 5,8% como determinado para el secador solar indirecto (BANOUT *et al.*, 2010).

3.2 Generalidades del sachaculantro

El sachaculantro (*E. foetidum* L.), es una planta bienal, acaulescente, ramificada, glabra. Hojas basales, lanceoladas u oblanceoladas, 3 - 27 cm de largo, 1 - 5 cm de ancho, cuneada en la base, obtuso en el ápice, márgenes espinuloso - aserrado, las nervaduras pinnadamente reticulares, pecíolos cortos. Inflorescencia divaricadamente trifurcada, numerosas cabezuelas, pequeñas, corto pedunculadas, flores numerosas, fruto globoso (Figura 2) y es cultivada como condimento en las regiones de Huánuco, Ica, Junín, Loreto, San Martín (MEJÍA y RENGIFO, 2000). En otros países como Colombia es conocido como

Cilantro sabanero (VERA y SÁNCHEZ 2015), o culantro coyote en Costa Rica (CERDAS y MONTERO, 2016).

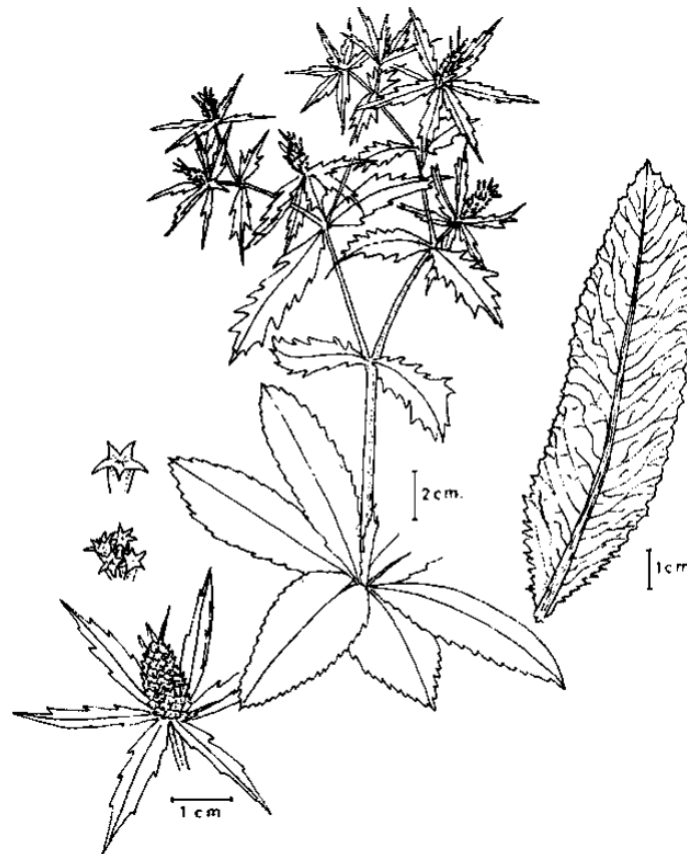


Figura 2. *Eryngium foetidum* L

Eryngium foetidum L. Es usada ampliamente como planta medicinal en la mayoría de las regiones tropicales, posee una amplia gama de usos etnomedicinales que incluyen tratamiento para quemaduras, dolor de oídos, fiebre, hipertensión, estreñimiento, ataques, asma, dolor de estómago, parásitos, complicaciones de infertilidad, mordeduras de serpientes, diarrea y malaria. Los estudios farmacológicos de las partes aéreas de la planta han demostrado actividad antihelmíntica debido a la acción antiinflamatoria un componente del aceite esencial llamado eryngial (E – 2 - dodecenal) debido a las fracciones de fitosteroles, actividad anticonvulsiva en los respectivos modelos y actividad antibacteriana selectiva contra especies de Salmonella y Erwinia (PAUL *et al.*, 2011).

Un estudio identificó 18 componentes (Figura 3) en el aceite esencial y una capacidad antioxidante de 80,39% medido en porcentaje de inhibición frente al radical DPPH (JARAMILLO *et al.*, 2011).

Nº pico	Compuesto
1	p-cimeno
2	Undecano
3	Nonanal
4	p-cimen-8-ol
5	Decanal
6	Decenal
7	Undecanal
8	1,2-óxido de dodeceno
9	2,4,6-trimetil benzaldehído (duraldehído)
10	3,4,5-trimetil fenol
11	Undecanol
12	Dodecanal (lauraldehído)
13	2-Dodecen-1-al
14	5-dodeceno
15	Tridecenal
16	Tetradecanal
17	NI
18	Tetradecenal

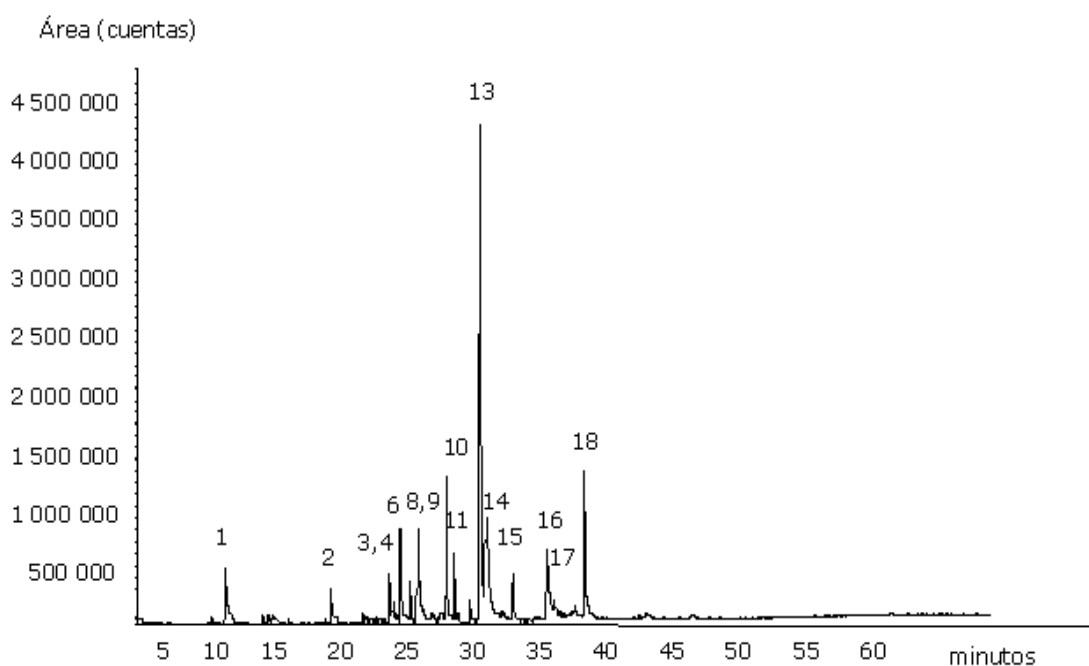


Figura 3. Perfil cromatográfico típico del aceite esencial de *Eryngium foetidum*

3.3 Secado

El secado es una de las operaciones unitarias importantes en la fabricación de alimentos, implica la eliminación de agua de una materia prima húmeda mediante la inducción de cambios de fase de agua (sólido o líquido) a una fase de vapor mediante la aplicación de calor excepto deshidratación osmótica (SABAREZ, 2016). Dirigida principalmente a lograr dos objetivos: Primero, ralentizar e inhibir la actividad microbiana y enzimática, segundo, facilita el almacenamiento y el transporte de los alimentos al reducir peso y volumen (DARVISHI *et al.*, 2014; MIRAEI *et al.*, 2017; SABAREZ, 2016); el proceso de secado representa el mayor consumo de energía en la industria alimentaria debido al calor latente demandado para la vaporización del agua y las propiedades termo físicas de los materiales de secado (MIRAEI *et al.*, 2017; SABAREZ, 2016), habitualmente acarrea a alteraciones pronunciadas en los atributos de calidad del producto debido a largos periodos y altas temperaturas de secado (SABAREZ, 2016).

El proceso de secado de los materiales alimenticios es extremadamente complejo, involucrando mecanismos transitorios acoplados de calor, masa y procesos de transferencia de momento acompañados de transformaciones físicas, químicas y de cambio de fase (SABAREZ, 2016). El secado fue el método principal para la conservación de alimentos a largo plazo hasta la introducción relativamente reciente de enlatado o congelado (SABAREZ, 2016). Carne, pescado, frutas, bayas, hierbas y otros alimentos vegetales se secaron para su almacenamiento y consumo durante temporadas menos abundantes en prácticamente todas las culturas humanas (BRADFORD *et al.*, 2018).

Hay más de 200 tipos de secado que se pueden utilizar para diferentes propósitos, cada uno con sus propias ventajas y desventajas para aplicaciones particulares. Además, las características de secado para la presión, la velocidad del aire, la humedad relativa, diferencias en los atributos físicos y especificaciones de calidad del producto, los modos de entrada de calor, y el tiempo de retención varían de acuerdo con el material y el método de secado (HASHIM *et al.*, 2016; SABAREZ, 2016). Una mala elección del tipo y/o

condiciones de secado pueden tener un efecto adverso en propiedades físicas y nutricionales del producto seco (JANGAM, 2011).

La selección de un secador para un producto alimenticio particular depende principalmente del tipo de alimento, la cantidad y el tipo de humedad, la cinética de secado, la sensibilidad al calor, la estructura física del material a secar, los requisitos de calidad de un alimento seco y muchos otros factores (JANGAM, 2011). Los secadores se clasifican comúnmente en función del modo de transferencia de calor (conducción, convección o radiación) y el modo de operación (por lote o continuo) (JANGAM, 2011).

3.3.1 Secado en aire caliente

El secado al aire caliente o también llamado secado convectivo, en particular, es un método ampliamente utilizado para productos agrícolas, especialmente durante la producción de alimentos industriales. El secado al aire caliente es naturalmente inofensivo, no tóxico, proporciona un aspecto más uniforme, higiénico y un producto seco que puede tener una vida útil prolongada de al menos un año; sin embargo, la calidad de los productos secados al aire caliente a menudo se reducen drásticamente (ONWUDE *et al.*, 2016; REN *et al.*, 2018), como por ejemplo degradación de nutrientes, sabor (YANG *et al.*, 2017), color y concentración volátil (DAS y ARORA, 2017). El punto principal sobre el secado por convección es de baja eficiencia energética y un proceso que consume mucha energía. Varios estudios han estimado que la eficiencia energética de los secadores convectivos suele ser inferior al 50% y representa al menos el 10% de la energía total requerida en la demanda de energía industrial (ELMIZADEH *et al.*, 2017).

3.3.2 Modelamiento matemático del secado de alimentos

En la literatura, el comportamiento de secado se describe a través de tres modelos matemáticos: Teórico, semi - teórico y empírico (MIRAEI *et al.*, 2017). Las simulaciones teóricas son realistas y pueden explicar los fenómenos que ocurren en el proceso. Por otro lado, estas simulaciones son difíciles de llevar a cabo y requieren un gran tiempo de computación, porque las ecuaciones de

difusión que rigen el proceso son muy complicadas (MIRAEI *et al.*, 2017). Un modelo empírico es una ecuación matemática que tiene parámetros para ajustarse en función de los resultados experimentales, y la definición de su forma matemática no requiere la consideración de la teoría que describe el complejo fenómeno de transferencia de calor y masa, la geometría y las características fisicoquímicas del producto para secarse (JIANG *et al.*, 2017). Como una compensación entre la teoría y la aplicación conveniente, los modelos semi-teóricos se extraen de la segunda ley simplificada de la difusión de Fick o se derivan modificando cualquier modelo simplificado ampliamente utilizado (MIRAEI *et al.*, 2017).

3.3.3 Modelos matemáticos estudiados

El modelado del proceso de secado es uno de los aspectos más importantes de la tecnología de secado (ALARA *et al.*, 2017). Se ha encontrado que el modelo de secado de capa fina es el más adecuado para caracterizar los parámetros de secado. Varias investigaciones sobre el modelado matemático y los estudios experimentales se han llevado a cabo en los procesos de secado de capa delgada de diversos productos agrícolas (DHANUSHKODI *et al.*, 2017). Las ecuaciones de capa fina explican el proceso de secado de una manera uniforme, independientemente del mecanismo de control. Se han establecido varios modelos de secado, incluyendo Page, Henderson y Pabis, logarítmico, Midilli y Kucuk, Newton, dos términos y otros, para predecir el comportamiento de secado de vegetales (ALARA *et al.*, 2017).

Los modelos matemáticos se han utilizado para determinar el comportamiento de secado de diferentes productos y para generalizar las curvas de secado (ALARA *et al.*, 2017). Los modelos (Cuadro 2) se han utilizado para predecir las características de secado de diferentes verduras y frutas, por ejemplo pimiento verde (DARVISHI *et al.*, 2014), aguacate (AVHAD y MARCHETTI, 2016), hojas de manzanilla (MOTEVALLI *et al.*, 2016), entre otros.

Cuadro 1. Modelos matemáticos empíricos de capa fina

Modelo	Ecuación del modelo	Referencia
Newton	$MR = \exp(-k.t)$	Lewis (1921)
Page	$MR = \exp(-k.t^n)$	Page (1949)
Page modificado	$MR = \exp[(-k.t)^n]$	Overhults <i>et al.</i> (1973)
Henderson y Pabis	$MR = a.\exp(-k.t)$	Westerman (1973)
Henderson y Pabis modificado	$MR = a.\exp(-k.t) + b.\exp(-g.t) + c.\exp(-h.t)$	Karathanos (1999)
Logarítmico	$MR = a.\exp(-k.t) + c$	Togrul y Pehlivan (2003)
Midilli	$MR = a.\exp(-k.t^n) + bt$	Midilli <i>et al.</i> (2002)
Dos términos	$MR = a.\exp(-k.t) + b.\exp(-g.t)$	Henderson (1974)
Exponencial de dos términos	$MR = a.\exp(-k.t) + (1-a)\exp(-k.a.t)$	Sharaf-Elden <i>et al.</i> (1980)
Verma	$MR = a.\exp(-k.t) + (1-a).\exp(-g.t)$	Verma <i>et al.</i> (1985)
Aproximado a la difusión	$MR = a.\exp(-k.t) + (1-a)\exp(-k.b.t)$	Demir <i>et al.</i> (2007)
Wang y Singh	$MR = 1 + a.t + b.t$	Wangh y Singh (1978)

Fuente: Adaptado de DHANUSHKODI *et al.* (2017)

3.3.4 Mecanismo de secado

Una capa delgada es una capa de material completamente expuesta a una corriente de aire durante el secado. El espesor de la capa debe ser uniforme y no debe exceder las 3 capas de partículas. Se supone que la distribución de temperatura de un material de capa delgada es uniforme. Esto se debe a las características de capa delgada, haciendo uso de modelos de parámetros adecuados para el secado de capa delgada. Es imperativo tener en cuenta que

este concepto se puede aplicar a: Un solo material expuesto libremente al aire de secado o una capa del material y una capa múltiple de diferentes espesores de corte, siempre que la temperatura de secado y la humedad relativa del aire de secado están en la misma condición termodinámica en cualquier momento del proceso de secado, que de este modo se puede aplicar a las estimaciones matemáticas de la cinética de secado (HASHIM *et al.*, 2016).

IV. RESULTADOS

4.1 Curvas de secado

Las hojas de sachaculantro se secaron como una sola capa a temperaturas de 30, 40, 50, 60 y 70 °C para velocidades de 1,5, 2,0 y 2,5 m/s. La Figura 4 muestra la tasa de pérdida de humedad (MR) como una función del tiempo de secado.

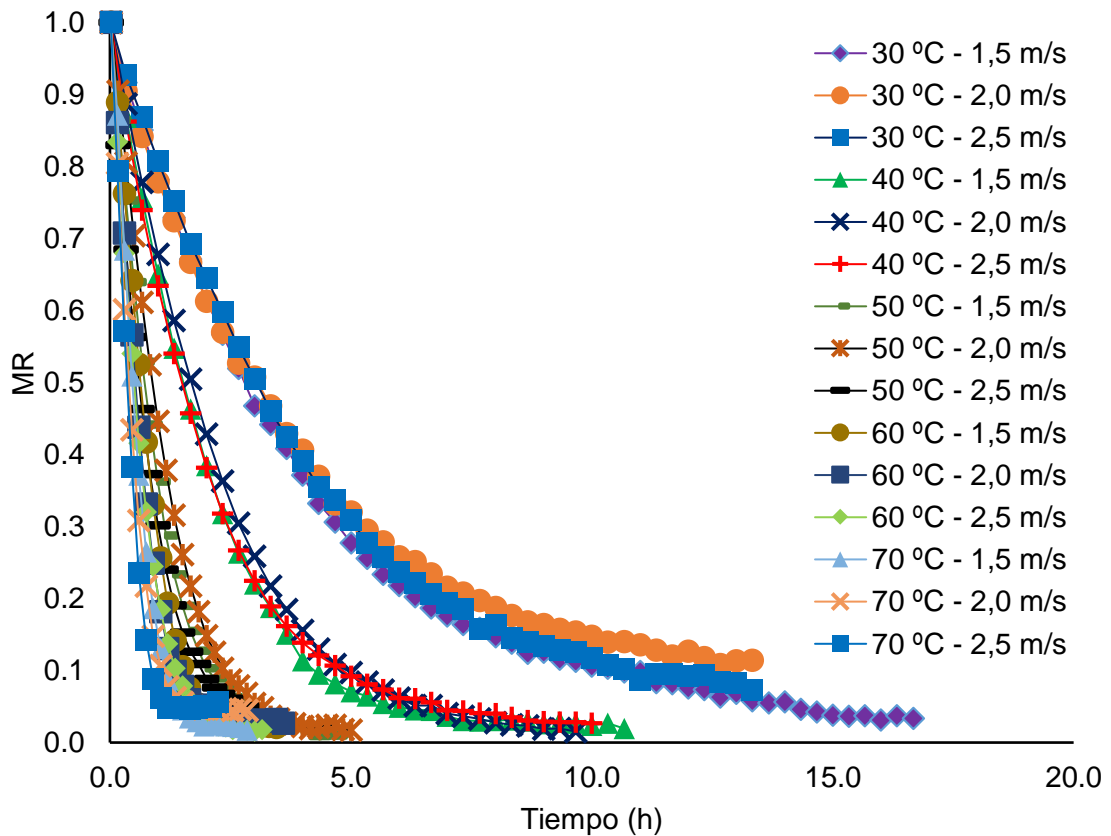


Figura 4. Variación de MR en función del tiempo, temperaturas 30, 40, 50, 60 y 70 °C y velocidades 1,5, 2,0 y 2,5 m/s

La Figura 4 pone en evidencia que MR disminuyó considerablemente al aumentar el tiempo de secado, sin embargo, existe otros aspectos de la investigación que visualmente no podemos diferenciar y discutir sus similitudes

o diferencias, siendo necesario presentar 3 gráficos diferentes agrupados por la velocidad de secado Figuras 5, 6 y 7.

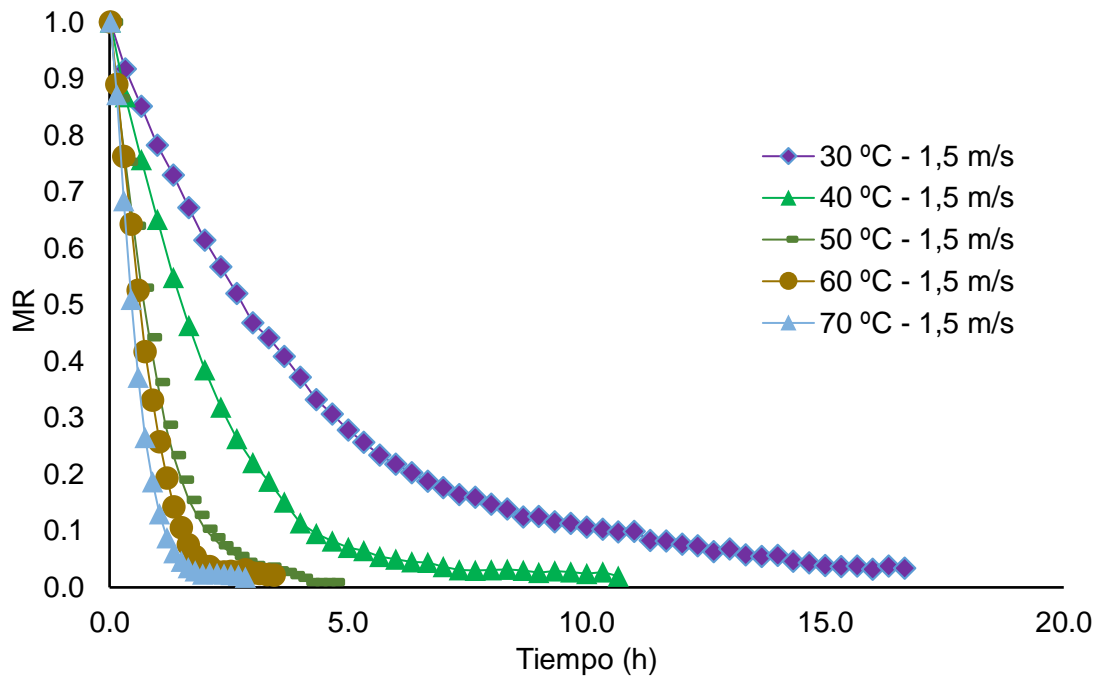


Figura 5. Curvas de secado, velocidad de aire de 1,5 m/s

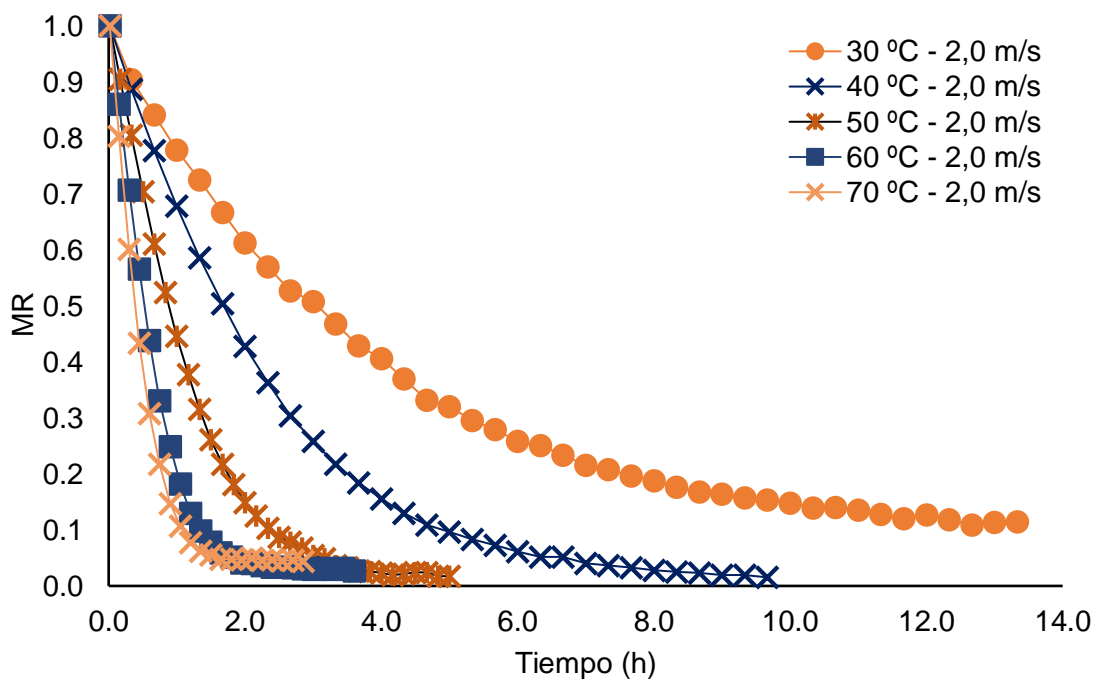


Figura 6. Curvas de secado, velocidad de aire de 2,0 m/s

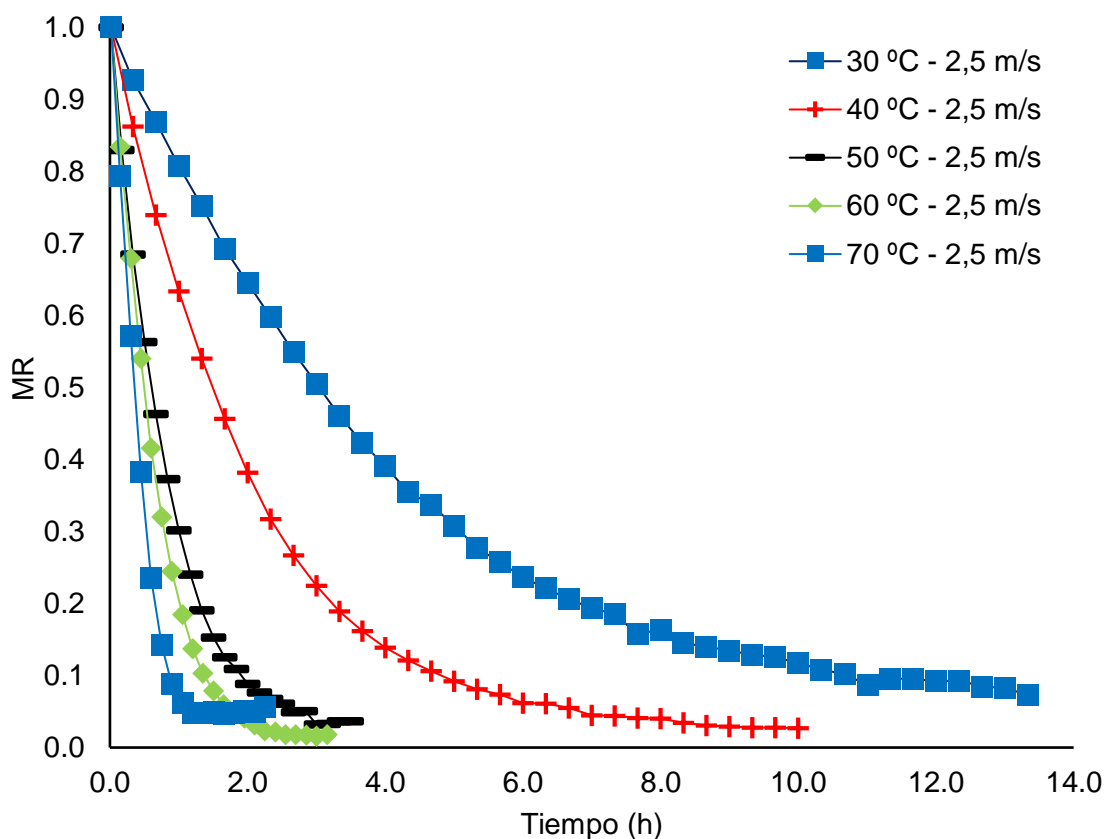


Figura 7. Curvas de secado, velocidad de aire de 2,5 m/s

Con la finalidad de conocer la influencia de la temperatura y la velocidad en el tiempo de secado, se tomó los tiempos promedios que tardó el proceso de secado de cada tratamiento en horas (Cuadro 2), se realizó un análisis de varianza y prueba de medias para Tukey con un nivel de confianza del 95%.

4.2 Modelado de la cinética de secado

Los datos experimentales para los valores de la tasa de humedad (MR) se presentan en las Figuras 4, 5, 9 y 7 en función del tiempo en horas a diferentes condiciones de velocidad y temperatura. Los valores de MR se utilizaron para evaluar los doce modelos presentados en el cuadro 1, estos fueron procesados mediante regresión no lineal en SPSS Statistics versión 20. Los resultados se detallan para las temperaturas de 30, 40, 50, 60 y 70 °C a tres velocidades 1,5, 2,0 y 2,5 m/s, en los Cuadros 3, 4 y 5.

Cuadro 2. Tiempos de secado de todos los tratamientos

Temperatura	Velocidad	Tiempo (h)
30	1,5	16,30 ^a
30	2,0	14,52 ^a
30	2,5	13,84 ^a
40	1,5	10,64 ^b
40	2,0	10,45 ^b
40	2,5	10,38 ^b
50	1,5	5,10 ^c
50	2,0	4,87 ^c
50	2,5	4,66 ^c
60	1,5	3,57 ^d
60	2,0	3,52 ^d
60	2,5	3,38 ^d
70	1,5	2,20 ^e
70	2,0	1,80 ^e
70	2,5	1,50 ^e

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$)

Un total de doce modelos matemáticos fueron utilizados para predecir la tasa de pérdida de humedad (MR), el resumen de los parámetros obtenidos del modelamiento y sus respectivos análisis estadísticos se muestran en los Cuadros 3, 4 y 5 clasificados así de acuerdo a la velocidad de aire de secado; también se ha elaborado gráficos con datos estimados por dichos modelos comparándolos con los datos experimentales o reales registrados por el ordenador del equipo de secado (Figuras 10 al 13).

Cuadro 3. Parámetros estimados de los modelos y análisis estadísticos, velocidad aire de secado 1,5 m/s

Modelos	T (°C)	Parámetros						Análisis estadístico				
		a	b	c	g	h	k	n	R ²	χ^2	ERMS	MBE
Newton	30						0,242		0,9974	0,000232	0,015233	0,004855
	40						0,485		0,9961	0,000286	0,016904	0,003591
	50						1,033		0,9972	0,000334	0,018257	-0,000235
	60						1,259		0,9893	0,001390	0,037208	0,000117
	70						1,688		0,991	0,001459	0,038082	0,001512
Page	30						0,262	0,952	0,9974	0,000177	0,013292	0,004011
	40						0,448	1,087	0,9981	0,000172	0,013099	0,006129
	50						1,012	1,130	0,999	0,000083	0,009078	0,003677
	60						1,281	1,305	0,9982	0,000204	0,014206	0,006608
	70						1,895	1,316	0,9985	0,000199	0,014036	0,008866
Page modificado	30						0,245	0,952	0,9974	0,000177	0,01329	0,004101
	40						0,477	1,087	0,9973	0,000172	0,013108	0,005842
	50						1,011	1,130	0,999	0,000083	0,009078	0,003753
	60						1,209	1,305	0,9982	0,000204	0,014206	0,006614
	70						1,626	1,316	0,9985	0,000199	0,014036	0,008942

...continúa

Modelos	T (°C)	Parámetros						Análisis estadístico				
		a	b	c	g	h	k	n	R ²	χ ²	ERMS	MBE
Henderson y Pabis	30	0,990					0,240		0,9971	0,000227	0,015053	0,005417
	40	1,044					0,505		0,9971	0,000198	0,014064	0,002917
	50	1,066					1,100		0,9979	0,000144	0,011975	-0,000265
	60	1,120					1,400		0,9909	0,000683	0,026021	-0,001797
	70	1,150					1,924		0,9942	0,000431	0,020649	-0,000570
Henderson y Pabis modificado	30	3,034	-0,915	-1,128	0,240	0,240	0,240		0,9971	0,000228	0,015051	0,005173
	40	0,524	0,525	0,000	0,512	-0,432	0,512		0,9972	0,000203	0,014211	0,004574
	50	0,714	0,777	-,432	0,990	0,786	0,987		0,9979	0,000134	0,011472	0,000947
	60	-1,979	1,541	1,542	1,086	1,086	0,956		0,9925	0,000585	0,023861	0,003050
	70	-1,994	0,937	2,193	1,560	1,557	1,397		0,9952	0,000386	0,019312	0,003131
Logarítmico	30	0,986	0,030				0,268		0,999	0,000062	0,007833	0,000031
	40	1,042	0,010				0,524		0,9973	0,000167	0,012877	0,000062
	50	1,066	-0,001				1,095		0,9979	0,000145	0,011959	-0,000176
	60	1,122	-0,006				1,375		0,9918	0,000676	0,025823	0,000152
	70	1,150	-0,001				1,916		0,9943	0,000433	0,020637	-0,000401

...continúa

Modelos	T (°C)	Parámetros							Análisis estadístico			
		a	b	c	g	h	k	n	R ²	χ ²	ERMS	MBE
Midilli	30	1,012	0,002				0,258	0,999	0,9988	0,000072	0,008494	-0,000993
	40	0,983	0,003				0,421	1,177	0,9996	0,000029	0,005328	-0,002000
	50	1,003	0,003				1,032	1,160	0,9995	0,000037	0,006025	0,000725
	60	0,978	0,007				1,302	1,410	0,9995	0,000035	0,005874	-0,000454
	70	1,029	0,008				2,009	1,311	0,9999	0,000009	0,002896	0,000408
Dos términos	30	0,959	0,060		0,043		0,277		0,999	0,000060	0,007702	-0,000238
	40	0,464	0,580		0,506		0,505		0,9971	0,000199	0,014061	0,003123
	50	19,558	-18,500		0,900		0,909		0,9981	0,000133	0,011440	0,000612
	60	0,622	0,498		1,400		1,400		0,9909	0,000689	0,026021	-0,001797
	70	32,232	-31,096		1,475		1,488		0,9952	0,000382	0,019320	0,003935
Exponencial de dos términos	30	0,521					0,339		0,9983	0,000114	0,010658	0,002297
	40	1,574					0,598		0,9982	0,000174	0,013167	0,006624
	50	1,660					1,336		0,9991	0,000081	0,008984	0,004095
	60	1,871					1,820		0,9979	0,000194	0,013880	0,004474
	70	1,915					2,508		0,999	0,000133	0,011446	0,006881

...continúa

Modelos	T (°C)	Parámetros						Análisis estadístico				
		a	b	c	g	h	k	n	R ²	χ^2	ERMS	MBE
Verma	30	0,973			0,001		0,261		0,9989	0,000073	0,0085546	0,000680
	40	0,466			0,485		0,485		0,9961	0,000287	0,016904	0,003591
	50	18,173			0,767		0,780		0,9974	0,000300	0,017216	0,008542
	60	27,727			0,847		0,858		0,9874	0,001116	0,033185	0,001362
	70	-30,492			1,162		1,149		0,9883	0,001195	0,034279	0,004638
Aproximado a la difusión	30	0,973	0,002				0,261		0,9989	0,000073	0,008555	0,000572
	40	1,125	3,977				0,535		0,9984	0,000145	0,011997	0,004827
	50	18,906	0,985				0,779		0,9969	0,000275	0,016488	0,003891
	60	35,057	0,989				0,857		0,9891	0,001072	0,032529	0,009243
	70	30,350	0,988				1,162		0,989	0,001177	0,034018	0,007496
Wang y Singh	30	-0,164	0,007						0,9557	0,004638	0,068035	-0,034459
	40	-0,288	0,020						0,9456	0,005912	0,076772	-0,028231
	50	-0,638	0,097						0,9591	0,004416	0,066219	-0,010097
	60	-0,794	0,150						0,9662	0,003146	0,055848	-0,007561
	70	-1,045	0,259						0,9543	0,004097	0,063644	-0,008582

Cuadro 4. Parámetros estimados de los modelos y análisis estadístico, velocidad de aire de secado 2,0 m/s

Modelos	T (°C)	Parámetros						Análisis estadístico				
		a	b	c	g	h	k	n	R ²	χ^2	ERMS	MBE
Newton	30						0,157		0,9702	0,003492	0,059061	0,001349
	40						0,439		0,9985	0,000221	0,014864	-0,000198
	50						0,864		0,9965	0,000632	0,025106	-0,000737
	60						1,463		0,9878	0,000849	0,029078	0,009176
	70						1,914		0,9834	0,001325	0,036329	0,023866
Page	30						0,270	0,717	0,9871	0,000583	0,024122	0,003415
	40						0,397	1,100	0,9995	0,000040	0,006341	0,002588
	50						0,812	1,184	0,9994	0,000060	0,007742	0,003287
	60						1,535	1,202	0,9964	0,000465	0,021477	0,014591
	70						2,055	1,145	0,9917	0,001261	0,035376	0,027268
Page modificado	30						0,161	0,717	0,9871	0,000583	0,024123	0,003364
	40						0,431	1,100	0,9995	0,000040	0,006344	0,002207
	50						0,839	1,184	0,9994	0,000060	0,007743	0,003362
	60						1,428	1,202	0,9964	0,000465	0,021477	0,014556
	70						1,876	1,145	0,9917	0,001261	0,035376	0,027278

...continúa

Modelos	T (°C)	Parámetros						Análisis estadístico				
		a	b	c	g	h	k	n	R ²	χ ²	ERMS	MBE
Henderson y Pabis	30	0,876					0,133		0,9552	0,002071	0,045456	0,005414
	40	1,050					0,461		0,9987	0,000088	0,009361	-0,000619
	50	1,082					0,933		0,9968	0,000246	0,015634	-0,001892
	60	1,095					1,599		0,9926	0,000534	0,023033	0,008972
	70	1,086					2,076		0,9904	0,001177	0,034166	0,023860
Henderson y Pabis modificado	30	0,327	0,326	0,368	0,358	0,348	0,358		0,9992	0,000034	0,005791	-0,000225
	40	0,431	0,284	0,335	0,461	0,461	0,461		0,9987	0,000088	0,009361	-0,000619
	50	-1,943	-0,349	3,291	2,841	1,072	1,072		0,9995	0,000039	0,006213	0,001990
	60	1,052	0,002	0,051	-0,717	1,639	1,639		0,9952	0,000295	0,016986	-0,003490
	70	16,563	0,007	-15,55	-0,926	3,511	3,375		0,8614	0,009366	0,095626	-0,053603
Logarítmico	30	0,818	0,181				0,265		0,9979	0,000091	0,009500	-0,000250
	40	1,050	-0,003				0,456		0,9987	0,000086	0,009253	0,000079
	50	1,086	-0,009				0,906		0,9969	0,000225	0,014920	-0,000206
	60	1,094	0,020				1,713		0,9936	0,000364	0,018980	-0,000823
	70	1,083	0,013				2,167		0,9927	0,000675	0,025831	0,016385

...continúa

Modelos	T (°C)	Parámetros							Análisis estadístico			
		a	b	c	g	h	k	n	R ²	χ ²	ERMS	MBE
Midilli	30	1,056	0,007				0,289	0,805	0,9983	0,000078	0,008801	0,002103
	40	0,998	0,001				0,391	1,132	0,9998	0,000016	0,004021	0,001685
	50	0,995	0,003				0,816	1,231	0,9998	0,000013	0,003521	0,001006
	60	0,996	0,009				1,622	1,284	0,9996	0,000025	0,005001	-0,000078
	70	1,005	0,021				2,324	1,243	0,9966	0,000261	0,016041	-0,009484
Dos términos	30	0,653	0,368		0,048		0,358		0,9992	0,000034	0,005791	-0,000225
	40	0,535	0,515		0,461		0,461		0,9987	0,000088	0,009361	-0,000619
	50	0,555	0,529		0,993		0,933		0,9963	0,000307	0,017395	0,004151
	60	1,267	-0,276		6,752		1,783		0,9965	0,000402	0,019891	0,012075
	70	0,338	0,747		2,076		2,076		0,9904	0,001186	0,034168	0,023972
Exponencial de dos términos	30	0,230					0,530		0,984	0,001151	0,033888	0,002425
	40	1,593					0,547		0,9995	0,000043	0,006576	0,002890
	50	1,741					1,166		0,9995	0,000048	0,006908	0,002989
	60	1,783					2,035		0,997	0,000431	0,020679	0,014138
	70	1,703					2,544		0,9926	0,001255	0,035291	0,027466

...continúa

Modelos	T (°C)	Parámetros						Análisis estadístico				
		a	b	c	g	h	k	n	R ²	χ ²	ERMS	MBE
Verma	30	0,321			0,322		0,039		0,999	0,000048	0,006882	0,000555
	40	0,498			0,439		0,439		0,9985	0,000222	0,014864	-0,000198
	50	-20,422			0,600		0,590		0,9957	0,000407	0,020067	0,003074
	60	19,676			1,222		1,233		0,9883	0,000836	0,028748	0,010846
	70	-19,075			1,490		1,471		0,9846	0,001497	0,038462	0,027531
Aproximado a la difusión	30	0,679	0,122				0,322		0,999	0,000048	0,006887	0,001030
	40	1,150	3,550				0,492		0,9997	0,000025	0,004946	0,001393
	50	21,673	0,983				0,600		0,996	0,000406	0,020047	0,006075
	60	1,272	3,605				1,786		0,9965	0,000401	0,019904	0,012038
	70	21,578	0,988				1,490		0,985	0,001507	0,038585	0,028090
Wang y Singh	30	-0,144	0,006						0,9709	0,003703	0,060786	0,012228
	40	-0,276	0,019						0,9678	0,003848	0,061931	-0,032080
	50	-0,564	0,077						0,9762	0,002359	0,048408	-0,005436
	60	-0,857	0,175						0,9491	0,038805	0,196260	-0,093410
	70	-1,045	0,259						0,9047	0,132733	0,362882	-0,186460

Cuadro 5. Parámetros estimados de los modelos y análisis estadístico, velocidad de aire de secado 2,5 m/s

Modelos	T (°C)	Parámetros						Análisis estadístico				
		a	b	c	g	h	k	n	R ²	χ^2	ERMS	MBE
Newton	30						0,226		0,9968	0,000455	0,021314	-0,005771
	40						0,477		0,9979	0,000160	0,012642	0,005509
	50						1,035		0,9979	0,000154	0,012377	0,005274
	60						1,521		0,9971	0,000442	0,020967	-0,000233
	70						1,894		0,9962	0,000665	0,025703	-0,001538
Page	30						0,239	0,966	0,9967	0,000288	0,016938	0,004722
	40						0,477	0,999	0,9979	0,000160	0,012638	0,005295
	50						1,040	0,972	0,9981	0,000137	0,011676	0,004441
	60						1,575	1,157	0,9994	0,000054	0,007280	0,003510
	70						2,083	1,211	0,9993	0,000057	0,007503	0,003324
Page modificado	30						0,227	0,966	0,9966	0,000287	0,016935	0,004446
	40						0,477	0,999	0,9979	0,000160	0,012640	0,005439
	50						1,041	0,972	0,9981	0,000137	0,011676	0,004407
	60						1,481	1,157	0,9994	0,000054	0,007280	0,003531
	70						1,833	1,211	0,9993	0,000057	0,007503	0,003324

...continúa

Modelos	T (°C)	Parámetros						Análisis estadístico				
		a	b	c	g	h	k	n	R ²	χ ²	ERMS	MBE
Henderson y Pabis	30	0,999					0,225		0,9966	0,000316	0,017770	0,004713
	40	1,012					0,482		0,9982	0,000154	0,012374	0,005141
	50	1,007					1,042		0,9981	0,000152	0,012277	0,005169
	60	1,077					1,633		0,9977	0,000157	0,012475	-0,001146
	70	1,104					2,081		0,9971	0,000204	0,014209	-0,002465
Henderson y Pabis modificado	30	0,506	0,510	0,006	0,244	-0,127	0,244		0,9989	0,000069	0,008273	0,001032
	40	0,679	0,342	0,006	0,505	-0,143	0,505		0,9993	0,000043	0,006529	-0,001350
	50	0,050	0,049	0,937	0,357	1,229	0,357		0,9997	0,000019	0,004293	0,000100
	60	0,761	0,127	0,189	1,633	1,633	1,633		0,9977	0,000161	0,012475	-0,001146
	70	1,463	1,463	-1,839	1,645	1,457	1,649		0,9979	0,000150	0,012046	0,001406
Logarítmico	30	0,989	0,041				0,259		0,9985	0,000084	0,009177	-0,000553
	40	1,010	0,020				0,519		0,9992	0,000047	0,006823	-0,000475
	50	1,006	0,023				1,137		0,9997	0,000026	0,005094	-0,000273
	60	1,077	-0,004				1,613		0,9978	0,000154	0,012319	0,000386
	70	1,105	-0,007				2,032		0,9972	0,000188	0,013587	-0,000036

...continúa

Modelos	T (°C)	Parámetros							Análisis estadístico			
		a	b	c	g	h	k	n	R ²	χ ²	ERMS	MBE
Midilli	30	0,994	0,004				0,212	1,092	0,9996	0,000045	0,006704	-0,002367
	40	1,001	0,003				0,469	1,062	0,9996	0,000025	0,005000	-0,000928
	50	1,041	0,004				1,113	0,964	0,9995	0,000033	0,005668	0,000764
	60	0,999	0,005				1,619	1,190	0,9999	0,000008	0,002753	-0,000496
	70	1,017	0,003				2,129	1,200	0,9995	0,000032	0,005557	-0,000110
Dos términos	30	1,017	0,006		-0,127		0,244		0,9989	0,000068	0,008257	0,000775
	40	0,006	1,021		0,505		-0,143		0,9993	0,000043	0,006529	-0,001350
	50	0,937	0,099		0,357		1,229		0,9997	0,000019	0,004293	0,000100
	60	21,339	-20,275		1,265		1,280		0,9983	0,000125	0,011050	0,002003
	70	24,817	-23,731		1,549		1,567		0,9978	0,000149	0,012058	0,000556
Exponencial de dos términos	30	0,538					0,306		0,9974	0,000215	0,014635	0,002999
	40	0,640					0,565		0,9979	0,000138	0,011714	0,003574
	50	0,568					1,345		0,9989	0,000090	0,009454	0,002733
	60	1,697					2,005		0,9995	0,000049	0,006948	0,003611
	70	1,784					2,618		0,9995	0,000042	0,006477	0,002834

...continúa

Modelos	T (°C)	Parámetros							Análisis estadístico			
		a	b	c	g	h	k	n	R ²	χ ²	ERMS	MBE
Verma	30	0,002			0,234		-0,190		0,9985	0,000099	0,009912	0,002247
	40	0,002			0,486		-0,254		0,9991	0,000070	0,008374	-0,000200
	50	0,981			0,010		1,092		0,9992	0,000061	0,007786	0,001344
	60	-24,266			1,102		1,088		0,9968	0,000302	0,017237	0,004986
	70	-23,141			1,319		1,300		0,995	0,000450	0,021037	0,002871
Aproximado a la difusión	30	0,998	-0,810				0,234		0,9985	0,000099	0,009932	0,002310
	40	0,998	-0,522				0,486		0,9991	0,000070	0,008369	-0,000179
	50	0,981	0,009				1,092		0,9992	0,000061	0,007786	0,001337
	60	22,638	0,986				1,103		0,9967	0,000302	0,017243	0,003918
	70	25,142	0,986				1,319		0,9952	0,000446	0,020924	0,003957
Wang y Singh	30	-0,166	0,007						0,9846	0,002543	0,050377	0,008102
	40	-0,291	0,021						0,9438	0,006253	0,078947	-0,036610
	50	-0,653	0,105						0,9632	0,005262	0,072269	-0,019726
	60	-0,940	0,211						0,9639	0,003857	0,061783	-0,012947
	70	-1,100	0,283						0,9444	0,005764	0,075475	-0,016305

4.3 Cálculo de la difusividad efectiva de la humedad

Las Ecuaciones 7 y 8 se usaron para calcular la difusividad efectiva (D_{eff}) de la humedad de las hojas de sachaculantro a diferentes temperaturas y velocidades de aire de secado.

Cuadro 6. Difusividades efectivas calculadas

T (°C)	Difusividad efectiva (m^2/s)		
	v1 = 1,5 m/s	v2 = 2,0 m/s	v3 = 2,5 m/s
30	$1,355 \times 10^{-10}$	$7,390 \times 10^{-11}$	$1,307 \times 10^{-10}$
40	$2,654 \times 10^{-10}$	$3,137 \times 10^{-10}$	$2,601 \times 10^{-10}$
50	$7,297 \times 10^{-10}$	$6,258 \times 10^{-10}$	$6,092 \times 10^{-10}$
60	$1,031 \times 10^{-9}$	$9,232 \times 10^{-10}$	$1,081 \times 10^{-9}$
70	$1,479 \times 10^{-9}$	$1,235 \times 10^{-9}$	$1,551 \times 10^{-9}$

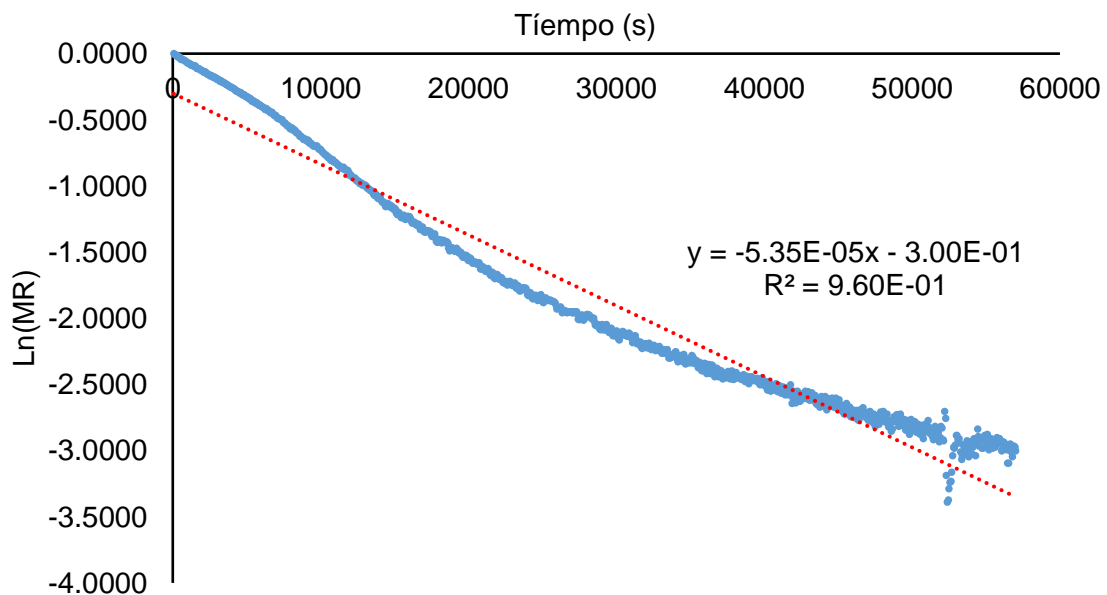


Figura 8. Cálculo de difusividad efectiva de la humedad

4.4 Energía de activación

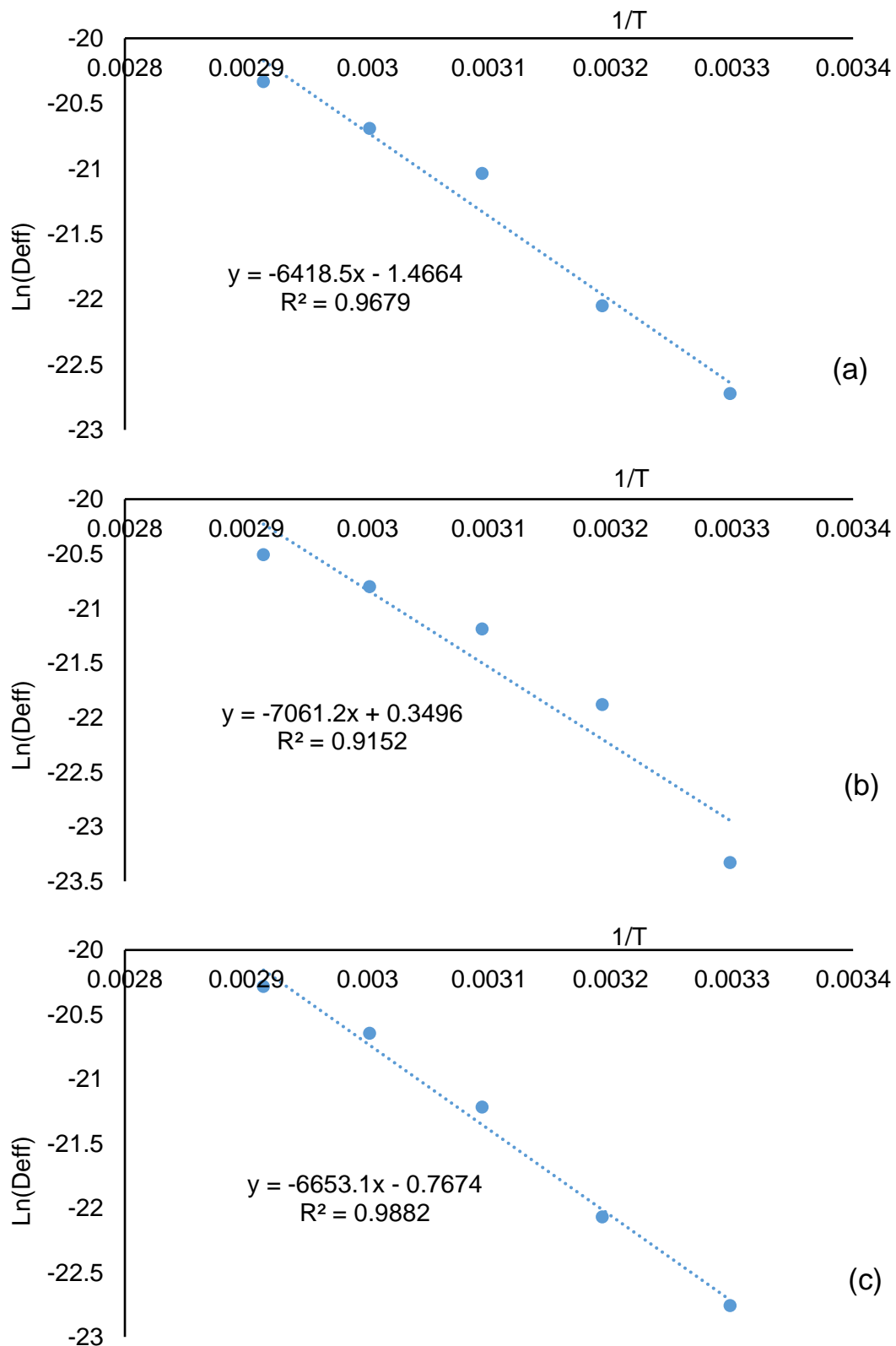


Figura 9. Cálculo energía de activación, velocidades de aire de secado de (a) 1,50 m/s, (b) 2,0 m/s y (c) 2,5 m/s

La energía de activación fue calculada mediante la linealización de la Ecuación 9 y posterior ajuste de mínimos cuadrados, la figura 9 muestra los resultados para las tres velocidades de aire de secado (1,5; 2,0 y 2,5 m/s).

Cuadro 7. Energía de activación de las hojas de sachaculantro

Velocidad de aire (m/s)	Energía de Activación (kJ/mol)
1,50	53,365
2,00	58,709
2,50	55,316

V. DISCUSIÓN

5.1 De las curvas de secado

El contenido de humedad de las hojas de sachaculantro en promedio es de $84,490 \pm 1,733\%$ en base húmeda (Anexo 1). Según (SANKAT y MAHARAJ, 1994) quienes investigaron el período de validez de *Eryngium foetidum* almacenada en condiciones de refrigeración en Trinidad y Tobago reportaron una humedad de hojas frescas de sachaculantro de 87,4% en base húmeda. El proceso de secado se caracteriza por una disminución progresiva en el contenido de humedad con el tiempo (MOTEBALI *et al.*, 2016), La relación de humedad disminuyó al aumentar la temperatura de secado y el tiempo de secado (AZEEZ *et al.*, 2017) Figuras 5, 6 y 7. Los tiempos de secado se observan en el Cuadro 2. Las diversas condiciones que afectan el secado de frutas y verduras incluyen la temperatura de secado, la velocidad del aire, el tamaño y la forma del material, y la humedad relativa (HASHIM *et al.*, 2016), Entre estas condiciones, las más influyentes en términos de secado de frutas y verduras son la temperatura de secado y el espesor del material (AGNIHOTRI *et al.*, 2017; AVHAD y MARCHETTI, 2016; FAN *et al.*, 2015; KUMAR *et al.*, 2012; MONTES *et al.*, 2008).

Los resultados muestran que la temperatura tuvo un papel importante en la disminución del tiempo de secado (Figura 4 y Cuadro 2), La disminución de dicho tiempo a la temperatura más alta se puede explicar por la relación directa entre las transferencias de calor y masa. En otras palabras, la pérdida de agua disminuyó debido a la disminución de la transferencia de calor y masa a la temperatura más baja. Además, las temperaturas más altas aumentaron la presión del vapor de agua en las muestras. Dependiendo de estos factores, una temperatura más alta acelera la migración de la humedad desde el centro hacia el exterior y la evaporación del agua (AKDAŞ y BAŞLAR, 2015; AVHAD y MARCHETTI, 2016).

La velocidad de aire de secado no influye significativamente en el tiempo de secado (Anexo 2), Se ha argumentado que la velocidad del aire afecta significativamente el proceso de secado de alimentos y productos agrícolas, Sin embargo, esto se observa principalmente en cultivos como arroz, maíz, patata y otros (HASHIM *et al.*, 2016) por ejemplo en el secado de hojas de menta (MIRAEI *et al.*, 2017). Los estudios sobre el secado de frutas y verduras indican que la velocidad del aire tiene poca influencia en la cinética de secado de la mayoría de ellos, el efecto de la velocidad del aire podría depender de la respectiva transferencia de calor y masa, que podría tener resistencia interna o externa. Existe una mayor resistencia interna a una velocidad de aire menor ($\leq 1,5$ m/s) que a una velocidad de flujo mayor. En general, este parámetro solo puede tener una gran influencia a una velocidad del aire superior a 2,5 m/s (HASHIM *et al.*, 2016). Sin embargo, el efecto de la temperatura es menos significativo a alta velocidad del aire (PUTRA y AJIWIGUNA, 2017)

Los resultados estuvieron de acuerdo con otros vegetales. Por ejemplo, hojas de stevia (LEMUS-MONDACA *et al.*, 2015), en papa (MOON *et al.*, 2015), en manzanilla (MOTEBALI *et al.*, 2016)

5.2 Modelado de la cinética de secado

Los resultados estadísticos de los diferentes modelos, incluidos los coeficientes del modelo de secado y los criterios de comparación utilizados para evaluar la bondad de ajuste, es decir, coeficiente de determinación R^2 , error cuadrático medio EMRS, Error de sesgo promedio MBE y Chi cuadrado χ^2 se enumeraron en los Cuadros 3, 4 y 5. En todos los casos, los valores de R^2 fueron superiores a 0,8614 y Los valores EMRS y χ^2 fueron inferiores a 0,0641 y 0,0044, respectivamente.

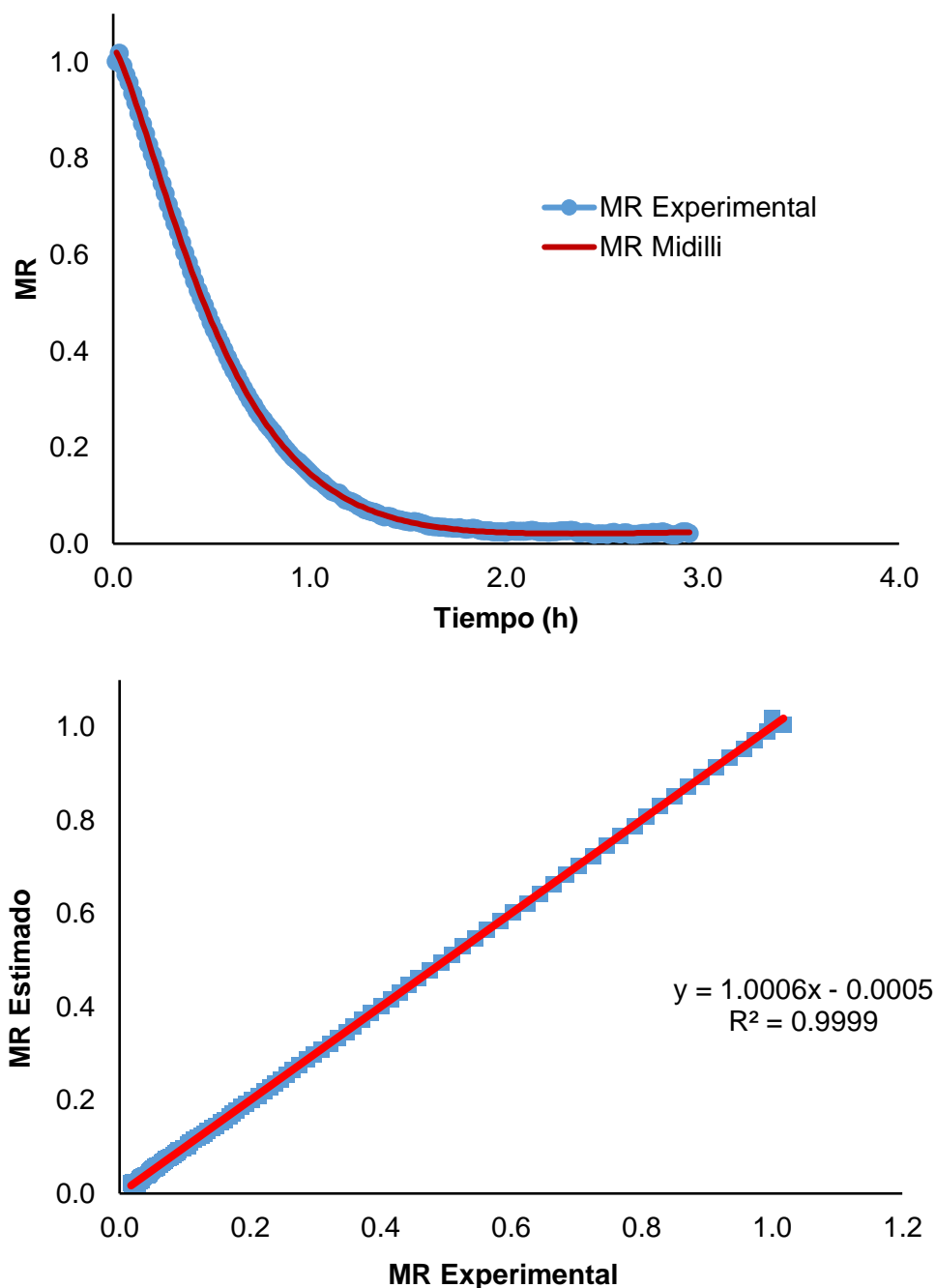


Figura 10. Comparación de datos experimentales versus datos estimados por el modelo de Midilli a 70 °C y 1,5 m/s

A partir del Cuadro 3, los valores R^2 más altos y los valores inferiores RMSE y χ^2 se obtuvieron de los modelos de Midilli, exponencial de dos términos, dos términos, page, page modificado y logarítmico, resultados similares fueron obtenidos en el secado de yuca (TORREGROZA-ESPINOSA *et al.*, 2014), secado de hojas de tomillo (ROCHA *et al.*, 2012), secado de descartes de limón (*Citrus limón*) (PUENTE-DIAZ *et al.*, 2013), secado de ñame (*Dioscórrea*

rotundata) (MONTES *et al.*, 2008), secado de Cajuil (*Anacardium occidentale* L.) (MICHALEWICZ *et al.*, 2011), Modelamiento de la operación unitaria de deshidratación (MOSQUERA *et al.*, 2015). Para demostrar la veracidad de estos modelos se presentan en las Figuras 10 y 11.

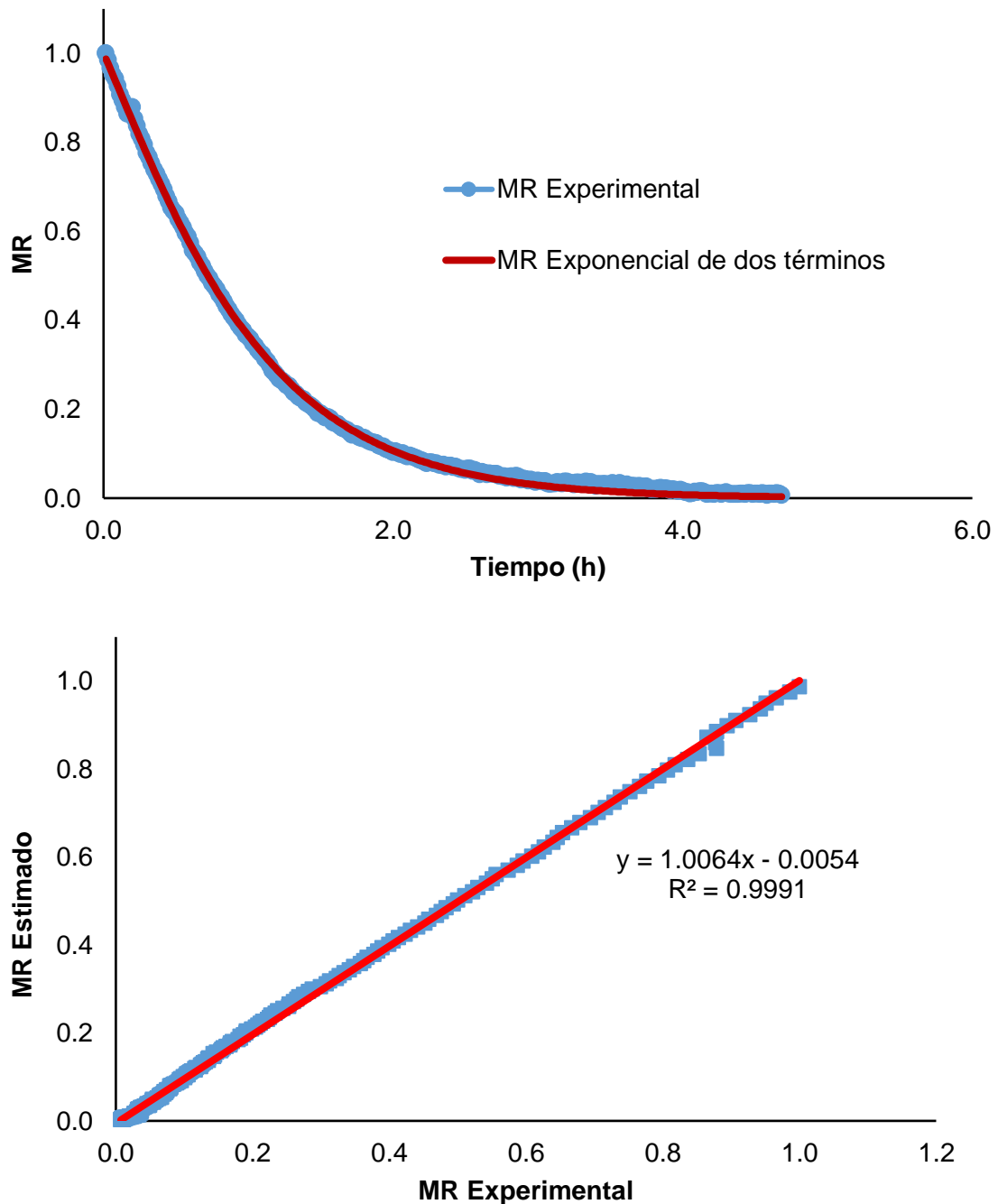


Figura 11. Comparación de datos experimentales versus datos estimados por el modelo exponencial de dos términos a 50 °C y 1,5 m/s

Según el Cuadro 4 los valores más altos de coeficiente de determinación y los menores valores de RMSE y χ^2 se obtuvieron de los modelos de Midilli, aproximado a la difusión, exponencial de dos términos, page, page modificado y Henderson modificado, resultados similares fueron obtenidos por SILVA *et al.* (2008), ESPIERRIZ (2012), ALVES *et al.* (2015), FAN *et al.* (2015), GIRALDO *et al.* (2010).

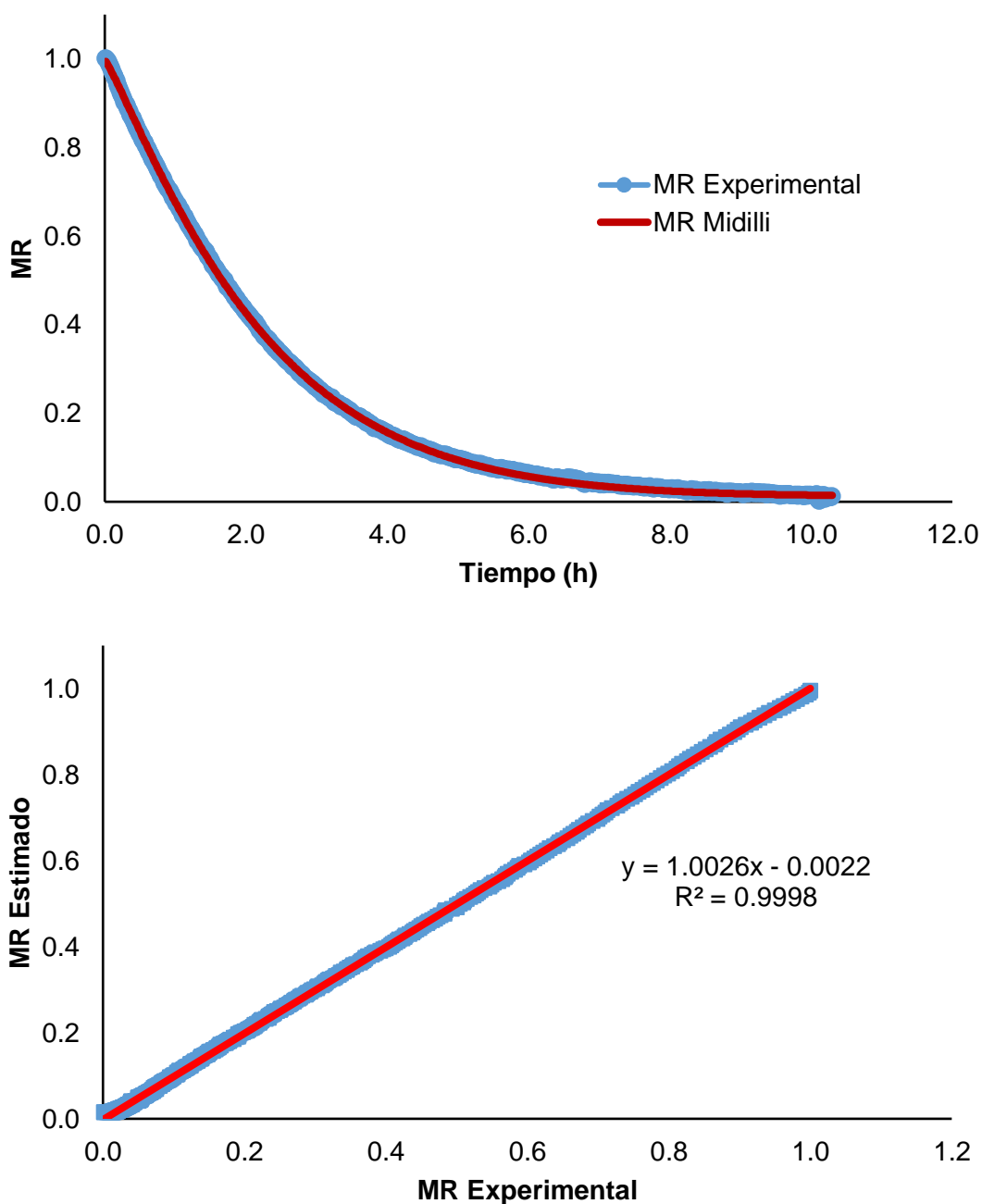


Figura 12. Comparación de datos experimentales versus datos estimados por el modelo exponencial de dos términos a 40 °C y 2,0 m/s

El mayor coeficiente de determinación y el menor RMSE y χ^2 se obtuvieron del modelo de Midilli, logarítmico, dos términos, Henderson y Pabis modificado aproximado a la difusión y exponencial de dos términos (Cuadro 5), reportes análogos fueron dados por AZEEZ *et al.* (2017), YÜKSEL *et al.* (2018) y otros.

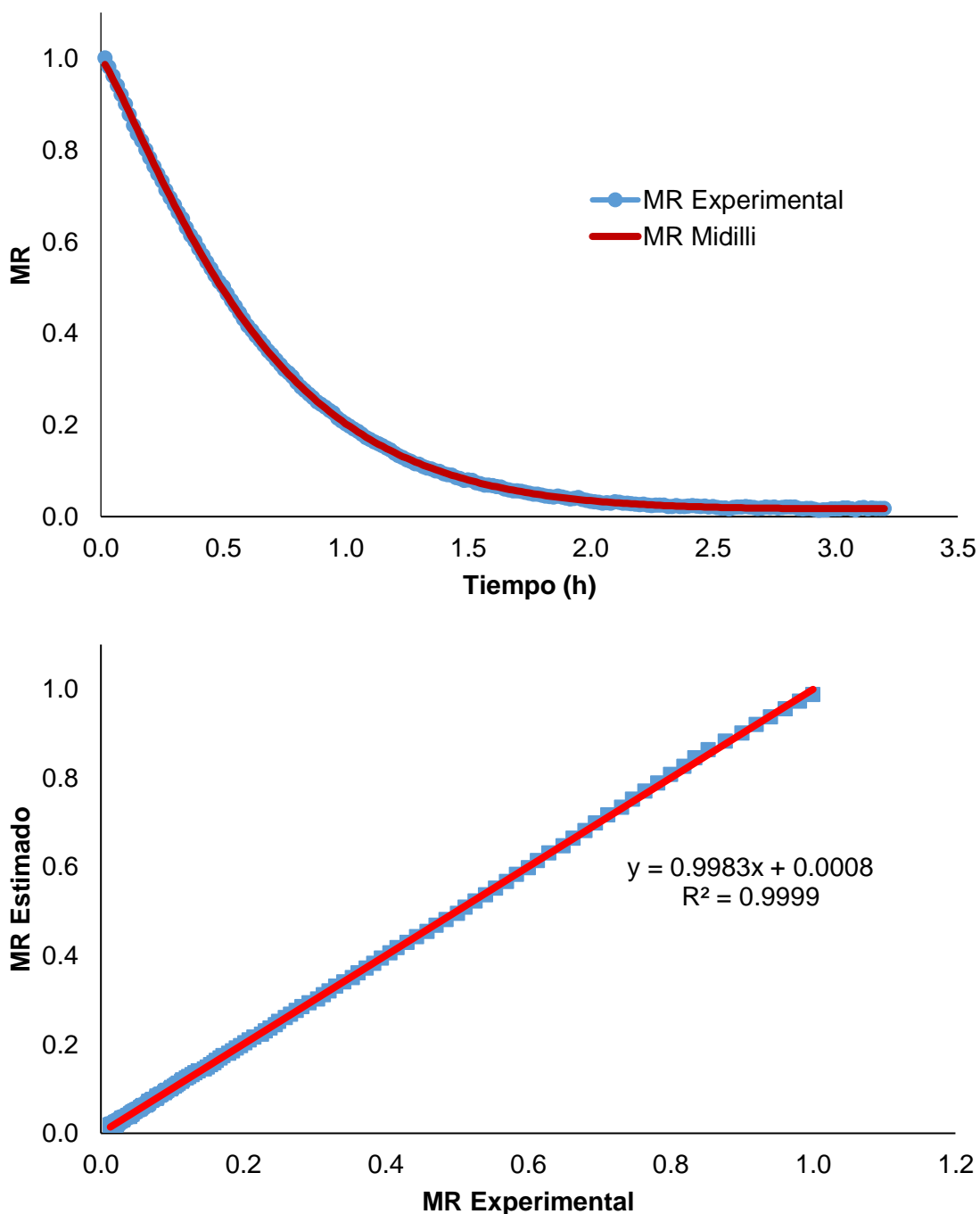


Figura 13. Comparación de datos experimentales versus datos estimados por el modelo exponencial de dos términos a 60 °C y 2,5 m/s

5.3 Difusividad efectiva de la humedad

En general la difusividad efectiva de la humedad (Cuadro 6) para las diferentes temperaturas y velocidades de aire se encuentra en el rango de 10^{-11} a 10^{-9} para alimentos secados por métodos convencionales (ARSLAN y ÖZCAN, 2011). El mecanismo de transferencia de masa en vegetales y frutas es complejo de explicar. Por lo tanto, la segunda ley de Fick se usa principalmente para describir su comportamiento de secado con la suposición de que el mecanismo principal tiene naturaleza de difusión, contracción despreciable, temperatura constante y coeficientes de difusión (ALARA *et al.*, 2017). Según el Anexo 3 y la Figura 14, es evidente apreciar que conforme la temperatura se incrementa la difusividad efectiva también se incrementa, es decir, la temperatura tiene un efecto significativo sobre esta (ALARA *et al.*, 2017; ARSLAN y ÖZCAN, 2011; AZEEZ *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2016; NADEE *et al.*, 2011). Un aumento en la temperatura causa una reducción en la viscosidad del agua y mejora la actividad de las moléculas de agua. Esto se puede atribuir al hecho de que a una temperatura más alta, las moléculas de agua están unidas a la matriz de alimentos, por lo tanto, requieren menos energía para eliminarse que a una temperatura más baja (ALARA *et al.*, 2017).

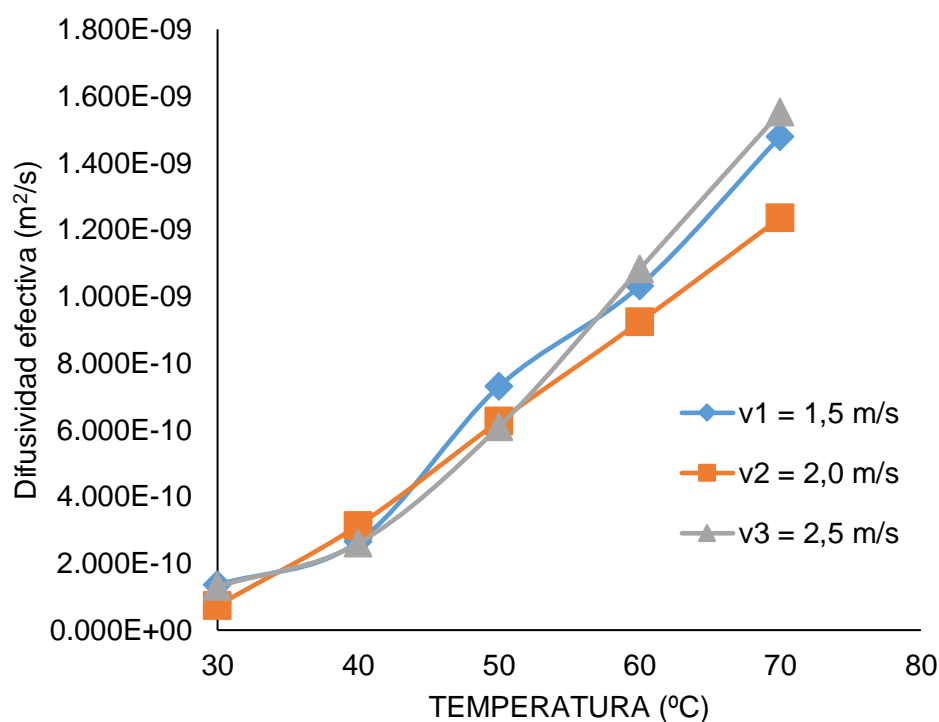


Figura 14. Difusividad efectiva a diferentes temperaturas y velocidades

5.4 De la energía de activación

Una ecuación de tipo Arrhenius modificada en términos de temperatura y humedad, donde la dependencia efectiva de la difusividad sobre el contenido de humedad fue introducida por un término correspondiente a la energía de activación como una función empírica de la humedad (CASTRO *et al.*, 2018).

La energía de activación obtenida para el secado de hojas de sachaculantro a tres velocidades de aire (1,5, 2,0 y 2,5 m/s) se reportan en el cuadro 7 según ERBAY y ICIER (2010) señala que los valores de energía de activación en alimentos y productos agrícolas oscila en el rango de 12,32 a 82,93 kJ/mol, MIRAEI *et al.* (2017) reporta un rango similar 12,7-110 kJ / mol. Otros investigadores MONTES *et al.* (2008), determinaron 18,62 KJ/mol para el ñame (*Dioscórea rotundata*), KOUKOUCH *et al.* (2017) calcularon 29,06 kJ/mol para residuos de orujo de olivo, AZEEZ *et al.* (2017) en rodajas de tomate 31,19 kJ/mol, ROBERTS *et al.* (2008) en tres variedades de semillas de uva 40,14, 30,45 y 31,47 kJ/mol.

VI. CONCLUSIONES

Este estudio demostró que el secado de las hojas de sachaculantro se puede predecir con precisión utilizando los modelos de capa fina de los modelos de Midilli, Exponencial de dos términos, aproximado a la difusión y Logarítmico. El modelo de Midilli demostró ser uno de los mejores modelos de predicción global para el secado a diferentes temperaturas (30, 40, 50, 60 y 70 °C) y diferentes velocidades de aire (1,5, 2,0 y 2,5 m/s).

La transferencia de humedad se puede describir por difusión, donde las difusividades efectivas estaban dentro de los rangos de otros alimentos, y se demostró que la dependencia de la difusividad efectiva de la humedad y la temperatura sigue una relación de Arrhenius.

Las energías de activación calculadas fue de 53,365, 58,709 y 55,316 kJ/mol a velocidades de aire de 1,5, 2,0 y 2,5 m/s respectivamente.

VII. RECOMENDACIONES

Al concluir la presente investigación en base a las observaciones realizar las siguientes sugerencias con el objetivo de contribuir a futuros trabajos en hojas de sachaculantro u otras materias primas de características similares.

- Secar las hojas de sachaculantro mediante el método de secado por aire caliente, arrastra los componentes químicos responsables del aroma característico de las hojas de sachaculantro, se recomienda utilizar métodos diferentes de secado como microondas, infrarrojo y otros.
- Las temperaturas por arriba de los 50 °C dañan severamente el color de las hojas, se sugiere utilizar temperaturas menores a esta.
- El modelo de Midilli es muy bueno para predecir la cinética de secado de las hojas de sachaculantro existen otros modelos que no fueron tomados en cuenta en este trabajo, sería interesante estudiarlos mediante otros métodos de secado.
- Investigar otras técnicas de secado evitando el uso de aire forzado.
- Aplicar los modelos de Midilli, exponencial de dos términos, logarítmico, aproximado a la difusión, entre otros, que destacaron en la cinética de secado son importantes para decidir las condiciones de secado ideales, que son parámetros importantes en términos de diseño de equipos, optimización y mejora de la calidad del producto.
- En la agroindustria, el secado es una operación muy frecuente y esta ocasiona la mayoría de las pérdidas de producción, para minimizar estas pérdidas se debe optimizar las condiciones de secado, el diseño de la máquina y la calidad del producto en cada uno de las diversas materias primas que se produce en el ámbito local, regional o nacional.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGNIHOTRI, V., JANTWAL, A., y JOSHI, R. (2017). Determination of effective moisture diffusivity, energy consumption and active ingredient concentration variation in *Inula racemosa* rhizomes during drying. *Industrial Crops and Products*, 106, 40-47. doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.068>
- AKDAŞ, S., y BAŞLAR, M. (2015). Dehydration and Degradation Kinetics of Bioactive Compounds for Mandarin Slices Under Vacuum and Oven Drying Conditions. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 1098-1107. doi: 10.1111/jfpp.12324
- ALARA, O. R., ABDURAHMAN, N. H., y OLALERE, O. A. (2017). Mathematical modelling and morphological properties of thin layer oven drying of *Vernonia amygdalina* leaves. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.09.003>
- ALVES, M. J. J., LA TRINIDADE ROCHA, A. P., y DA PALMEIRA GOMES, J. (2015). Study of the drying kinetics of leaves *Bauhinia cheilantha* (Bong.) Steud.(mororó). *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 20(4), 397-408.
- ARSLAN, D., y ÖZCAN, M. M. (2011). Dehydration of red bell-pepper (*Capsicum annuum* L.): Change in drying behavior, colour and antioxidant content. *Food and Bioproducts Processing*, 89(4), 504-513. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2010.09.009>
- AVHAD, M. R., y MARCHETTI, J. M. (2016). Mathematical modelling of the drying kinetics of Hass avocado seeds. *Industrial Crops and Products*, 91(Supplement C), 76-87. doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.06.035>
- AZEEZ, L., ADEBISI, S. A., OYEDEJI, A. O., ADETORO, R. O., y TIJANI, K. O. (2017). Bioactive compounds' contents, drying kinetics and mathematical modelling of tomato slices influenced by drying temperatures and time. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.03.002>

- BANOUT, J. A. N., HAVLIK, J., KULIK, M., KLOUCEK, P., LOJKA, B., y VALTEROVA, I. (2010). Effect of solar drying on the composition of essential oil of sachaculantro (*Eryngium foetidum* L.) grown in the peruvian amazon. *Journal of Food Process Engineering*, 33(1), 83-103. doi: 10.1111/j.1745-4530.2008.00261.x
- BRADFORD, K. J., DAHAL, P., VAN ASBROUCK, J., KUNUSOTH, K., BELLO, P., THOMPSON, J., y WU, F. (2018). The dry chain: Reducing postharvest losses and improving food safety in humid climates. *Trends in Food Science & Technology*, 71(Supplement C), 84-93. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.11.002>
- CASTRO, A. M., MAYORGA, E. Y., y MORENO, F. L. (2018). Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review. *Journal of Food Engineering*, 223, 152-167. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.12.012>
- CERDAS, A. M. D. M., y MONTERO, C. M. (2016). Efecto de cambios en manejo poscosecha sobre la calidad y vida útil del culantro coyote para exportación (*Eryngium foetidum* L.). *Agronomía Costarricense*, 40(1), 51-64.
- DARVISHI, H., ASL, A. R., ASGHARI, A., AZADBAKHT, M., NAJAFI, G., y KHODAEI, J. (2014). Study of the drying kinetics of pepper. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13(2), 130-138. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.03.002>
- DAS, I., y ARORA, A. (2017). Alternate microwave and convective hot air application for rapid mushroom drying. *Journal of Food Engineering*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.10.018>
- DEROSSI, A., SEVERINI, C., y CASSI, D. (2011). Mass transfer mechanisms during dehydration of vegetable food: traditional and innovative approaches *Advanced topics in mass transfer*. InTech.
- DHANUSHKODI, S., WILSON, V. H., y SUDHAKAR, K. (2017). Mathematical modeling of drying behavior of cashew in a solar biomass hybrid dryer. *Resource-Efficient Technologies*, 3(4), 359-364. doi: <https://doi.org/10.1016/j.refit.2016.12.002>
- ELMIZADEH, A., SHAHEDI, M., y HAMDAMI, N. (2017). Comparison of electrohydrodynamic and hot-air drying of the quince slices. *Innovative*

- Food Science & Emerging Technologies*, 43(Supplement C), 130-135. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.07.030>
- ERBAY, Z., y ICIER, F. (2010). A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. *Critical reviews in food science and nutrition*, 50(5), 441-464.
- ESPIERRIZ, J. C. (2012). Obtención de curvas de secado de hierba limón (*Cymbopogon citratus*).
- FAN, K., CHEN, L., HE, J., y YAN, F. (2015). Characterization of Thin Layer Hot Air Drying of Sweet Potatoes (*Ipomoea batatas* L.) Slices. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 1361-1371. doi: 10.1111/jfpp.12355
- GIRALDO-ZUNIGA, A. D., ARÉVALO-PINEDO, A., SILVA, A. F., SILVA, P. F., VALDES-SERRA, J. C., y PAVLAK, M. C. D. M. (2010). Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas. *Food Science and Technology*, 30, 179-182.
- GIRALDO, Z. A. D., SILVA, P. F., DE MENEZES PAVLAK, M. C., SILVA, A. F., ARÉVALO-PINEDO, A., y VALDES-SERRA, J. C. (2010). Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 30(1), 179-182.
- HASHIM, N., ONWUDE, D. I., JANIUS, R., NAWI, N. M., y ABDAN, K. (2016). Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(3), 599-618. doi: 10.1111/1541-4337.12196
- JANGAM, S. V. (2011). An Overview of Recent Developments and Some R&D Challenges Related to Drying of Foods. *Drying Technology*, 29(12), 1343-1357. doi: 10.1080/07373937.2011.594378
- JARAMILLO, B. E., DUARTE, E., y MARTELO, I. (2011). Composición química volátil del aceite esencial de *Eryngium foetidum* L. colombiano y determinación de su actividad antioxidante. *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 16, 140-150.
- JIANG, J., DANG, L., YUENSIN, C., TAN, H., PAN, B., y WEI, H. (2017). Simulation of microwave thin layer drying process by a new theoretical

- model. *Chemical Engineering Science*, 162(Supplement C), 69-76. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.12.040>
- KOUKOUCH, A., IDLIMAM, A., ASBIK, M., SARH, B., IZRAR, B., BOSTYN, S., . . . AMINE, A. (2017). Experimental determination of the effective moisture diffusivity and activation energy during convective solar drying of olive pomace waste. *Renewable Energy*, 101(Supplement C), 565-574. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.006>
- KUMAR, C., KARIM, A., JOARDDER, M. U. H., y MILLER, G. (2012). *Modeling heat and mass transfer process during convection drying of fruit*. Paper presented at the The 4th International Conference on Computational Methods (ICCM2012).
- LEMUS-MONDACA, R., VEGA-GÁLVEZ, A., MORAGA, N. O., y ASTUDILLO, S. (2015). Dehydration of Stevia rebaudiana Bertoni Leaves: Kinetics, Modeling and Energy Features. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(5), 508-520. doi: 10.1111/jfpp.12256
- LI, X.-J., WANG, X., LI, Y., JIANG, P., y LU, H. (2016). Changes in moisture effective diffusivity and glass transition temperature of paddy during drying. *Computers and Electronics in Agriculture*, 128, 112-119. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.08.025>
- MEJÍA, K. C., y RENGIFO, S. E. L. (2000). Plantas medicinales de uso popular en la Amazonía peruana. Retrieved 12/05/2017, from <http://repositorio.iiap.org.pe/handle/IIAP/74>
- MGHAZLI, S., OUHAMMOU, M., HIDAR, N., LAHNINE, L., IDLIMAM, A., y MAHROUZ, M. (2017). Drying characteristics and kinetics solar drying of Moroccan rosemary leaves. *Renewable Energy*, 108(Supplement C), 303-310. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.022>
- MICHALEWICZ, J. S., HENRIQUEZ, J. R., y CHARAMBA, J. C. (2011). Secado de Cajuil (anacardium occidentale L.): Estudio Experimental y Modelado de la Cinética de Secado. *Información tecnológica*, 22(6), 63-74.
- MIRAEI, A. S.-H., SALARIKIA, A., y GOLZARIAN, M. R. (2017). Analyzing drying characteristics and modeling of thin layers of peppermint leaves under hot-air and infrared treatments. *Information Processing in Agriculture*, 4(2), 128-139. doi: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.03.001>

- MONTES, M. E. J., TORRES GALLO, R., ANDRADE PIZARRO, R. D., PÉREZ SIERRA, O. A., MARIMON ESCOBAR, J. L., y MEZA HERAZO, I. I. (2008). Modelado de la cinética de secado de ñame (*dioscorea rotundata*) en capa delgada. *Ingeniería e investigación*, 28(2).
- MOON, J. H., PAN, C.-H., y YOON, W. B. (2015). Drying characteristics and thermal degradation kinetics of hardness, anthocyanin content and colour in purple- and red-fleshed potato (*Solanum tuberosum* L.) during hot air drying. *International Journal of Food Science & Technology*, 50(5), 1255-1267. doi: 10.1111/ijfs.12740
- MOSQUERA, L. F. G., GIRALDOB, S. A., JIMÉNEZB, D. G., PANTOJAB, D. F. M., ALTUROB, A. O., y LÓPEZB, S. R. (2015). Modelamiento de la operación unitaria de deshidratación bajo diferentes esquemas de secado.
- MOTEVALI, A., MINAEI, S., BANAKAR, A., GHOBADIAN, B., y DARVISHI, H. (2016). Energy analyses and drying kinetics of chamomile leaves in microwave-convective dryer. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 15(2), 179-187. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2014.11.003>
- NADEE, A., TIRAWANICHAKUL, Y., y TIRAWANICHAKUL, S. (2011, 5-6 Dec. 2011). *Drying kinetics model and physical properties of herb Pandanus leaf*. Paper presented at the 2011 IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering.
- ONWUDE, D. I., HASHIM, N., y CHEN, G. (2016). Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops. *Trends in Food Science & Technology*, 57(Part A), 132-145. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.012>
- PAUL, J. H. A., SEAFORTH, C. E., y TIKASINGH, T. (2011). *Eryngium foetidum* L.: A review. *Fitoterapia*, 82(3), 302-308. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2010.11.010>
- PUENTE-DIAZ, L., ECHEGARAY-PACHECO, E., CASTRO-MONTERO, E., y DI SCALA, K. (2013). application of mathematical models to infrared assisted drying process of lemon waste (*citrus limon* (L.) burm. f. cv. genova). *Dyna*, 80(181), 91-97.

- PUTRA, R. N., y AJIWIGUNA, T. A. (2017). Influence of Air Temperature and Velocity for Drying Process. *Procedia Engineering*, 170, 516-519. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.082>
- REN, F., PERUSSELLO, C. A., ZHANG, Z., KERRY, J. P., y TIWARI, B. K. (2018). Impact of ultrasound and blanching on functional properties of hot-air dried and freeze dried onions. *LWT - Food Science and Technology*, 87(Supplement C), 102-111. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.08.053>
- ROBERTS, J. S., KIDD, D. R., y PADILLA-ZAKOUR, O. (2008). Drying kinetics of grape seeds. *Journal of Food Engineering*, 89(4), 460-465. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.05.030>
- ROCHA, R. P. D., MELO, E. D. C., CORBÍN, J. B., BERBERT, P. A., DONZELES, S. M., y TABAR, J. A. (2012). Drying kinetics of thyme. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(6), 675-683.
- SABAREZ, H. (2016). Drying of Food Materials *Reference Module in Food Science*: Elsevier.
- SANKAT, C., y MAHARAJ, V. (1994). Drying the green herb shado beni (*Eryngium foetidum* L.) in a natural convection cabinet and solar driers. *ASEAN Food Journal*.
- SILVA, A., ALMEIDA, F. D. A., LIMA, E., SILVA, F., y GOMES, J. (2008). Drying kinetics of coriander (*Coriandrum sativum*) leaf and stem cinéticas de secado de hoja y tallo de cilantro (*Coriandrum sativum*). *CYTA-Journal of Food*, 6(1), 13-19.
- TORREGROZA-ESPINOSA, A. M., MONTES-MONTES, E. J., ÁVILA-GÓMEZ, A. E., y REMOLINA-LÓPEZ, J. F. (2014). Kinetic modelling of drying of three varieties of yucca industrial. *Dyna*, 81(186), 184-192.
- VERA, M. B., y SÁNCHEZ, S. M. (2015). Registro de algunas plantas medicinales cultivadas en San Cristóbal, municipio de Medellín (Antioquia - Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 68(2), 7647-7658.
- YANG, W., DU, H., MARIGA, A. M., PEI, F., MA, N., y HU, Q. (2017). Hot air drying process promotes lignification of *Lentinus edodes*. *LWT - Food Science and Technology*, 84(Supplement C), 726-732. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.06.039>

- YOUNIS, M., ABDELKARIM, D., y ZEIN EL-ABDEIN, A. (2018). Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25(2), 332-338. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.06.011>
- YÜKSEL, A. N., ONER, M. D., BAYRAM, M., y ONER, M. E. (2018). Mathematical modeling of packed bed and microwave drying of enriched couscous. *Journal of Food Measurement and Characterization*. doi: 10.1007/s11694-018-9787-3

ANEXOS

Anexo 1: Registros de humedad de todas las corridas experimentales

T (°C)	v (m/s)	Humedad en base húmeda			Tiempo (h)
		R1	R2	R3	
30	1,50	85,583	81,297	82,503	16,30
30	2,00	86,513	83,403	82,020	14,52
30	2,50	84,663	82,773	81,563	13,84
40	1,50	83,620	84,260	83,040	10,64
40	2,00	82,730	83,827	85,417	10,45
40	2,50	83,947	84,607	84,665	10,38
50	1,50	86,280	86,353	81,563	5,10
50	2,00	83,870	87,667	86,230	4,87
50	2,50	80,517	83,633	85,433	4,66
60	1,50	85,433	83,633	85,733	3,57
60	2,00	85,763	84,087	85,360	3,52
60	2,50	83,430	84,307	85,473	3,38
70	1,50	84,470	86,773	86,607	2,20
70	2,00	83,765	86,750	85,450	1,80
70	2,50	87,293	86,837	82,887	1,50

Anexo 2.**Análisis de Varianza para Tiempo - Suma de Cuadrados Tipo III**

Fuente	SC	GL	CM	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Temperatura	353,466	4	88,3665	364,61	0,0000
B:Velocidad	1,69099	2	0,845497	3,49	0,0814
RESIDUOS	1,93886	8	0,242358		
TOTAL (CORREGIDO)	357,096	14			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para Tiempo por Temperatura

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Temperatura	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
70	3	1,83333	0,284229	X
60	3	3,489	0,284229	X
50	3	4,87567	0,284229	X
40	3	10,49	0,284229	X
30	3	14,885	0,284229	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
30 - 40	*	4,395	1,3862
30 - 50	*	10,0093	1,3862
30 - 60	*	11,396	1,3862
30 - 70	*	13,0517	1,3862
40 - 50	*	5,61433	1,3862
40 - 60	*	7,001	1,3862
40 - 70	*	8,65667	1,3862
50 - 60	*	1,38667	1,3862
50 - 70	*	3,04233	1,3862
60 - 70	*	1,65567	1,3862

* indica una diferencia significativa.

Pruebas de Múltiple Rangos para Tiempo por Velocidad

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Velocidad	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
2,5	5	6,752	0,220163	X
2,0	5	7,0304	0,220163	X
1,5	5	7,5614	0,220163	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1,5 - 2		0,531	0,888158
1,5 - 2,5		0,8094	0,888158
2 - 2,5		0,2784	0,888158

* indica una diferencia significativa.

Anexo 3.**Análisis de Varianza para Difusividad efectiva - Suma de Cuadrados Tipo III**

Fuente	SC	GL	CM	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Temperatura	0	4	0	132,28	0,0000
B:Velocidad	0	2	0	2,22	0,1705
RESIDUOS	0	8	0		
TOTAL (CORREGIDO)	0	14			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para Difusividad efectiva por Temperatura

Método: 95,0 porcentaje LSD

Temperatura	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
T1	3	1,13389E-10	4,64257E-11	X
T2	3	2,7976E-10	4,64257E-11	X
T3	3	6,54914E-10	4,64257E-11	X
T4	3	1,01163E-9	4,64257E-11	X
T5	3	1,42155E-9	4,64257E-11	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
T1 - T2	*	-1,66371E-10	1,51403E-10
T1 - T3	*	-5,41525E-10	1,51403E-10
T1 - T4	*	-8,98243E-10	1,51403E-10
T1 - T5	*	-1,30816E-9	1,51403E-10
T2 - T3	*	-3,75154E-10	1,51403E-10
T2 - T4	*	-7,31872E-10	1,51403E-10
T2 - T5	*	-1,14179E-9	1,51403E-10
T3 - T4	*	-3,56718E-10	1,51403E-10
T3 - T5	*	-7,66636E-10	1,51403E-10
T4 - T5	*	-4,09918E-10	1,51403E-10

* indica una diferencia significativa.

Pruebas de Múltiple Rangos para Difusividad efectiva por Velocidad

Método: 95,0 porcentaje LSD

Velocidad	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
V2	5	6,34319E-10	3,59612E-11	X
V3	5	7,26471E-10	3,59612E-11	X
V1	5	7,27957E-10	3,59612E-11	X

Contraste	Sig. Diferencia	+/- Límites
V1 - V2	9,36379E-11	1,17276E-10
V1 - V3	1,4862E-12	1,17276E-10
V2 - V3	-9,21517E-11	1,17276E-10

* indica una diferencia significativa.