

UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ MARÍA ARGUEDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



**EVALUACION DEL EFECTO DE LA
TEMPERATURA DE SECADO EN LAS HOJAS DEL
PACHATAYA – PAMPA TAYA**

Presentado por

Br. SOLEDAD GLORIA MORENO PECEROS

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

ANDAHUAYLAS – APURÍMAC – PERÚ

2017

UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ MARÍA ARGUEDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



Presentado por

Br. SOLEDAD GLORIA MORENO PECEROS

**EVALUACION DEL EFECTO DE LA
TEMPERATURA DE SECADO EN LAS HOJAS DEL
PACHATAYA – PAMPA TAYA**

Asesor:

Ing. MSc. FIDELIA TAPIA TADEO

Co – Asesor:

Ing. MSc. DAVID CHOQUE QUISPE

ANDAHUAYLAS – APURÍMAC – PERÚ

2017

DEDICATORIA

A Dios por estar siempre presente en mi vida,
protegiéndome y guiándome en toda la etapa
de mi formación profesional.

A mis padres Roberto Moreno Intusca y
Luzmila Maruja Peceros Astoquillca por su
apoyo incondicional para seguir adelante y
de la misma manera a mis hermanos:
Roberth, Jhon, Brandy, Cinthia y Alberth.

A mis docentes y amigos, que gracias a su
constante y su apoyo incondicional han hecho
posible alcanzar mi meta.

Soledad G.

EPÍGRAFE

*El genio se hace con un 1%
de talento, y un 99% de
trabajo.*

Albert Einstein

AGRADECIMIENTO

En primer lugar a Dios quien me dio la sabiduría, la fuerza y perseverancia para culminar una etapa más en mi vida, el cual es mi fortaleza espiritual.

A la Universidad Nacional José María Arguedas - Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial (EPIA), por haberme acogido en sus aulas durante los años de estudio, así mismo por haberme facultado tener acceso a los diferentes laboratorios y equipos para realizar el presente trabajo de investigación.

A mis padres y hermanos por su apoyo incondicional para lograr mí objetivo.

A mi asesor de tesis, Ing. MSc. Fidelia Tapia Tadeo y Co asesor el Ing. MSc. David Choque Quispe a ambos por su permanente apoyo, orientación y acertadas sugerencias durante la realización de este trabajo de tesis y como también a la Blga. María del Carmen Delgado Laime por su apoyo desinteresada.

A los integrantes del jurado evaluador al Ing. Mg. Denis Gutiérrez Martínez, Ing. Mg. Abel Manuel Serna Herrera y al Ing. MSc. Carlos Alberto Ligarda Samanez, por su aporte al desarrollo del presente trabajo de investigación.

A todos mis catedráticos, amigos y compañeros de pregrado, por brindarme sus enseñanzas y ofrecerme su amistad a lo largo del tiempo que estuvimos albergados en las aulas de la UNAJMA, mi alma mater.

A todas aquellas personas que de una u otra forma, colaboraron o participaron en la realización de esta investigación mi más sincero agradecimiento a todos.

ÍNDICE GENERAL

	Pag.
DEDICATORIA.....	v
EPÍGRAFE	vi
AGRADECIMIENTO	vii
INDICE DE TABLAS	xi
INDICE DE FIGURAS.....	xii
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 2. REVISION DE LITERATURA.....	3
2.1. Antecedentes	3
2.2. Pachataya – Pampa Taya.....	6
2.3. Secado	6
2.3.1. Características del Secado	7
2.3.2. Velocidad de Secado	8
2.3.3. Formas de Trasferencia de Calor.....	12
2.3.4. Métodos de Secado.....	13
2.3.5. Mecanismo de Secado	14
2.3.6. Factores que Regulan el Secado.....	15
2.3.7. Definiciones de Términos Asociados al Secado.....	15

2.3.8.	Curvas de Velocidad de Secado	17
2.4.	Modelos Cinéticos en Deshidratación de Secado de Alimentos.....	20
2.5.	Teoría de la Difusión	21
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y METODOLOGÍA		25
3.1.	Lugar de Ejecución.....	25
3.1.1.	Localidad e Institución donde se desarrolla el Proyecto	25
3.2.	Material de Estudio.....	25
3.2.1.	Universo y/o Población	25
3.2.2.	Muestra.....	26
3.2.3.	Unidad de Análisis.....	26
3.3.	Equipos, Materiales y Reactivos e Insumos de Laboratorio	26
3.3.1.	Equipos e Instrumentos	26
3.3.2.	Materiales	27
3.3.3.	Material Vegetal	27
3.4.	Metodología.....	27
3.4.1.	Metodología para la determinación de las Curvas de Secado	27
3.4.2.	Modelado de las Curvas de Secado de Pachataya – Pampa Taya.....	30
3.4.3.	Metodología para la determinación de las Curvas de Velocidad de Secado	30
3.4.4.	Metodología para la determinación del Coeficiente de Difusividad Efectiva	31
3.4.5.	Metodología para la determinación de la Energía de Activación.....	32

3.4.6. Metodología para describir la Clasificación Taxonómica	32
3.4.7. Metodología del Análisis Estadístico	32
4.1. Curvas de Secado de las Hojas de Pachataya – Pampa Taya	34
4.2. Modelado de la Curva de Secado de Pachataya – Pampa Taya	36
4.3. Evaluación de las Curvas de Velocidad de Secado.....	41
4.4. Determinación del Coeficiente de Difusividad Efectiva - <i>Def</i>	43
4.5. Determinación de la Energía de Activación - <i>Ea</i>	45
4.6. Metodología para describir la Clasificación Taxonómica	46
CONCLUSIONES	47
RECOMENDACIONES	48
SUGERENCIAS	49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
ANEXO	54

INDICE DE TABLAS

Tabla 01. Descripción de equipos e instrumentos.....	26
Tabla 02. Descripción de materiales	27
Tabla 03. Material vegetal.....	27
Tabla 04. Modelos matemáticos para curva de secado de pachataya – pampa taya	30
Tabla 05. Arreglo experimental para el secado.....	33
Tabla 06. Modelos matemáticos para curva de secado de pampataya	34
Tabla 07. ANOVA de la humedad final o de equilibrio	34
Tabla 08. Parámetros y estadígrafos para los modelos cinéticos de secado a 40°C	37
Tabla 09. Parámetros y estadígrafos para los modelos cinéticos de secado a 50°C	38
Tabla 10. Parámetros y estadígrafos para los modelos cinéticos de secado a 60°C	39
Tabla 11. Valores del Coeficiente de difusividad efectiva del agua	43

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curvas de secado, (<i>Fito et al.</i> , 2001)	9
Figura 2. Velocidad de Secado, (<i>Fito et al.</i> , 2001)	9
Figura 3. Representación conceptual de los mecanismos de transferencia de calor: A. Convección; B. Conducción; C. Radiación, (<i>Mujumdar</i> , 2006).....	13
Figura 4. Curva de secado, (<i>Geankoplis</i> , 1998).....	18
Figura 5. Curva de velocidad de secado, (<i>Geankoplis</i> , 1998)	19
Figura 6. Difusión de agua en el secado, (<i>Ibarz</i> , 2005).....	21
Figura 7. Representación de regiones, (<i>Ibarz</i> , 2005)	22
Figura 8. Esquema de operación de secado.....	29
Figura 9. Curvas de secado en función del tiempo	35
Figura 10. Modelado de las curvas de secado a 40°C	38
Figura 11. Modelado de las curvas de secado a 50°C	39
Figura 12. Modelado de las curvas de secado a 60°C	40
Figura 13. Modelado de las curvas de secado a través del modelo Page.....	40
Figura 14. Curvas de velocidad de secado	40
Figura 15. Logaritmo de la razón de humedad con el tiempo de secado.	43
Figura 16. Relacion de coeficiente de difusion efectiva vs temperatura absoluta.	45

ABREVIATURAS

hbs	: Humedad en base seca
m_{ss}	: Masa del solido seco
m_{agua}	: Masa del agua
hbh	: Humedad en base húmeda
X^*	: Humedad de equilibrio
X	: Humedad libre
W	: Velocidad de secado
ΔX	: Variación de humedad libre
A	: Área de materia a secar
Δt	: Variación de tiempo
X_c	: Humedad critica
X_1	: Humedad inicial
X_2	: Humedad final
t_{total}	: Tiempo total
RX	: Relación humedad
X_i	: Contenido de agua en un tiempo dado
T	: Tiempo de secado
L	: Espesor de la capa de sólido
D_{def}	: Difusividad efectiva
E_a	: Energía de activación
D_0	: Factor de Arrhenius
R	: Constante universal de los gases
T	: Temperatura absoluta
DCA	: Diseño Completamente al Asar
$a, b, c, k_0, k_1, \gamma$: Constante cinéticas de los modelos matemático
a_w	: Actividad de agua
X_m, C, K	: Constantes del modelo GAB
X_{exp}	: Contenido de humedad experimental
X_{mod}	: Contenido de humedad modelado
$\%E$: Porcentaje de error relativo
r^2	: Coeficiente de determinación
m	: Pendiente de la ecuación linealizada
D_o	: Coeficiente de difusividad
H_0	: Hipótesis nula

H_A	:	Hipótesis alterna
N	:	Número de observaciones
R	:	Constante universal de los gases
D_0	:	Factor de Arrhenius
W	:	Peso sólido húmedo
X_t	:	Humedad total
W	:	Velocidad secado
X_i	:	Contenido de agua en un tiempo dado
CIE	:	Comision Internacional de Eluminacion
A.O.A.C	:	Official Methods of Analysis

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto de la temperatura de secado en las hojas de pachataya – pampa taya, en un secador de convección forzada con velocidad de aire constante de 1 m/s, asimismo se evaluó las curvas de secado, curvas de velocidad de secado, coeficiente de difusividad y energía de activación; se aplicó un diseño experimental completamente al azar, cuyo factor es la temperatura de secado con 3 niveles: 40, 50 y 60 °C. Las curvas de secado se ajustaron a 6 modelos matemáticos, de ellos el modelo Page se ajustó adecuadamente con valores de $%E < 10$ y $R^2 > 0.98$; las curvas de velocidad muestran que existe mayor velocidad de eliminación de agua a temperaturas mayores, y que para humedades menores de 0.5 g de agua/g s.s. la velocidad es similar en todos los casos; por otro lado la difusividad efectiva del agua durante el secado de las hojas de pachataya – pampa taya, se incrementa de $6.47E-12$ a $2.39E-11 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ en el intervalo de 40 a 60°C, lo que indica que la temperatura tiene efecto significativo, finalmente la energía de activación para el secado de las hojas de pachataya – pampa taya en el intervalo de 40 a 60°C, fue de 56.56 kJ/mol de agua.

Palabras claves: secado, difusividad, energía de activación, pachataya – pampa taya.

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the effect of the drying temperature on pachataya – pampa taya leaves in a forced convection dryer with constant air velocity of $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, as well as drying curves Of drying rate, diffusivity coefficient and activation energy. A completely random experimental design was applied, whose factor is the drying temperature with 3 levels: 40, 50 and 60°C . The drying curves were adjusted to 6 mathematical models, of which the Page model was adequately adjusted with values of $\% E < 10$ and $R^2 > 0.98$; the speed curves show that there is a higher rate of water removal at higher temperatures and that for humidities less than $0.5 \text{ g water/g s.s.}$ the speed is similar in all cases; on the other hand the effective diffusivity of the water during the drying of the leaves of pachataya – pampa taya, increases from $6.47\text{E-}12$ to $2.39\text{E-}11 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ in the range of 40 to 60°C , Indicating that the temperature has a significant effect, finally the activation energy for the drying of pachataya – pampa taya leaves in the range of 40 to 60°C , was $56.56 \text{ kJ / mole of water}$.

Keywords: drying, diffusivity, activation energy, pachataya – pampa taya.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Nuestra Región cuenta con una diversidad de especies vegetales, nativas silvestres y domesticada algunas de las cuales son utilizadas por nuestros pobladores para diversos fines, las plantas medicinales después de la recolección sufren el proceso de degradación debido al incremento de la actividad enzimática y esto a la vez conlleva a la descomposición de algunos componentes bioactivos.

La pachataya - pampa taya es una planta aromática utilizada generalmente con fines medicinales por la medicina tradicional, se utiliza por sus efectos antiespasmódico (calma los trastornos estomacales), analgésico (disminuye el dolor), carminativo (previene y favorece la expulsión de gases) y por lo general se utilizan toda la planta (Muñoz, 2002).

Las hojas de pachataya – pampa taya después de la recolección son muy propensos a la pérdida de pigmentación, lo que provoca una disminución en la calidad del mismo, por consiguiente, periodos cortos de almacenamiento bajo condiciones inadecuadas, pueden conducir a su rápido deterioro antes que estos alcancen las redes de conservación y distribución.

El secado es un método de conservación basados en la disminución de la actividad acuosa de los alimentos para prolongar el periodo de vida útil de estos (Hermida, 2000) se utiliza para reducir el agua residual hasta un valor aceptable. En la actualidad, el método empleado para preservar plantas aromáticas, es en forma artesanal, utilizando la energía solar, logrando en muchas ocasiones un grado insuficiente de seguridad para su conservación, sin embargo cuando el secado es realizado a gran escala, se emplean métodos artificiales más eficientes que garanticen su calidad, entre ellos se encuentra el secado con aire caliente, ya que las plantas aromáticas tienen componentes bioactivos beneficiosos para la salud, una inadecuada manipulación en el secado puede degradar algunos componentes.

La operación de secado en general está controlada por dos fenómenos de resistencias, tanto la de transferencia de calor como la de materia (Vega, 2007). Este proceso simultáneo de transferencia de masa y energía, en el cual se emplea calor para evaporar la humedad, la cual a su vez se remueve de la superficie del

sólido, por medio de un agente externo (aire). La velocidad de secado es influenciado por la temperatura, humedad de entrada, velocidad del aire, etc. Estas variables permiten realizar un diseño o una selección más eficiente de secaderos (Vizcarra, 1998).

En tal sentido para poder analizar el efecto de la temperatura de secado se planteó el siguiente problema ¿En qué medida influye el efecto de la temperatura de secado en las hojas de pachataya – pampa taya?. Y el Objetivo es la “EVALUACION DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA DE SECADO EN LAS HOJAS DEL PACHATAYA – PAMPA TAYA”, de estas se deduce evaluar las curvas de cinética de secado que nos dan idea del tiempo necesario de secado, del mecanismo de transferencia de agua, de las condiciones predominantes en la transferencia de calor y masa. También se determinó el coeficiente de difusividad para una lámina infinita, ésta puede ser cuantificada por la integración de la Ley de Fick, pero cuando la experiencia se realiza para materiales biológicos heterogéneos, como la pachataya – pampa taya, la situación se hace más compleja, sin embargo, pueden ser estudiados mediante esta teoría compensando la heterogeneidad de las hojas de pachataya – pampa taya; con los datos de difusividad se determinó la energía de activación que expresa la dependencia de la difusividad en función de la temperatura, fue calculada por la ecuación de Arrhenius.

Con esta investigación se pretende establecer procesos adecuados de secado de las hojas de pachataya – pampa taya a temperaturas de 40, 50 y 60 °C. el secado por aire caliente permite obtener alimentos estables, desde el punto de vista microbiológico, presenta ventajas como la reducción de los costes de almacenamiento y transporte.

Los resultados de esta investigación constituyen un aporte técnico y científico para las futuras investigaciones en el campo agroindustrial de las hierbas aromáticas ya que servirá para plantear propuestas productivas encaminadas a impulsar procesos agroindustriales de este tipo de plantas aromáticas y medicinales además servirá para dar un valor agregado a la hierba silvestre.

CAPITULO 2. REVISION DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

Jeria y Pozo (2011), en su investigación, estudio del secado convectivo de hojas de Stevia Rebaudiana, desarrollado en la Facultad de Ciencias Físicas, Químicas y Farmacéuticas de la Universidad de Chile; realizó el secado convectivo de las hojas de Stevia hasta una humedad de 10%, mediante aire por convección forzada. El secado a 70°C tuvo una duración de 85 minutos, a 60°C fueron 95 minutos y a 50°C fueron 150 minutos. El modelo exponencial fue el que mejor se ajustó a los datos de secado a 50°C y a 70°C con R² de 0,997 y 0,990 respectivamente, mientras que para el secado a 60°C el modelo que mejor se ajustó fue el cúbico con un r² de 0,991; asimismo encontró valores de difusividad de 2.240E-10, 3.805E-10 y 4.131E-10 a 50, 60 y 70 °C y una energía de activación de 28.4 kJ mol⁻¹, menciona que al incrementar la temperatura el tiempo de secado disminuye considerablemente.

Aspurz, (2011) desarrollaron la investigación Cinética del secado de tomillo (*Thymus vulgaris*), en el departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad Federal de Viçosa. Brasil. Los objetivos del trabajo fueran estudiar la cinética del secado de tomillo con posterior ajuste de diferentes modelos matemáticos a los datos experimentales determinar los valores de la difusividad efectiva y energía de activación. Para el desarrollo del experimento de secado fueran utilizadas las temperaturas 30, 40, 50, 60 y 70 °C. El diseño experimental fue de bloques completamente aleatorizados, con tres repeticiones. Para el ajuste de los modelos matemáticos a los datos experimentales fue realizado el análisis de regresión no lineal, por el método Simplex-Quasi-Newton. Los resultados mostraron que el modelo de Page obtuvo un mejor ajuste a los datos experimentales, los valores de los coeficientes de difusividad efectiva variaron entre 3,69E-12 e 1,19E-10 m².s⁻¹ y el valor de la energía de activación fue de 77,16 kJ.mol⁻¹, asimismo observo que las curvas de velocidad de secado son dependiente de la temperatura de secado.

Lema *et al.* (2007) realizaron la investigación titulada características del proceso de secado en capa delgada del perejil (*Petroselinum crispum*), el cual se desarrolló en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina. El objetivo de este trabajo fue estudiar la cinética de secado en

capa delgada para hojas y tallos de perejil bajo diferentes condiciones de temperatura del aire de secado (35°C, 45°C, 55°C y 65°C) y a una velocidad fija de $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \pm 0.1$. Se realizaron experiencias en un equipo de secado de laboratorio diseñado y construido para tal fin. Se testearon doce modelos matemáticos teóricos empíricos para ajustar los datos experimentales. Un análisis de regresión no lineal fue usado para determinar las constantes de los modelos evaluados. Si bien a cada temperatura existió un modelo diferente que optimizaba el ajuste, el modelo de Midilli – Kucuk, describió más adecuadamente la cinética de secado en el rango de temperaturas estudiado. Sobre la base de estas experiencias, se evaluaron modelos de solución para la ley de Fick, determinándose una relación para la difusividad efectiva. La difusividad efectiva mostró una dependencia tipo Arrhenius con la temperatura, permitiendo de este modo obtener un valor aceptable para la energía de activación.

Garcia *et al.*, (2007). Estudiaron la cinética de secado de ciertas hortalizas y aromáticas cultivadas en Misiones - Argentina. Se determinaron las isotermas de adsorción y la cinética de secado de las hortalizas: cebollita de verdeo (***Allium cepa* L.**), puerro (***Allium porrum* L.**) y pimiento verde (***Capsicum annuum* L.**), y las plantas aromáticas: orégano (***Origanum mejorana* L.**) y perejil (***Petroselinum sativus* Hoffm.**). Para determinar la cinética de secado, se utilizó una capa delgada de material que fue secada en un secadero de flujo transversal a 60°C. Los datos de la cinética de secado se ajustaron a 10 modelos matemáticos y se calcularon dos tipos de errores, los denominados X^2 y raíz cuadrada del error cuadrático medio, seleccionándose los modelos que presentaban menores errores. El modelo denominado «una aproximación a la difusión» presentó mejor ajuste para la cebollita de verdeo, el puerro, y el pimiento verde; y el modelo de Midilli para el orégano y el perejil. Los tiempos de secado para los materiales estudiados variaron entre 82 y 250 minutos.

Pineda *et al.*, (2009). En la investigación titulada, Efecto de las condiciones de secado sobre la cinética de deshidratación de las hojas de morera (***Morus alba***). Se obtuvieron gráficos de velocidad de secado en función del tiempo y la humedad. Las cinéticas de deshidratación presentaron la curva típica del modelo de Newton, con altos coeficientes de correlación. Existió un efecto triple significativo ($p < 0,05$) entre la temperatura, la velocidad y la humedad del aire sobre el tiempo de secado del sustrato; la variable más influyente fue la

temperatura, seguida de la velocidad y por último la humedad del aire. El aumento de cualquiera de estas variables implicó una disminución del tiempo de secado. El efecto de la temperatura sobre éste fue más pronunciado a una velocidad del aire de 1 m.s⁻¹.

Espierriz (2011), en el trabajo de investigación curvas de secado de hierba limón (*Cymbopogon citratus*) a las temperaturas de 60, 70, 80, 90 y 100 °C, desarrollada en la Universidad Federal de Viçosa, a través de secador de flujo ascendente, obtuvo resultados de coeficiente de difusividad efectiva en un rango de 2.01E-11 a 3.93E-11 m².s⁻¹ y un energía de activación de 10.87 kJ.mol⁻¹, menciona que la difusividad es directamente proporcional a la temperatura.

García (2014), en su trabajo de investigación, evaluación de los efectos del proceso de secado sobre la calidad de la Stevia (*Stevia rebaudiana Bertoni*) y la Hierbabuena (*Mentha spicata*). La investigación se enfocó en el efecto de cuatro temperaturas de secado 40, 50, 60 y 70 °C para la *Stevia rebaudiana* y 30, 40, 50 y 60 °C para la *Mentha spicata* sobre la influencia en la calidad. Se efectuó el ajuste a modelos matemáticos encontrando que el modelo logarítmico presento el mejor ajuste a la mayoría de los datos experimentales en la *Stevia rebaudiana* y la *Mentha spicata*.

Barbosa *et al.* (2007) en la investigación titulada, evaluación de modelos matemáticos para la predicción de capa fina secado de hojas de verbena brasileña aroma limón (*Lippia Alba*), considero que los mejores modelos que describe la cinética de secado de verbena brasileña fue Midilli y Page. Los coeficientes de difusividad efectiva calculada variaron de 2.91E-12 a 11,71E-12 m².s⁻¹ para el rango de temperaturas estudiado y la energía de activación para la difusión de agua fue 31.79 kJ.mol⁻¹.

Da Rocha *et al.*, (2012). En la investigación Cinética del secado de tomillo, tuvieron como objetivos del trabajo estudiar la cinética del secado de tomillo con posterior ajuste de diferentes modelos matemáticos a los datos experimentales determinar los valores de la difusividad efectiva y energía de activación. Para el desarrollo del experimento de secado fueran utilizadas las temperaturas 30, 40, 50, 60 y 70 °C. El diseño experimental fue de bloques completamente aleatorizados, con tres repeticiones. Para el ajuste de los modelos matemáticos a los datos experimentales fue realizado el análisis de regresión no lineal, por el

método Simplex-Quasi-Newton. Los resultados mostraron que el modelo de Page obtuvo un mejor ajuste a los datos experimentales, los valores de los coeficientes de difusividad efectiva variaron entre $3,69 \text{ E-}12$ a $1,19 \text{ E-}10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ y el valor de la energía de activación fue de $77,16 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$.

2.2. Pachataya – Pampa Taya

a) Características Generales

Subarbusto perenne, crece por encima de los 2900 msnm y hasta los 3050 msnm; llega a medir de 1 a 6 m de altura. Tiene el tallo cilíndrico de crecimiento secundario subfrutescente (semileñoso), internamente contiene de resina, sus ramas son ascendentes y cuanto más desarrolladas son postradas. De hojas caulinares, forma romboidal, con borde aserrado-dentado, de posición alternada en el tallo. Sus flores blancas unisexuales se distribuyen en inflorescencia tipo panículas, cubiertas por brácteas de color verde, presenta una raíz pivotante subfrutescente subterránea, fruto en baya. (Germplasm Resources Information Network, 2007).

b) Principales usos y propiedades de la pachataya - pampa taya

El pachataya – pampa taya es una planta aromática utilizada generalmente con fines medicinales por la medicina tradicional, se utiliza por sus efectos antiespasmódico (calma los trastornos estomacales), arminativo (previene y favorece la expulsión de gases)

2.3. Secado

El secado es el proceso de la remoción de cantidad de agua relativamente pequeña de cierto material, ya que la evaporación se refiere a la eliminación de cantidades grandes de agua, además allí el agua se elimina en forma de vapor, en el secado el agua casi siempre se elimina en forma de vapor con aire (Geankoplis, 1998)

En el secado se elimina la humedad de un producto alimentario para reforzar su estabilidad, transportabilidad, sabor y textura en los alimentos (Lomas, 1998).

2.3.1. Características del Secado

- **Humedad inicial.**

Es el contenido de humedad del producto, es decir la cantidad de agua evaporable existente en un producto, se expresa con relación a su masa total o a su masa seca (esto es la masa que se obtiene descontando la masa de agua evaporable que contiene). En los cálculos de secado se emplean una como otra definición para expresar el contenido de humedad.

- **Humedad de equilibrio.**

En la desecación de sólidos es importante distinguir los materiales higroscópicos de los no higroscópicos. Un material higroscópico absorbe y retiene un porcentaje concreto de humedad en determinadas condiciones de humedad del aire. La humedad así retenida se llama contenido de humedad de equilibrio, porque se encuentra en estado de equilibrio con el vapor de agua del aire que lo rodea. El contenido de humedad de equilibrio de un sólido tiene una importancia especial en la desecación, porque representa un contenido de humedad límite para condiciones dadas de humedad y temperatura del aire.

- **Humedad libre**

La humedad libre de un sólido, con respecto al aire en condiciones determinadas es la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad de equilibrio con el aire en las condiciones dadas. Es decir es la humedad que puede perder el sólido después de un contacto suficientemente prolongado con aire en condiciones dadas y constantes, y depende tanto de la humedad del sólido como de la humedad relativa del aire.

- **Humedad crítica**

Es cuando el contenido de humedad de una sustancia está en equilibrio con la presión de vapor dada de vapor. Es el contenido de humedad que tiene el producto a secarse en el momento en que hay una transición en la velocidad de secado, es decir del momento de secado a velocidad constante pasa a velocidad decreciente. El punto en el cual termina la intensidad constante y empieza a disminuir la intensidad de la desecación se llama contenido crítico de humedad.

2.3.2. Velocidad de Secado

Se define como el parámetro que relaciona la cantidad de agua que se elimina durante un tiempo determinado en un área de secado definida.

Cuando se secan los alimentos, pierden agua a velocidad constante hasta que están completamente secos.

Por el contrario, a medida que prosigue el contenido de humedad por exposición de una muestra húmeda a una corriente de aire. La muestra usualmente es suspendida en un gabinete o ducto. Para secar la muestra se utiliza una corriente de aire a temperatura, humedad, velocidad y dirección de flujo constante que cruza a través de la misma.

Fito et al. (2001), durante el periodo de velocidad de secado, la velocidad de remoción de humedad del producto es limitado solo por la velocidad de evaporación del agua superficial sobre o dentro del producto. Este periodo continuará mientras la migración de humedad hacia la superficie en la que ocurre la evaporación sea más rápida que la evaporación que se lleva a cabo en la misma superficie. La velocidad a la cual ocurre la evaporación del agua de la superficie depende de dos factores como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{hA(T_a - T_w)}{L} = k_m A (H_w - H_A) \dots \dots \dots (01)$$

Dónde:

h: es el coeficiente de transferencia de calor que describe las condiciones existentes en la superficie.

k_m : es el coeficiente de transferencia de masa que describe la transferencia de humedad.

T_a: es la temperatura del bulbo seco.

T_w: es la temperatura del bulbo húmedo.

H_w: es la humedad absoluta en condiciones de bulbo húmedo.

En este periodo siempre existe humedad en la superficie del material que se está secando. El agua que se encuentra dentro del material migra a la superficie a una velocidad mayor que a la velocidad a la cual deja la superficie.

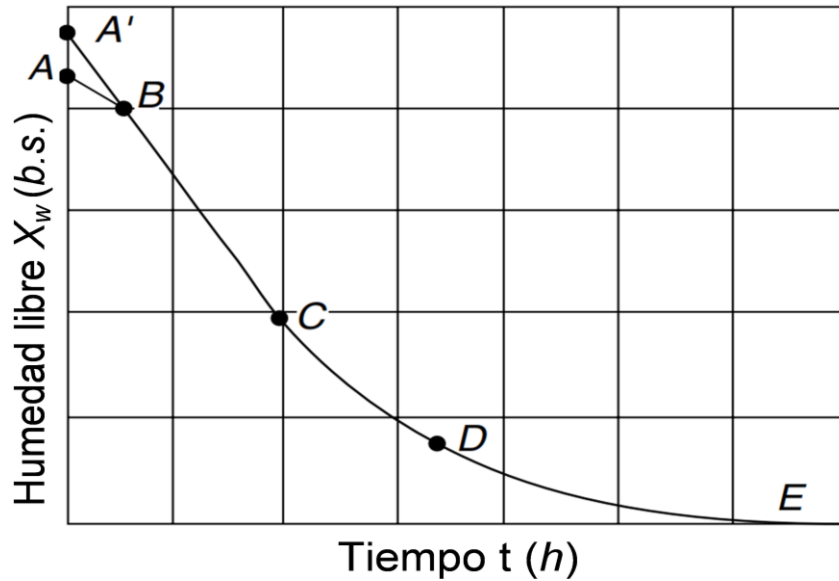


Figura 1. Curvas de secado, (Fito et al., 2001)

En la figura (1), esta curva representa el caso general de una muestra sometida a una prueba de secado. La humedad disminuye continuamente desde el valor inicial (A) y finalmente se aproxima como límite a la humedad de equilibrio (X^*) con las condiciones existentes del aire. Cuando la pendiente de la curva cambia (C), se denomina punto crítico (X_c, θ_c).

Esto indica que la velocidad de secado está sujeta a la variación del contenido de humedad en función del tiempo. Esta variación se ilustra claramente en la Figura (2), donde se realiza una representación gráfica de la velocidad de secado ($dx/d\theta$) en función de la humedad (X_s).

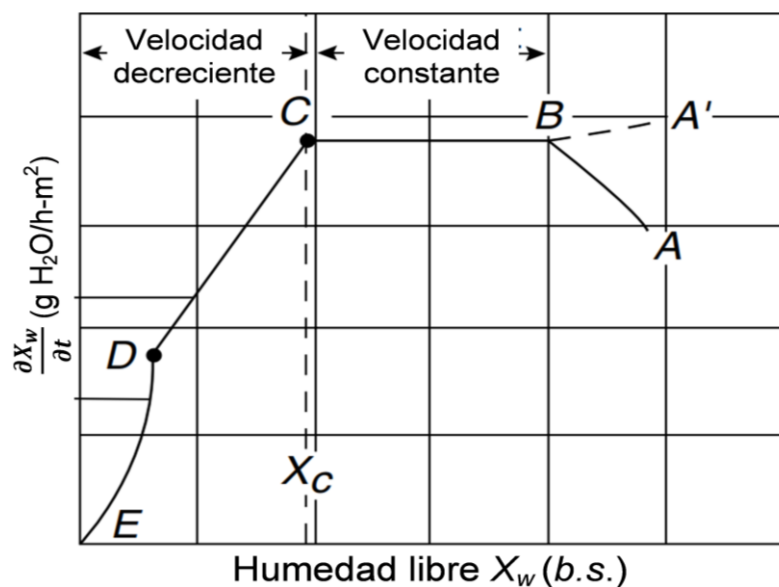


Figura 2. Velocidad de Secado, (Fito et al., 2001)

Según Geankoplis (1998), el secado de diversos sólidos bajo diferentes condiciones constantes de secado casi siempre produce curvas de formas variables en el período de velocidad decreciente, pero en general siempre están presentes las dos zonas principales de la curva de la velocidad de secado, el período de velocidad constante y el período de velocidad decreciente.

Se debe tener en cuenta que este perfil aplica en muchas sustancias farmacéuticas, pero existen excepciones donde puede haber variaciones entre uno o varios de los períodos de secado dependiendo del número de mecanismos involucrados en el secado.

a) Período de inducción inicial

Cuando un sólido se coloca en una estufa de secado, comienza a absorber calor e incrementa su temperatura hasta la fijada para el secado. A medida que la temperatura aumenta, la humedad se evapora y se empieza a enfriar el sólido. Posteriormente la velocidad de enfriamiento y calentamiento se igualan y la temperatura se estabiliza, la T_{bh} del aire secante será igual a la temperatura alcanzada (Geankoplis, 1998).

b) Período de velocidad constante

En el punto B la temperatura se estabilizará y permanecerá constante siempre y cuando haya una capa de humedad remanente en la superficie del sólido. Entre los puntos B y C la humedad del producto es alta, el sólido húmedo se encuentra sumergido en una película de agua, correspondiente a la humedad no ligada. La humedad de evaporación de la superficie se reemplaza por el agua de difusión del interior del sólido a una velocidad igual a la de evaporación, aquí la velocidad de secado/unidad de superficie es constante. El valor de la humedad crítica (X_c), depende de las condiciones del aire secado y del espesor del material a secarse (Geankoplis, 1998).

c) Período de decaimiento de velocidad

En el punto C, el agua de la superficie no se reemplazará más para mantener la capa. Pequeñas manchas empiezan a aparecer y la velocidad del secado comienza a decaer. A esto se le llama contenido de humedad crítica (X_c). Entre los puntos C y D el contenido y número de manchas del secado crece y cae

la velocidad de secado. El período de tiempo CD se conoce como primer período de caída de velocidad o período de secado de superficie insaturado (Geankoplis, 1998).

d) Contenido de humedad crítica

En el punto D conocido como segundo punto crítico, es el punto donde finaliza el período de velocidad constante. Aquí, el agua de superficie del sólido está totalmente evaporada y la velocidad de secado dependerá de la difusión de humedad a la superficie del sólido. Por lo anterior, este punto depende de la porosidad y del tamaño de partícula del sólido que se está secando. Entre los puntos D y E la velocidad de secado cae rápidamente y el período se denomina segundo período de disminución de velocidad (Geankoplis, 1998).

En el punto E la velocidad del secado es cero y comienza la humedad de equilibrio poniéndose el sólido en equilibrio con su ambiente externo (la temperatura y % de humedad es constante).

- **Periodo de secado a velocidad decreciente**

Fito et al., (2001), en este periodo comienza cuando el agua que está en el interior migra a la superficie a menor velocidad que se seca la superficie. Es en este punto cuando las propiedades del material que estamos secando empiezan a influir en la velocidad de secado.

Este periodo ocurre después del periodo constante, como su nombre lo indica la velocidad de secado R decrece con el contenido de humedad, a valores críticos de humedad.

El movimiento del agua en el sólido es explicado por diferentes mecanismos. Indica que la difusión del líquido es debido a un gradiente de concentración, la difusión en vapor de agua es debido a la presión parcial de vapor, el moviendo del líquido es debido a fuerza capilares, el moviendo del líquido es debido a la fuerza de la gravedad y la difusión en la superficie, el moviendo del agua dentro del alimento depende de su porosidad, así mismo depende de las interacciones del agua con la matriz del alimento.

2.3.3. Formas de Trasterencia de Calor

La transferencia de energía puede ocurrir por convección, conducción o radiación, o en algunos casos por una combinación de ellos (Mujumdar, 2006). A continuación se explica brevemente cada mecanismo:

- **Convección**

El calor se transfiere al sólido que se está secando mediante una corriente de aire caliente (u otro fluido) que además de transmitir el calor necesario para la evaporación del agua es también el agente transportador del vapor de agua que se elimina del sólido (Fito *et al.*, 2001) (Figura 04).

- **Conducción**

El calor de evaporación se proporciona a través de superficies calentadas (en reposo o en movimiento) colocadas directamente con el material a secar. El calentamiento de estas superficies se realiza normalmente mediante vapor. El agua evaporada se elimina mediante una operación de vacío o a través de una corriente de gas cuya función principal es la de eliminar agua (Fito *et al.*, 2001) (Figura 04).

- **Radiación**

Es la denominación que se da a la transmisión de la energía a través del espacio por medio de ondas electromagnéticas. Se basa en la transferencia de energía radiante para evaporar la humedad del producto. La energía es absorbida selectivamente por las moléculas de agua, por ende mientras el producto se seca, requiere menos energía. Incluye varias fuentes de radiación electromagnética con longitudes de onda desde el espectro solar hasta microondas (0,2 m –0,2 mm). Dentro de esta categoría se incluye el infrarrojo (Mujumdar, 2006). (Figura 03).

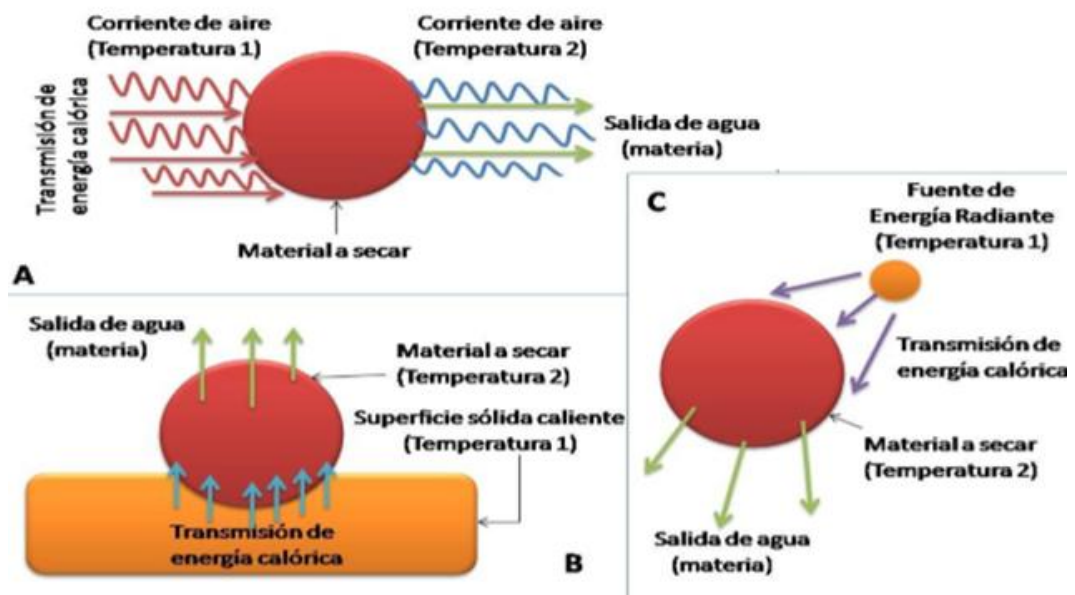


Figura 3. Representación conceptual de los mecanismos de transferencia de calor: A. Convección; B. Conducción; C. Radiación, (Mujumdar, 2006)

2.3.4. Métodos de Secado

Los métodos de secado son los más comunes para valorar el contenido de humedad en los alimentos; se calcula el porcentaje en agua por la pérdida en peso debida a su eliminación por calentamiento bajo condiciones normalizadas. Existen diversos métodos para el secado, sea en forma natural o mecánica (Muñoz, 1996).

- **Secado Natural.**

Si se cuenta con condiciones climáticas adecuadas, baja humedad relativa y temperaturas elevadas, el secado natural requiere poco gasto y es sencillo de realizar. El producto se extiende en capas delgadas sobre bandejas que se exponen al aire libre durante algunos días, teniendo la precaución de removerlos frecuentemente y de cubrirlos o guardarlos bajo techo durante la noche para evitar que el rocío ennegrezca el producto (Fito *et al.*, 2001).

- **Secado Mecánico.**

En el secado artificial o mecánico, al controlarse las variables del tratamiento, en el lapso de unas horas, es posible obtener un producto homogéneo y de excelente calidad comercial. Hay diversos métodos para deshidratar, que pueden clasificarse, de la siguiente manera:

- ✓ Secado por aire caliente.
- ✓ Secado por contacto directo con una superficie caliente.
- ✓ Secado por aporte de energía de una fuente radiante de microondas.
- ✓ Liofilización.

2.3.5. Mecanismo de Secado

En los estudios más teóricos se pone énfasis en los mecanismos de transferencia de energía y de materia, por lo tanto en un proceso de secado hay intercambio simultáneo de calor y masa, entre el aire del ambiente caliente y el sólido a secar. El secado es una operación de transferencia de masa de contacto gas-sólido, donde la humedad contenida en el sólido se transfiere por evaporación hacia la fase gaseosa, con base a la diferencia entre la presión de vapor ejercida por el sólido húmedo y la presión parcial de vapor de la fase gaseosa. En consecuencia, en este fenómeno complejo que involucra la transferencia de materia y calor cuando un sólido húmedo es sometido a un secado térmico ocurren dos procesos simultáneamente (Fito *et al.*, 2001):

- **Condiciones externas.**

Durante la transferencia de calor se pretende eliminar el agua en forma de vapor de la superficie de la partícula, algunas condiciones juegan un papel importante como son: la temperatura, flujo del aire y humedad, área de superficie expuesta al calor y presión. Puesto que estas condiciones durante la etapa inicial del secado son importantes para remover la humedad de la superficie. En algunos materiales el exceso de evaporación en la superficie puede causar encogimiento, esto después de que la humedad inicial ha sido removida dando lugar a altos porcentajes de humedad del interior hacia la superficie, formando tensiones dentro del material ocasionando deformaciones (Frazier, 2003).

- **Condiciones internas.**

Los factores que pueden determinar la rapidez de secado son: la temperatura, su contenido de humedad y la naturaleza física dentro de la partícula. Durante la transferencia de calor hacia un material húmedo, en lo cual el gradiente de temperatura se genera dentro del material mientras la evaporación de la humedad ocurre dentro de la superficie. La evaporación hace que la humedad del

material vaya desde el interior hacia la superficie, lo cual sucede a través de mecanismos como son: difusión, flujo capilar, presión interna causada por el encogimiento durante el secado. En el proceso de secado cualquiera de los dos subprocesos descritos puede ser el factor limitante que gobierne la velocidad de secado, a pesar de que ambos subprocesos ocurren simultáneamente durante este ciclo (Frazier, 2003).

2.3.6. Factores que Regulan el Secado

Los factores más importantes en el secado son: Temperatura, humedad relativa del aire y velocidad del aire. El control inadecuado de estos factores determina la aparición de endurecimiento externo debido a la rapidez de evaporación de la humedad superficial, dando por resultado una película superficial dura, de aspecto queratinoso e impermeable que impide que el alimento se siga secando (Frazier, 2003).

2.3.7. Definiciones de Términos Asociados al Secado

a. Contenido de Humedad.

El contenido de humedad de un material suele expresarse como porcentaje del peso del material seco. Si un material se expone al aire a una temperatura y humedad dadas, dicho material perderá o ganará agua hasta que se establezcan unas condiciones de equilibrio (Frazier, 2003).

b. Contenido de humedad, base seca (hbs).

Es la que expresa la humedad de un material como porcentaje del peso del sólido seco. Se define como:

$$hbs = \frac{m_{agua}}{m_{ss}} \quad (\text{Ec.02})$$

Dónde:

m_{ss} = solido seco y m_{agua} = masa del agua.

c. Contenido de humedad, base húmeda (hbh).

Es la que expresa la humedad de un material como porcentaje del peso del sólido mojado.

$$hbh = \frac{m_{agua}}{m_{agua} + m_{ss}} \quad (\text{Ec. 03})$$

Dónde:

m_{ss} = sólido seco y m_{agua} = masa del agua

Relacionando humedad en base húmeda y en base seca se obtiene

$$hbh = \frac{hbs}{1+hbs} \quad (\text{Ec. 04})$$

$$hbs = \frac{hbh}{1-hbh} \quad (\text{Ec. 05})$$

Resulta ser muy útil expresar el contenido de humedad en base seca, debido a que el denominador de su ecuación es un valor constante en todo el sistema. En un sólido puede encontrarse presente la humedad de las formas siguientes (Warren *et al.*, 1991):

d. Humedad ligada.

Se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor que la del líquido puro a la misma temperatura.

e. Humedad no ligada.

Se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual a la del líquido puro a la misma temperatura.

f. Humedad de equilibrio (x^*).

Humedad del sólido cuando su presión de vapor se iguala a la presión de vapor del gas, el grado de presión de vapor que ejerce la humedad contenida en un sólido húmedo depende de la naturaleza de la humedad, sólido y la temperatura (Treybal, 2000), en efecto el contenido de humedad de equilibrio de un sólido disminuye al aumentar la temperatura (Geankoplis, 1998). En conciencia, los materiales tienden a perder o ganar humedad durante un periodo para que alcancen este valor (Sharma, Mulvaney y Rizvi, 2003). En el secado de materiales sólidos la humedad del sólido que sale del secadero no puede ser inferior al contenido de humedad de equilibrio (Warren *et al.*, 1991).

g. Humedad libre (X)

Es la humedad del sólido que está en exceso con relación a la humedad de equilibrio. Es ésta la humedad que se puede evaporar y depende de la concentración de vapor en la corriente gaseosa. El agua libre es la diferencia entre el contenido total de agua del sólido y el contenido de agua en el equilibrio (Warren *et al.*, 1991).

$$X = \frac{\text{peso inicial} - X^* - m_{ss}}{m_{ss}} \quad (\text{Ec. 06})$$

Dónde:

m_{ss} = sólido seco y X^* = humedad de equilibrio.

2.3.8. Curvas de Velocidad de Secado

Para reducir el contenido de humedad en el secado de diversos materiales de proceso, por lo general se estima el tamaño del secador necesario, las diferentes condiciones de operación de humedad y la temperatura del aire empleado y el tiempo necesario para lograr el grado de secado.

a. Curvas de velocidad de secado para condiciones de secado constante.

- **Conversión de los datos a curva de velocidad de secado.**

Los datos que se obtienen de un experimento de secado por lotes, generalmente se expresan como peso total W del sólido húmedo a diferentes tiempos en el periodo de secado. Estos valores se pueden convertir a datos de velocidad de secado por los siguientes procedimientos. Primero se recalculan los datos. Si W es el peso del sólido húmedo en kilogramos totales de agua más sólido seco y m_{ss} , es el peso del sólido seco en kilogramos (ecuación 06).

$$X_t = \frac{W - m_{ss}}{m_{ss}} \quad (\text{Ec. 07})$$

Después de haber establecido las condiciones de secado constante, se determina el contenido de humedad de equilibrio X^* , kg de humedad de equilibrio entre kg de sólido seco. Con el se procede a calcular el valor del

contenido de humedad libre X , en kg de agua libre/kg de sólido seco para cada valor de X_t (Ecuación 07).

$$X = X_t - X^* \quad (\text{Ec. 08})$$

Al sustituir los datos calculados en la ecuación (07), se traza una gráfica del contenido de humedad libre X en función del tiempo h , como se muestra en la figura 1. Para obtener una curva de velocidad de secado a partir de esta gráfica, se miden las pendientes de las tangentes a la curva, lo cual proporciona valores de dx/dt para ciertos valores de t . Se calcula entonces la velocidad W para cada punto con la expresión.

$$W = -\frac{L_s}{A} * \frac{dx}{dt} \quad (\text{Ec. 09})$$

- **Grafica de la curva de velocidad de secado.**

Durante el proceso de secado de un sólido, se puede ir obteniendo datos experimentales que relacionan el contenido de humedad con el tiempo y se tendrá una curva similar a la Figura 4.

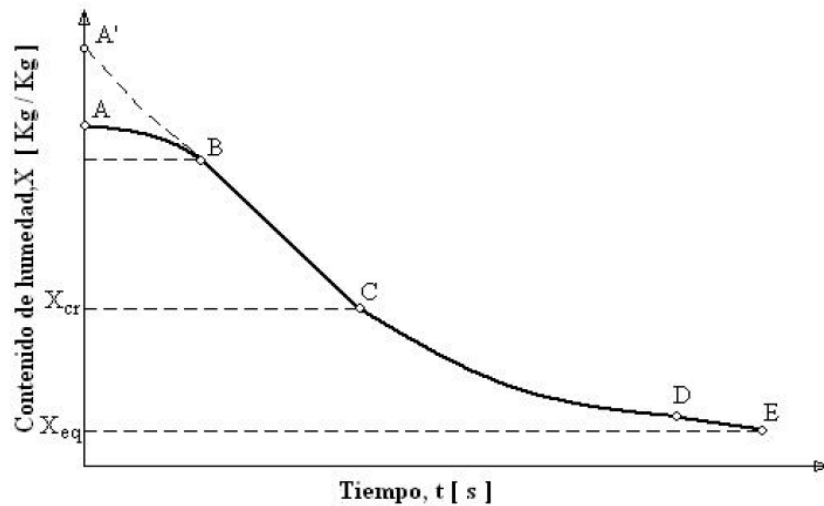


Figura 4. Curva de secado, (Geankoplis, 1998)

En la Figura (4), esta curva representa el caso general de una muestra sometida a una prueba de secado. La humedad disminuye continuamente desde el valor inicial (A) y finalmente se aproxima como límite a la humedad de equilibrio (X^*) con las condiciones existentes del aire. Cuando la pendiente de la curva cambia (C), se denomina punto crítico (X_c, t_c). Esto indica que la

velocidad de secado está sujeta a la variación del contenido de humedad en función del tiempo. Esta variación se ilustra claramente en la Figura (5), donde se realiza una representación gráfica de la velocidad de secado (W) en función de la humedad (X).

La velocidad de secado es la cantidad de agua libre que migra en un área (m^2) y a un determinado tiempo, esto es depende de las propiedades del material como la densidad global de masa del material deshidratado, el contenido inicial de humedad y su relación con el contenido de humedad en equilibrio en condiciones de secado. Podría ser necesario evitar la velocidad máxima de secado se resulta encogimiento, endurecimiento superficial, agrietamiento de la superficie u otros efectos indeseables en el secado de sólidos alimentarios (Sharma *et al.*, 2003).

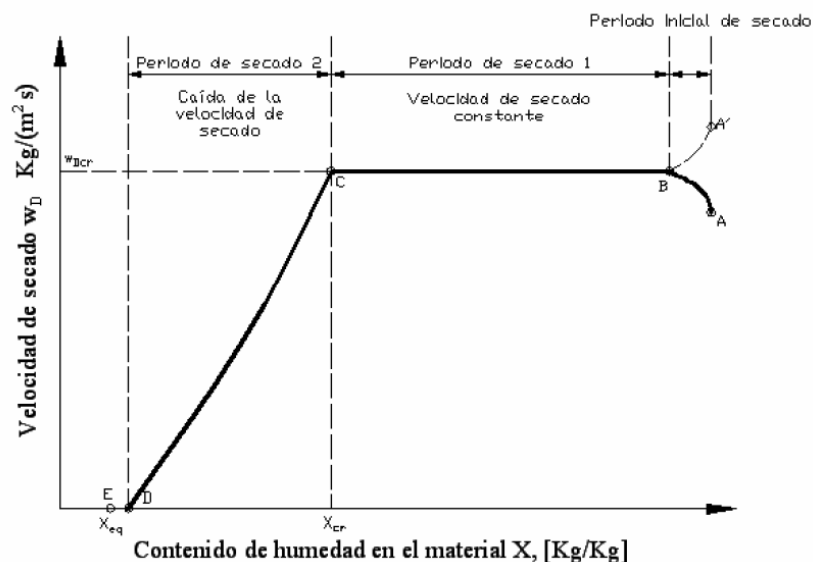


Figura 5. Curva de velocidad de secado, (Geankoplis, 1998)

Según Geankoplis. (1998), el secado de diversos sólidos bajo diferentes condiciones constantes de secado casi siempre produce curvas de formas variables en el período de velocidad decreciente, pero en general siempre están presentes las dos zonas principales de la curva de la velocidad de secado, el período de velocidad constante y el período de velocidad decreciente” Se debe tener en cuenta que este perfil aplica en muchas sustancias farmacéuticas, pero existen excepciones donde puede haber variaciones entre uno o varios de los períodos de secado dependiendo del número de mecanismos involucrados en el secado.

b. Secado durante el periodo de velocidad constante.

En este período siempre existe humedad en la superficie del material que se está secando. El agua que se encuentra dentro del material migra a la superficie a una velocidad mayor que la velocidad a la cual deja la superficie (Lomas, 1998). El sólido está tan húmedo que toda la superficie de secado está recubierta por una película continua de agua que se comporta como si el sólido no existiese. Se caracteriza porque la velocidad de secado es independiente del contenido de humedad (Warren *et al.*, 1991). Esta capa de agua es agua no combinada, Sin embargo las ondulaciones y hendiduras en la superficie del sólido ayudan a obtener una velocidad más alta de la que tendría una superficie completamente plana (Geankoplis, 1998).

c. Secado durante el periodo de velocidad decreciente.

Este período comienza cuando el agua que está en el interior migra a la superficie a menor velocidad que se seca la superficie (Lomas, 1998). Este punto marca el instante en el que el agua líquida sobre la superficie es insuficiente para mantener una película continua que recubra toda el área de secado (Warren *et al.*, 1991), corresponde al contenido crítico. El secado posterior solamente puede transcurrir con una velocidad regida por la difusión de la humedad interior hacia la superficie.

2.4. Modelos Cinéticos en Deshidratación de Secado de Alimentos

La deshidratación de productos alimenticios higroscópicos es rápida y simple, su estudio es complicado por su estructura interna compleja. Muchos estudios se han realizado sobre el fenómeno de transferencia de humedad, para una gran variedad de productos alimenticios y considerando diferentes tipos de cinética. De hecho, la literatura científica en esta área es fértil en modelos cinéticos, mecanísticos, empíricos o una combinación de ambos (Vázquez *et al.*, 1999).

Para la modelación matemática del secado de hierbas aromáticas García (2014), muestra ecuaciones que son empleadas para ajustar los modelos de secado:

$$\text{Modelo de Page } RX = \exp(-k \cdot t^n) \quad (\text{Ec.10})$$

Modelo de Page Modificado $RX = \exp(-k \cdot t)^n$ (Ec. 11)

Modelo Midilli $RX = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$ (Ec. 12)

Modelo logarítmico $RX = a * \exp(-k * t) + c$ (Ec. 13)

Modelo Henderson y Pabis $RX = a * \exp(-k * t)$ (Ec. 14)

Donde: a , b , c , k , n , son las constante cinéticas de los modelos

2.5. Teoría de la Difusión

Es la velocidad con que el agua migra desde el interior del alimento hacia la superficie de secado. Canovas (2005) menciona que el principal mecanismo de secado de los sólidos es la difusión del agua en sólidos de que dependen de su estructura, capilares, porosidad, formas geométricas y actividad de agua. La difusión es característica de los materiales que secan lentamente. La resistencia a la transferencia de vapor de agua desde la superficie del sólido hasta el aire es generalmente despreciable y la difusión en el sólido controla la velocidad global de secado. Puesto que la difusividad aumenta con la temperatura, la velocidad de secado aumenta con la temperatura del sólido (Warren *et al.*, 1991). El flujo del agua es una función del gradiente de la presión de vapor, de la difusividad del vapor en el aire, de la distancia a recorrer y de la temperatura. Además para evaporar el agua es necesario calor, el proceso supone realmente un transporte simultáneo de materia y calor (Paul y Heldman, 2001). Como en la Figura (6).

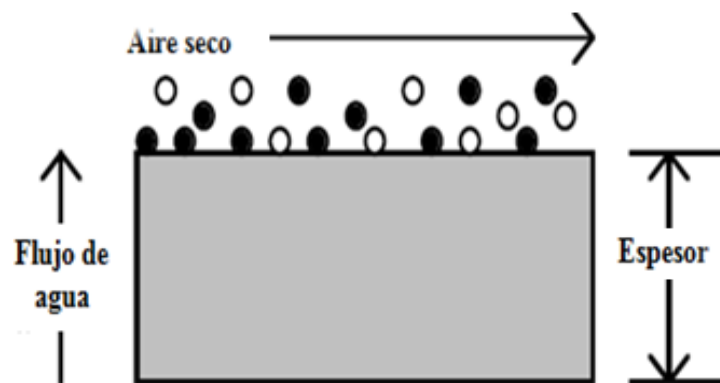


Figura 6. Difusión de agua en el secado, (Ibarz, 2005)

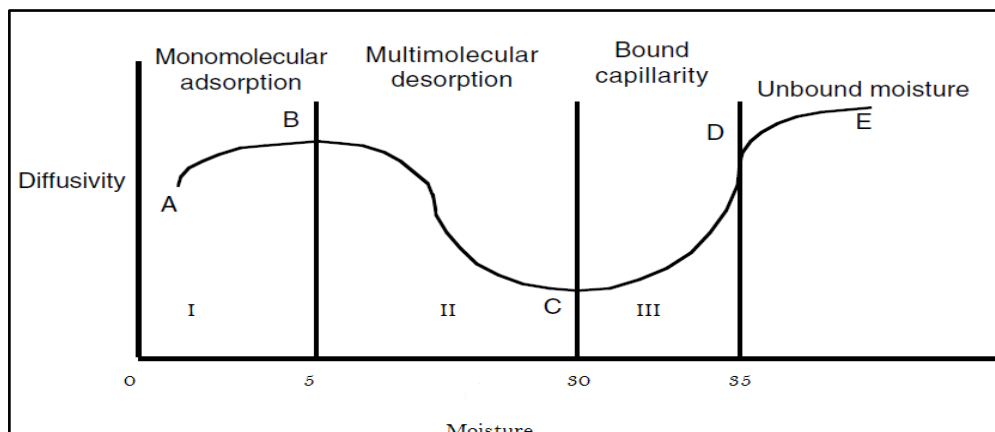


Figura 7. Representación de regiones, (Ibarz, 2005)

- **Región I (humedad 0 – 5%).**

Los poros y capilares del objeto contenidos de aire, son desplazados al adsorber agua. El calor es dejado por la adsorción de agua en el sólido y la difusividad termal se incrementa. Al mismo tiempo la difusión de humedad incrementa, subsecuentemente una capa de agua se forma rápidamente en la superficie del objeto.

- **Región II (humedad 5 – 30%).**

La humedad es adsorbida en capas multimoleculares y los capilares se llenan gradualmente con agua, desplazando el aire, la difusividad térmica es reducida, subsecuentemente la difusividad térmica del agua líquida es más baja que del aire. ($\alpha_w / \alpha_{aire} = 1/160$). La difusión de humedad disminuye, subsecuentemente la difusión de agua en el líquido es mayor que en el gas (aire) ($D_l / D_{aire} = 1/10000$).

- **Región III (humedad > 30%).**

La humedad está presente en la forma de agua capilar. La difusividad termal se incrementa linealmente con el contenido de humedad, debido al incremento lineal de la conductividad térmica.

La temperatura tiene un efecto positivo en la difusividad efectiva, así como señala la teoría cinética de las bases. Existe la relación entre el contenido de humedad y difusividad (Figura 8).

Zonas

La zona A – B representa la adsorción monomolecular en la superficie del sólido y consiste en el movimiento del agua por difusión de la fase de vapor. La zona B-C involucra la desorción multimolecular donde la humedad se empieza a mover en la fase líquida. La microcapilaridad juega un rol importante en la zona C-D, donde la humedad fácilmente emigra de los poros. En la zona D-E la humedad atraviesa su presión máxima de vapor y la migración de humedad se debe esencialmente a la capilaridad.

a. Difusión del líquido en el proceso de secado.

La transferencia de masa está controlada por la difusión cuando el flujo de líquido o vapor está de acuerdo con la segunda Ley de Fick. Esta ecuación aplica a la difusión en sólidos, líquidos y gases estacionarios (ecuación 15).

La ecuación de difusión en el periodo de secado con velocidad decreciente para una placa se puede obtener de la ecuación de difusión, si se supone que la superficie está seca o tiene un contenido de humedad de equilibrio y la distribución inicial de humedad es uniforme. El desplazamiento interno de la humedad hacia la superficie es un proceso de difusión que sigue las mismas leyes que la transmisión de calor (Coulson y Richarson, 1978).

$$RX = \frac{X_i - X^*}{X_0 - X^*} \quad (\text{Ec.15})$$

Donde:

RX= relación humedad, X_i = contenido de agua en un tiempo dado (kg de agua/kg de sólido seco), X^* = contenido de agua en el equilibrio (kg de agua/kg de sólido seco), X_1 = contenido de agua inicialmente (kg de agua/kg ss).

Las soluciones de la ecuación son diferentes dependiendo de la geometría de las muestras. Soluciones para geometría simple como láminas se utiliza la ecuación Crank (ecuación 16).

$$RX = \frac{X_i - X^*}{X_0 - X^*} = \frac{8}{\pi^2} * \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} * EXP \left[-\frac{(2n+1)^2 * \pi^2 * D_{ef} * t}{4L^2} \right] \quad (\text{Ec.16})$$

Donde:

D_{ef} = difusividad efectiva (m^2/s), t = tiempo de secado (segundos) y L = espesor de la capa de sólido (m).

b. Energía de activación

Es la energía necesaria para que ocurra la difusión del agua desde el interior del producto hacia la superficie de secado. La difusividad efectiva se expresa habitualmente en función de la temperatura y del contenido en humedad. La dependencia de la difusividad con la temperatura se describe generalmente mediante la ecuación de Arrhenius y ésta permite estudiar el efecto de la temperatura en el coeficiente de difusión efectivo del agua durante el proceso de secado se expresa de la siguiente manera (Martínez, 1998).

$$D_{def} = D_0 * EXP\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (\text{Ec.17})$$

Dónde:

D_{def} = coeficiente de difusión efectivo del agua (m^2/s), D_0 = es el factor de frecuencia (m^2/s), E_a = energía de activación (kJ/mol), R = constante universal de los gases (8,314 J/mol. K) y T = temperatura absoluta (K).

La determinación exacta de la energía de activación para la difusión de agua se considera muy importante para entender el fenómeno de la difusión. Se ha demostrado que el factor de Arrhenius D_0 y la energía de activación para la difusión del agua E_a , son propiedades estrechamente relacionadas (Alizaga, 1985).

CAPÍTULO 3. MATERIALES Y METODOLOGÍA

3.1. Lugar de Ejecución

3.1.1. Localidad e Institución donde se desarrolla el Proyecto

a) Localidad

El proyecto de investigación se realizó en la Escuela Profesional Ingeniería Agroindustrial (EPIA), ubicado en el barrio Santa Rosa, Distrito de Talavera – Provincia de Andahuaylas – Región Apurímac.

b) Institución

Laboratorios de Química y Control de Calidad de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial (EPIA) de la Universidad Nacional José María Arguedas (UNAJMA), en la Av. 28 de Julio N° 1103

3.2. Material de Estudio

Para la investigación se recolectaron hojas tiernas y frescas de pachataya – pampa taya del sector denominado Aputimani a 3015 msnm, de la comunidad de Anyanizo del distrito de Kaquiabamba de la provincia de Andahuaylas - Región Apurímac, esta planta se encuentra en estado silvestre sin ningún cuidado.

3.2.1. Universo y/o Población

El universo de estudio fueron las hojas recolectadas de pachataya – pampa taya las cuales se encontraron en estado silvestre, que en cantidad fue de 3 kg, se consideró esta cantidad como suficiente para atender las pruebas triplicadas para cada temperatura de secado, para la recolección se tomó en cuenta los siguientes criterios: hojas tiernas, sanas, hojas sin marchitas, hojas con coloración verde intenso y estos deberán encontrarse lejos de carreteras y caminos.

Las hojas recolectadas fueron envueltas con plástico, luego con papel Kraft y transportado en cajas de cartón para evitar la acción directa de la luz, luego se transportó al laboratorio de química de la Universidad Nacional José María Arguedas, a fin mantenerlo en refrigeración a 10°C.

3.2.2. Muestra

Para obtener la muestra se realizó un muestreo al azar, y el tamaño de muestra se calculó considerando el peso de hojas que se utilizó en cada tratamiento (temperatura de secado) que en promedio fue 30 g; así el tamaño de muestra fue de 3000 g considerado para todas las pruebas y sus réplicas.

3.2.3. Unidad de Análisis

La unidad de análisis se consideró a las hojas de pachataya – pampa taya y a los datos de humedad en base seca que fueron tomados durante el tiempo de secado, para las temperaturas de estudio, a través de la cuales se evaluaron y calcularon las curvas de secado, las curvas de velocidad, la difusividad efectiva del agua y la energía de activación de las hojas de pachataya – pampa taya.

3.3. Equipos, Materiales y Reactivos e Insumos de Laboratorio

3.3.1. Equipos e Instrumentos

Los equipos e instrumentos utilizados para el desarrollo de la investigación se detallan en la Tabla 01.

Tabla 01. Descripción de equipos e instrumentos

Cant.	Nombre	Descripción	Marca
01	Estufa con temporizador	De color plateado, material de acero inoxidable y con accesorios de plástico.	Menmert
01	Balanza analítica	Equipo electrónico con capacidad de 100 g y sensibilidad 0.0001 g.	OHAUS Aventurer
02	Agitador electromagnético	Equipo electrónico, de material metálico, con imágenes para la agitación electromagnética.	CAT
01	Secador convectivo	Con Bandejas y rango de temperatura de 40 a 100 °C con velocidad de aire 1 m/s	BINDER
01	Anemómetro	Instrumento que mide velocidad de aire, humedad relativa y temperatura	OHAUS Aventurer
01	Cronometro	Instrumento digital	CASIO

Fuente: Elaboración Propia

3.3.2. Materiales

Los materiales que fueron utilizados se muestran en la Tabla 02.

Tabla 02. Descripción de materiales

Cantidad	Materiales	Marca
09	Placa Petri	MARIENFELD
03	Gradilla de tubos de ensayo	S/M
02	Espátula de acero inoxidable mango madera	S/M
03	Pipetas de 1ml	FORTUNA
03	Probeta	FORTUNA
01	Tripode	SIDER PERU
03	Bandejas de acero inoxidable	
03	Baguetas	S/M
01	Pizeta de 200ml	S/M
02	Mandil	
24	Papel de nitrocelulosa	S/M
24	Frascos con tapa hermético	BASA
01	Papel de aluminio	S/M
02	Tinas	REY
01	Rotulador	FABER - CASTELL

Fuente: Elaboración Propia

3.3.3. Material Vegetal

La descripción del material vegetal utilizado, se muestra en la Tabla 4.

Tabla 03. Material vegetal.

Cantidad	Unidad	Descripción	Origen
3000	G	Hojas de pampataya (<i>Baccharis caespitata</i>)	Proveniente de Aputimani – Comunidad de Anyanizo – Distrito de Kaquiabamba – Provincia de Andahuaylas – Región Apurímac.

Fuente: Elaboración Propia

3.4. Metodología

3.4.1. Metodología para la determinación de las Curvas de Secado

a) Recolección de las hojas de pachataya – pampa taya.

Las hojas de pachataya – pampa taya fueron recolectadas manualmente en el mes de septiembre de 2015, las hojas recolectadas en campo fueron

acopiadas en bolsas de papel Kraff, al colocarlas se evitó ejercer presión sobre ellas, enseguida fueron transportadas en cajas de cartón para evitar la acción directa de la luz, y llevadas al laboratorio de Química de la Universidad Nacional José María Arguedas, donde fueron refrigeradas a 10°C a fin de evitar el marchitamiento.

b) Acondicionamiento de las muestra

Las hojas de pachataya – pampa taya fueron sometidas a desojado manual, posteriormente lavadas con abundante agua a chorro con la finalidad de eliminar materiales extraños y luego fueron almacenados a 10°C, para mantener su integridad.

Paso siguiente se realizó la eliminación de agua residual de lavado utilizando paños absorbentes y se dejó esparcida en la bandeja de acero inoxidable durante 30 min con la finalidad de eliminar el agua restante.

Pasado los 30 min se colocaron en recipientes de acero inoxidable de 10cmx10cm de lado, que permitieron contener 1kg de las hojas, las cuales se sometieron al secador de bandeja a las temperaturas correspondientes.

c) Determinación de humedad inicial

El contenido de humedad inicial de las hojas de pachataya – pampa taya se sometió a calentamiento en estufa o por desecación en estufa en condiciones determinadas esto se realizó por triplicado, según el método 930.15 de la A.O.A.C (1998). Para dar inicio a dicho proceso se registró el peso inicial de las hojas por medio de una balanza analítica, luego las hojas fueron llevadas a la estufa a 65 °C durante 24 horas, cumplido el tiempo se retiraron de la estufa, para posterior trasladar a un desecador por 2 horas y finalmente tras su enfriamiento se registró el peso final de las hojas secas mediante una balanza analítica.

d) Secado de las hojas de pachataya – pampa taya

Se seguirá la metodología propuesta por Arends y Gutiérrez (2008), se construirán curvas de secado graficando la razón de humedad (RX) de las hojas de pampataya en función del tiempo (ecuación 19), para cada temperatura de secado.

$$RX_{exp} = \frac{X_t - X^*}{X_0 - X^*} \quad (\text{Ec. 19})$$

Dónde:

RX_{exp} , razón de humedad experimental, adimensional

X_t , contenido de agua del producto en el tiempo t , en b.s

X_0 , contenido de agua inicial del producto, en b.s

X^* , contenido de agua en el equilibrio, en b.s.

(Carranza 2001), propone la siguiente metodología para esta operación

Las hojas de pachataya – pampa taya fueron colocados en bandejas de acero inoxidable 10 cm*10 cm, con un espesor de 0.039 cm, luego se llevó a secar a las temperaturas estudiadas a una estufa de convección forzada con una velocidad de aire de 1 m/s con humedad relativa de 60 %. La pérdida de peso se registró con balanza analítica de precisión, cumpliendo cada 10 minutos hasta obtener un peso constante. Así como indica la Figura (8). El secado de las hojas para cada temperatura fueron realizadas por triplicado.

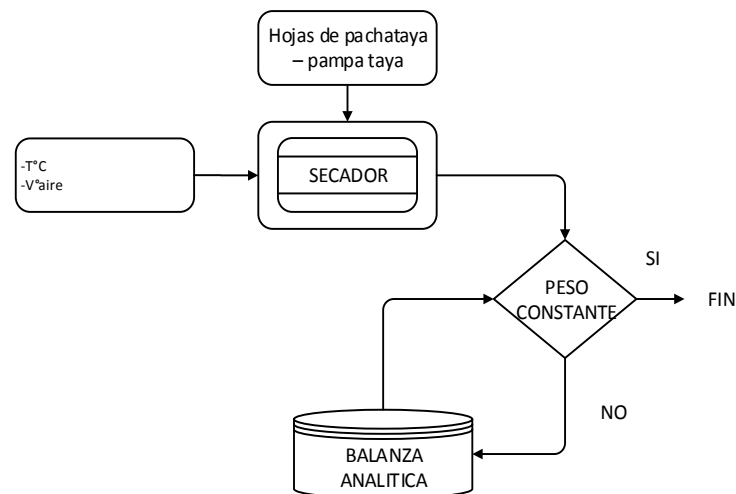


Figura 8. Esquema de operación de secado

Con los datos obtenidos se calcularon la humedad en base seca (ecuación 02), humedad libre (ecuación 06) para cada intervalo de tiempo. Luego se graficaron las curvas de secado de las hojas de pachataya – pampa taya, con el tiempo (horas) vs humedad libre (kg agua / kg de ss) a las temperaturas de 40, 50 y 60 °C, estas curvas de secado se compararon entre sí.

3.4.2. Modelado de las Curvas de Secado de Pachataya – Pampa Taya

Para determinar la curva de secado de las hojas de pachataya – pampa taya a las temperaturas dadas, estos fueron modelados a 6 modelo matemáticos más utilizados en alimentos, como se muestra en tabla 05.

Tabla 04. Modelos matemáticos para curva de secado de pachataya – pampa taya

N° modelo	Ecuación	Nombre del modelo
1	$RX = e^{-kt}$	Lewis
2	$RX = e^{-kt^y}$	Page
3	$RX = a * e^{-kt}$	Henderson y Pabis
4	$RX = a * e^{-kt} + c$	Logarítmico
5	$RX = a * e^{-k_0t} + b * e^{-k_1t}$	Modelo de términos
6	$RX = a * e^{-kt} + (1 - a) * e^{-kbt}$	Aproximación difusional

Fuente: (Vega y Lemus, 2006)

La calidad del ajuste de los modelos propuestos se evaluó a través del porcentaje de error medio relativo (% E) (Ecuación 20) y del coeficiente de determinación (r^2) (Ecuación 21). (Vega y Lemus, 2006). Se seleccionó el mejor modelo matemático que presento un coeficiente de determinación mayor a 98 % y %E menor a 10 %.

$$\%E = \frac{100}{N} * \sum_{i=1}^n \frac{|X_{mod} - X_{exp}|}{X_{mod}} \quad (\text{Ec.20})$$

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{mod} - \bar{X}_{exp})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{exp} - \bar{X}_{exp})^2} \quad (\text{Ec.21})$$

Donde. r^2 : Coeficiente de determinación, X_{mod} : Contenido de humedad modelado,

\bar{X}_{exp} : Promedio de la humedad de equilibrio, X_{exp} : contenido de humedad experimental y %E: Porcentaje de error relativo.

3.4.3. Metodología para la determinación de las Curvas de Velocidad de Secado

Las curvas de velocidad de secado se determinaron utilizando la ecuación propuesta por Geankopolis (1998), a través de la ecuación (22).

$$R = -\frac{X_s}{A} \cdot \frac{dX_t}{dt} \quad (\text{Ec. 22})$$

Donde:

X_s , kg de solido seco/kg de hoja

A , área de la bandeja de secado, igual a 0.001 m².

$$\frac{dX_t}{dt} \cong \frac{\Delta X_t}{\Delta t} = \frac{X_{t,i-1} - X_{t,i}}{t_i - t_{i-1}}$$

$X_{t,i-1}$, masa en el tiempo $i-1$ (kg de agua/kg s.s.)

$X_{t,i}$, masa en el tiempo i (kg de agua/kg s.s.)

t_{i-1} , tiempo $i-1$, (min)

t_i , tiempo i , (min)

3.4.4. Metodología para la determinación del Coeficiente de Difusividad Efectiva

El coeficiente de difusividad efectiva se determinó con la ecuación integrada de la segunda ley de Fick a tiempos largos, considerando una placa infinita propuesta por (Aguirre *et al.*, 1985), para lo cual se graficó el logaritmo natural de razón de humedad (RX) con el tiempo (segundos), esta grafica se ajustó a un modelo lineal y con la pendiente de la ecuación del modelo, se calculó la difusividad (ecuación 24). Para el ajuste del modelo lineal se utilizó el software Microsoft Excel 2013.

Se asumió

- El contenido de humedad inicial es uniforme en las hojas de pampataya
- La geometría de pampataya permanecerá constante durante el proceso de secado.

$$LN(RX) = LN\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{def}}{4L^2} * t \quad (\text{Ec. 23})$$

$$m = \frac{\pi^2 D_{def}}{4L^2} \quad (\text{Ec. 24})$$

Dónde:

RX= razón de humedad, m =pendiente de la ecuación linealizada, L = Espesor del lamina (m), D_{ef} = difusividad efectiva y t = tiempo.

3.4.5. Metodología para la determinación de la Energía de Activación

Esta energía térmica acelera el movimiento de las moléculas de agua, incrementando la frecuencia y la fuerza de sus colisiones y también agita los átomos y enlaces dentro de las moléculas individuales, aumentando las probabilidades de ruptura de los enlaces. Una vez que una molécula de agua absorbe suficiente energía para asegurar la ruptura de enlace.

Así la energía de activación, se determinó la energía de activación al graficar el logaritmo natural de difusividad efectiva con la temperatura absoluta. La energía de activación fue calculada con la ecuación integrada de Arrhenius (ecuación 25), propuesta por (Aguirre et al., 1985) esta grafica fue modelada al modelo lineal con el software Microsoft Excel 2013 y con la pendiente se determinó la energía de activación (ecuación 26).

$$\ln(D_{ef}) = \ln(D_o) - \frac{E_a}{R} * \frac{1}{T} \quad (\text{Ec. 25})$$

$$m = \frac{E_a}{R} \quad (\text{Ec. 26})$$

Dónde:

m = pendiente de la ecuación linealizada, D_{ef} = difusividad efectiva (m^2/s), D_o =coeficiente de difusividad (m^2/s), E_a = Energía de activación ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$), R =constante universal de los gases ($8.3143 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) y T = Temperatura (K).

3.4.6. Metodología para describir la Clasificación Taxonómica

La clasificación taxonómica se describe de acuerdo a (Germplasm Resources Information Network, (2007).

3.4.7. Metodología del Análisis Estadístico

Se analizaron las variables de salida con un diseño completamente al azar DCA, en donde se consideró un factor la temperatura, mientras que variables de respuestas fueron curva de secado, curva de velocidad de secado, coeficiente de difusividad efectiva y energía de activación, de acuerdo al siguiente arreglo experimental, mostrado en la Tabla (05).

Tabla 05. Arreglo experimental para el secado

Var de entrada	Var de salida		
T (°C)	Tiempo de secado	Coefficiente de difusividad	Energía de activación
40	---	---	---
50	---	---	---
60	---	---	---

Análisis de varianza

Se aplicó un ANOVA de un solo factor (temperatura de secado) con tres repeticiones, el cual se evaluó a un nivel de significancia (α) del 5%.

Prueba de comparación múltiple

Se aplicó el test de Tukey, para evaluar la diferencia significativa de la humedad final o de equilibrio de secado y de la difusividad efectiva, considerando como tratamientos a las temperaturas de estudio.

Hipótesis nula (H_0)

La media de los resultados del tiempo de secado, coeficiente de difusión y energía de activación a las temperaturas de estudio no muestran diferencia significativa.

$$H_0: x_1 = x_2 = x_3$$

Hipótesis alterna (H_A)

La media de los resultados del tiempo de secado, coeficiente de difusión y energía de activación a las temperaturas de estudio muestran diferencia significativa.

$$H_A: x_A \neq x_A \neq x_A$$

Criterio: Se rechaza H_0 , si $\alpha > p\text{-value}$ (probabilidad evaluada)

CAPITULO IV. RESULTADO Y DISCUSIÓN

4.1. Curvas de Secado de las Hojas de Pachataya – Pampa Taya

En la Tabla 06, se aprecia la humedad final lograda en el secado de las hojas de pachataya – pampa taya a las temperaturas de estudio, donde se observa que a medida que se incrementa la temperatura disminuye la humedad final o de equilibrio, así como el tiempo de secado, consiguiéndose una humedad de 6.05 ± 0.17 % de humedad en base humedad a 60°C .

A la temperatura de 40°C el tiempo de desecado fue de 500 min hasta conseguir el equilibrio de humedad final correspondiente a 10.5 ± 0.15 % (b.s), mientras que el secado a 50°C se desarrolló hasta en 380 min consiguiéndose una humedad final o de equilibrio de 6.77 ± 0.26 % (b.s), finalmente el tiempo de secado a 60°C se redujo hasta casi el 50% del secado a 40°C , con una humedad final menor de 6.05 ± 0.17 % (b.s)

Por otra parte al aplicar el ANOVA para la humedad final o de equilibrio (Tabla 07), se aprecia que existe diferencia significativa, $p\text{-value} < 0.05$, es decir la temperatura influye significativamente en la humedad final, esto se nota claramente pues la humedad final de secado a 40°C es alto en comparación al secado a 50 y 60°C , de acuerdo a esta consideración se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey (Tabla 06), donde ningún par de las humedades de equilibrio es similar.

Tabla 06. Modelos matemáticos para curva de secado de pachataya

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Humedad inicial (%)	Tiempo (min)	Humedad final (%)			Comparación múltiple*
			\bar{x}	\pm	S	
40	71.64	500	10.5	\pm	0.15	A
50	71.64	380	6.77	\pm	0.26	B
60	71.64	230	6.05	\pm	0.17	C

*Evaluado a través del test Tukey al 5%, Las letras diferentes indican que hay diferencia significativa., anexo 02

Tabla 07. ANOVA de la humedad final o de equilibrio

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.0034	2	0.0017	427.35	0.00
Intra grupos	2.4E-05	6	4.0E-06		
Total	0.0035	8			

En la Figura 09, se muestra la razón de humedad RX en función del tiempo de secado a intervalos de 10 minutos, graficándose las curvas de secado, obtenidas para las temperaturas de trabajo 40, 50 y 60 °C, se aprecia que a medida que transcurre el tiempo durante el secado el efecto de la temperatura sobre las curvas de secado de las hojas de pachataya – pampa taya, hace que se incremente la pendiente durante los primeros 50 minutos, es decir a mayor temperatura existe mayor eliminación de agua.

Cabe mencionar que estos a mayor temperatura del aire del secado, se obtiene menor tiempo de secado; es decir la temperatura del aire es inversamente proporcional al del tiempo. Por otro lado se puede distinguir que la humedad en las hojas de pachataya – pampa taya va disminuyendo a medida que el tiempo avanza, de tal forma logrando en menor tiempo el secado a mayor temperatura. A medida que la humedad va decreciendo el tiempo de secado va en aumento, por ello a una temperatura el secado se realiza rápido así logrando un producto con características específicas; es decir, se confirma que la perdida de humedad en las hojas de pampataya depende de la temperatura del aire tal como lo manifiesta Doymaz *et al.* (2006).

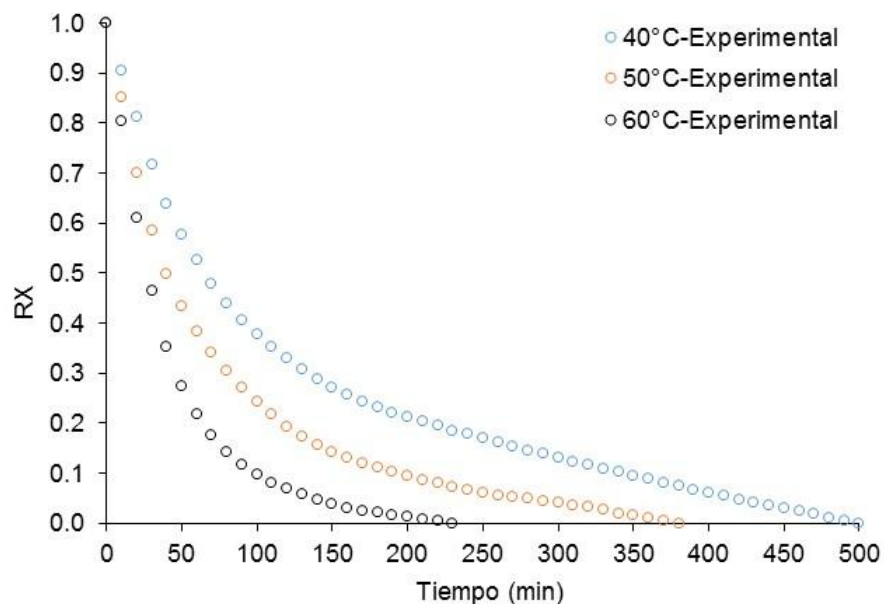


Figura 9. Curvas de secado en función del tiempo

Las curvas de secado, se aprecia el aumento en la pendiente de las curvas, esta fue más pronunciado para la mayor temperatura es decir 60°C, similares resultados obtuvieron Pineda *et al.*, (2009) para el secado a 60 °C, 75 °C y 90 °C

de las hojas de morera (*Morus alba*), presentando mayor pendiente las curvas a 75 y 90°C, mientras que García (2014) para las hojas de Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) y para la Hierbabuena (*Mentha spicata*) a las temperaturas de 30°C, 40°C, 50°C y 60°C, y García *et al.*, (2010) para el cilantro (*Coriandrum sativum*) y perejil (*Petroselinum crispum*) a las temperaturas de 50 °C y 60 °C; en general la pendiente de la curva es inversamente proporcional con la temperatura de secado.

El efecto de la temperatura en las curvas de secado se aprecia a través de las pendientes de las curvas de secado, así por ejemplo Tonguino (2010), en su investigación de determinación de las condiciones óptimas para la deshidratación de dos plantas aromáticas; menta (*Mentha Piperita* L) y orégano (*Origanum Vulgare* L), considera que el factor que afecta significativamente fue la temperatura, similar conclusión arriba Aspurz (2011) en la evaluación de la cinética del secado de tomillo (*Thymus vulgaris*); asimismo Pineda *et al.*, (2009), al evaluar el efecto de las condiciones de secado sobre la cinética de deshidratación de las hojas de morera (*Morus alba*), considero que la variable más influyente en la eliminación de humedad fue la temperatura de secado, al evaluar junto a otras variables como la velocidad y la humedad del aire.

4.2. Modelado de la Curva de Secado de Pachataya – Pampa Taya

Considerando las ecuaciones de los modelos matemáticos cinéticos de las curvas de secado, mostradas en la Tabla (06), se determinó el ajuste de los datos a los modelos de Lewis, Page, Henderson y Pabis, Logarítmico, Modelo de los términos, Aproximación difusional.

Los coeficientes o parámetros de los modelos se muestran en las Tabla 08, 09 y 10 para las temperaturas de 40, 50 y 60°C.

En la Tabla 08, se aprecia que los modelos Page y Modelo de dos términos, presentan valores bajos de %E, no obstante el Modelo de dos términos presenta mejor valor de R^2 , (cercano a la unidad), Gálvez (2007) menciona que valores de r^2 mayores a 0.98 es un indicador de un buen ajuste para un modelo matemático; el mismo hecho se presenta para las temperaturas de 50 y 60°C, este mismo hecho sucede en el modelado de las curvas de secado a 50 y 60°C, donde se impone nuevamente el modelo Page y dos términos, mostrados en las Tablas 9 y 10.

Para el modelado a 40°C, el modelo Page presenta un valor de r^2 0.9680 y error medio relativo de %E de 15.50, seguido del modelo de términos con r^2 0.820 y %E 13.78, para el modelado a 50°C el modelo de Page presenta un r^2 de 0.9860 y %E 13.86 y el modelo de términos r^2 0.9949 y %E 10.60 (tabla 9), mientras que a 60°C el modelo de Page presenta un r^2 de 0.9972 y %E 20.96 y el modelo de términos r^2 0.9971 y %E 12.52

Por otra parte las Figuras 11, 12 y 13, muestran las tendencias de las curvas de secado modeladas por cada modelo matemático, apreciándose la tendencia similar con los datos experimentales, es decir los modelos podrían predecir adecuadamente las curvas de secado para tiempos infinitos, no obstante se debe considerar un modelo adecuado con bajos valores de %E y valores de r^2 cercanos a la unidad, en ese sentido el modelo de Page es el más adecuado.

Tabla 08. Parámetros y estadígrafos para los modelos cinéticos de secado a 40°C

Modelo	Parámetros	%E	r^2
Lewis	k	0.0085	38.07481
Page	k	0.0245	15.50372
	y	0.7885	
Henderson y Pabis	a	0.9066	24.49252
	k	0.0076	
Logarítmico	a	0.8999	20.99319
	k	0.0092	
	c	0.0441	
Modelo de términos	a	0.3844	13.78602
	k0	0.0269	
	b	0.6349	
Aproximación difusional	k1	0.0057	38.07418
	a	1.2E-05	
	k	0.0918	
	b	0.0926	1.2389

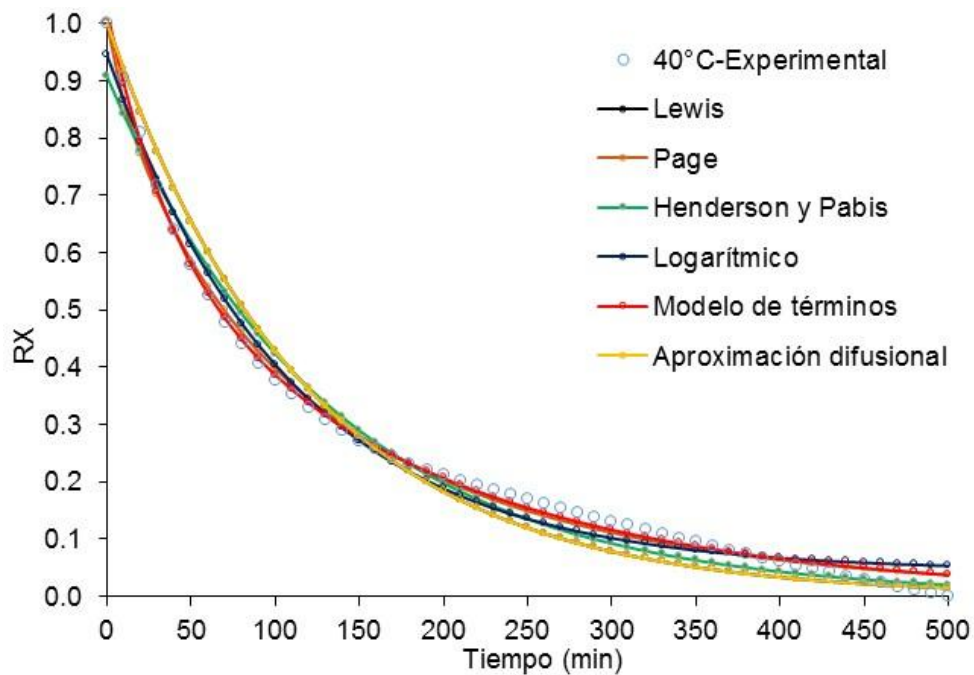


Figura 10. Modelado de las curvas de secado a 40°C

Tabla 09. Parámetros y estadígrafos para los modelos cinéticos de secado a 50°C

Modelo	Parámetros	%E	r ²	
Lewis	k	0.0144	72.49381	1.18339
Page	k	0.0338	13.86284	0.9860
	y	0.8089		
Henderson y Pabis	a	0.9315	48.05758	1.05278
	k	0.0133		
Logarítmico	a	0.9277	19.42573	0.9936
	k	0.0154		
	c	0.0333		
Modelo de términos	a	0.4537	10.6064	0.9949
	k0	0.0333		
	b	0.5556		
Aproximación difusional	k1	0.0091	72.49373	1.1834
	a	2.1E-06		
	k	0.1239		
	b	0.1161		

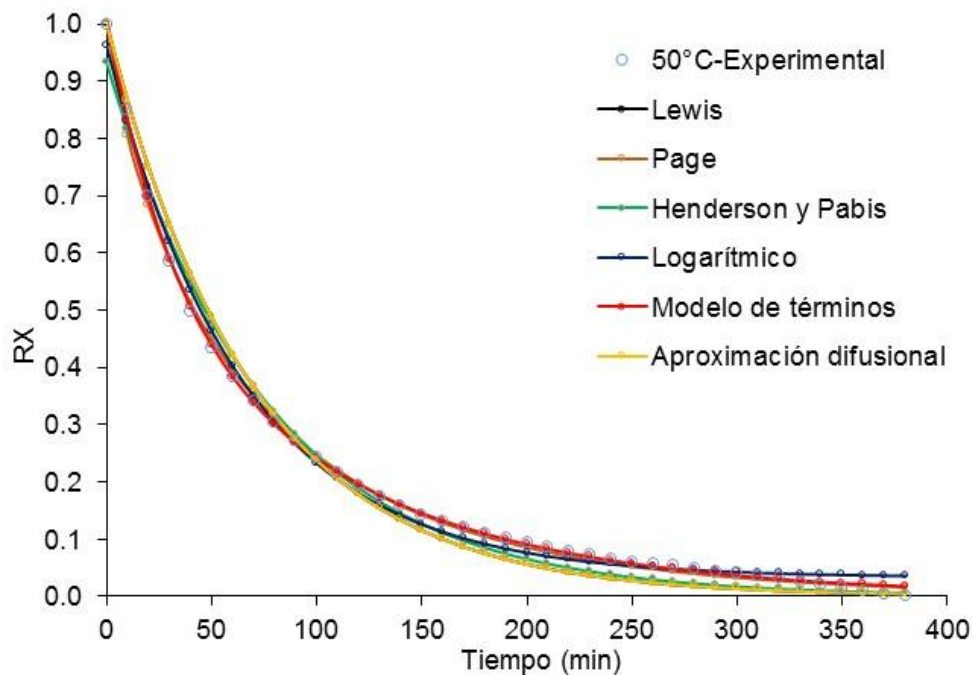


Figura 11. Modelado de las curvas de secado a 50°C

Tabla 10. Parámetros y estadígrafos para los modelos cinéticos de secado a 60°C

Modelo	Parámetros	%E	r^2
Lewis	k	0.0247	33.14206
Page	k	0.0282	20.96222
	y	0.9663	
Henderson y Pabis	a	1.0010	33.38951
	k	0.0247	
Logarítmico	a	0.9961	16.76357
	k	0.0259	
	c	0.0125	
Modelo de términos	a	0.8382	12.52281
	k0	0.0295	
	b	0.1770	
Aproximación difusional	k1	0.0129	33.68853
	a	1.7E-03	
	k	0.0816	
	b	0.3031	

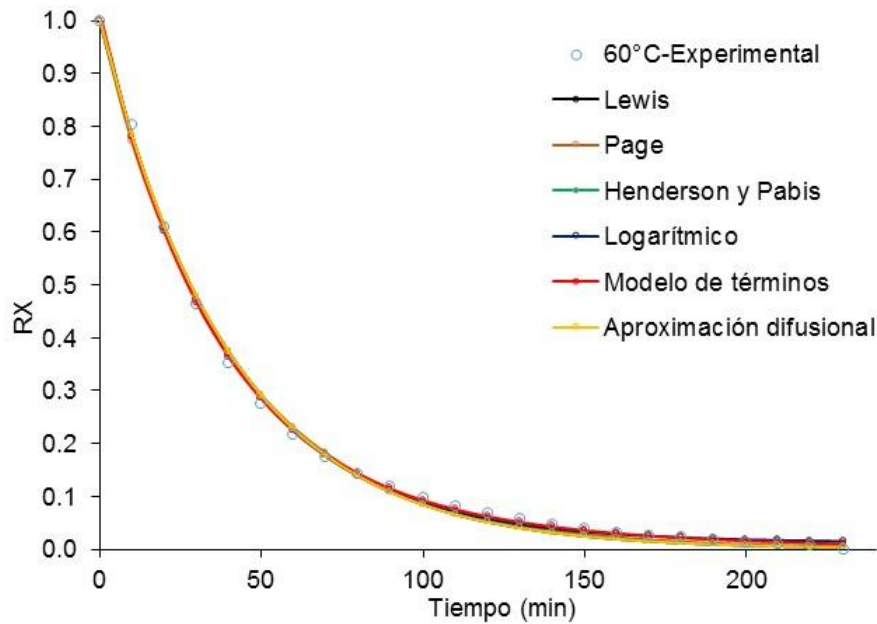


Figura 12. Modelado de las curvas de secado a 60°C

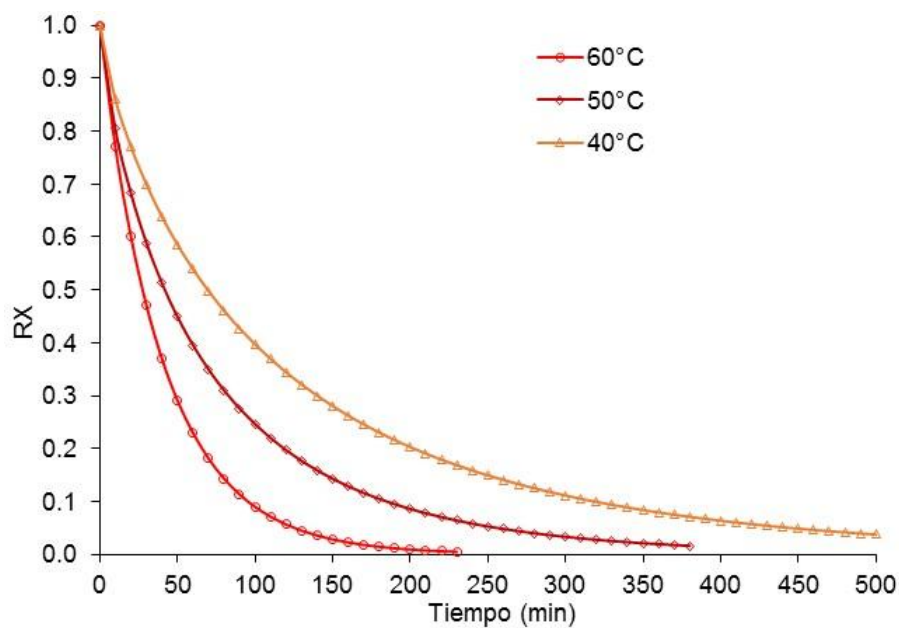


Figura 13. Modelado de las curvas de secado a través del modelo Page.

En general el modelo Page, se ajusta a los datos de secado de las hojas de pampataya las tres temperaturas de estudio, las curvas ajustadas se muestran en la Figura 13, observándose claramente que la pendiente de las curvas aumenta conforme se incrementa la temperatura de secado.

Este modelo también fue utilizado por otros autores en el secado de diferentes hojas de plantas aromáticas: Para la cinética del secado de tomillo (*Thymus vulgaris*) realizado por Rocha *et al.* (2012) utilizó temperatura de aire de

secado de 30, 40, 50, 60 y 70 °C en un secador de flujo de aire ascendente, afirma que el modelo page fue que mejor se ajusta a los datos. También de la misma especie Aspurz. (2011) seco las hojas utilizando temperatura del aire de secado en un rango de 30 a 70 °C, velocidad del aire de $1 \text{ m}^*\text{s}^{-1}$, el modelo Page fue que mejor se ajusta a los datos experimentales, así también para el secado de las hojas laurel (*Laurus nobilis L.*) Demir *et al.* (2004) encontró que el mejor modelo que ajusto a los datos experimentales fue modelo page. En estudio realizado con hojas y tallos de perejil por Lema *et al.* (2007) utilizaron diferentes condiciones de temperatura del aire de secado (35, 45, 55 y 65 °C) y a una velocidad fija de 1m/s, los autores verificaron que el modelo Page fue que mejor ajusto a los datos de capa delgada para hojas y tallos de perejil. García *et al.* (2007).

Jeria y Pozo (2011), al realizar el secado convectivo de hojas de Stevia Rebaudiana, observo que el modelo exponencial (Page) fue el que mejor se ajustó a los datos de secado a 50°C y a 70°C con r^2 de 0,997 y 0,990 respectivamente, lo mismo que García (2014) para el secado de la Stevia (*Stevia rebaudiana Bertoni*) y la Hierbabuena (*Mentha spicata*); no obstante Lema *et al.* (2007) para el secado en capa delgada del perejil, considero que el modelo de Midilli – Kucuk, describió más adecuadamente la cinética de secado en el rango de temperaturas estudiado

4.3. Evaluación de las Curvas de Velocidad de Secado

En la figura 14, se muestran las curvas de velocidades de secado de las hojas de pachataya – pampa taya para 40, 50 y 60 °C en donde se observa que la velocidad de secado, disminuye a medida que la humedad de la hoja decrece. Se puede distinguir dos etapas de secado el periodo de velocidad constante y periodo de velocidad decreciente, para 40 °C la velocidad de secado es menor que a las otras dos temperaturas, mientras para 60 °C se observa mayor velocidad de secado, por ello es posible establecer una relación directa entre la velocidad de secado y la temperatura.

Es así que al principio las hojas de pachataya – pampa taya, están a una temperatura inferior de la que tendrá al final, y la velocidad de evaporación va en aumento, es debido a ello que sucede una disminución rápida de la humedad la cual se incrementa con el aumento de temperatura (intervalos de la curva y pendientes mayores) durante los primeros 10 minutos, luego del cual alcanza la

velocidad de secado constante, donde se aprecia que a 40 °C estas sucede durante mayor tiempo (Tabla 06) y que esta disminuye conforme se incrementa la temperatura, asimismo se observa claramente que los intervalos de velocidad de secado disminuye con X_t , eso sucede debido a que se está eliminando agua ligada (Geankoplis, 1998)

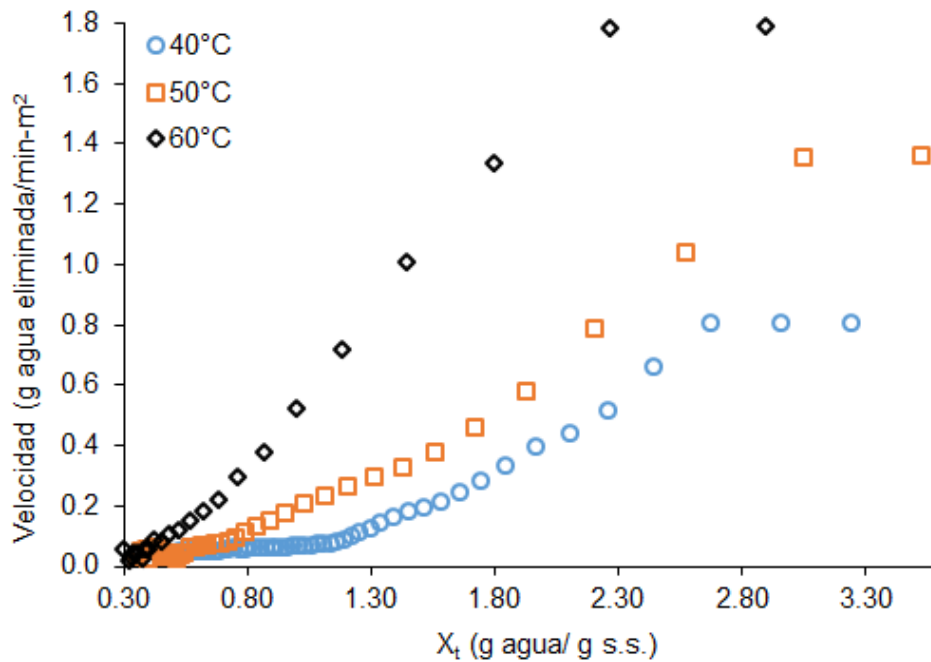


Figura 14. Curvas de velocidad de secado (datos en Anexo 04)

Asimismo se puede apreciar que el periodo de velocidad constante para el secado a 40°C, se presenta en los primeros 20 minutos, es decir el agua contenida en la superficie de hoja de pachataya – pampa taya es eliminada en ese tiempo, sin embargo para la temperatura de 50°C la velocidad constante se presenta durante 10 minutos, lo mismo que para 60°C, no obstante para este último es mayor la velocidad, por lo que se elimina mayor cantidad de agua.

También, se aprecia que la velocidad decreciente es mayor a 60°C, es decir la eliminación de humedad es mayor, pues los intervalos son mayores, en comparación a 50 y 40°C, estos resultados concuerdan con los resultados obtenidos por Taharazako (1985) para el secado de hojas de Stevia, así como para Ethmane (2009) en el secado de hojas de menta; Toledo(2007), manifiesta que durante el secado de las hojas el agua es removida desde la superficie, y a medida que el tiempo de secado transcurre, la velocidad de secado disminuye debido al menor contenido de agua disponible en la superficie, por otra parte, Geankoplis (1998) indica que durante el periodo de velocidad constante, la

superficie del sólido está muy mojada al principio y sobre todo hay una película de agua continua. Esta capa de agua, es agua no combinada y actúa como si el sólido no estuviera presente.

4.4. Determinación del Coeficiente de Difusividad Efectiva - Def

En la Figura 15 se presenta la gráfica entre $\ln(RX)$ con el tiempo, para las temperaturas de 40, 50 y 60 °C, los cuales fueron ajustados al modelo lineal para obtener el pendiente de la ecuación 23, esto mediante la ecuación resumida de segunda ley de Fick, se calculó la difusividad para cada temperatura de secado de las hojas de pachataya – pampa taya, a partir de la pendiente de la ecuación linealizada, los resultados se muestran en la Tabla 11.

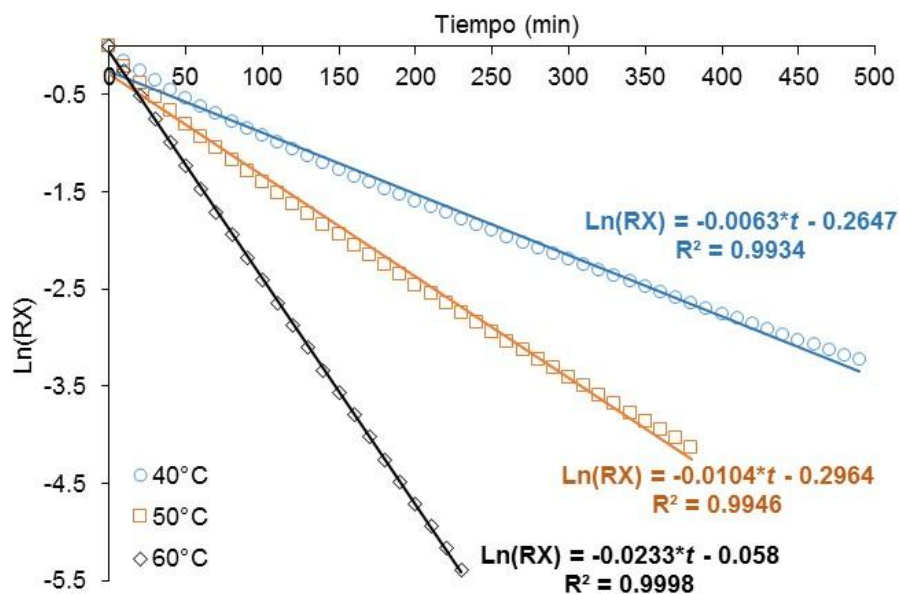


Figura 14. Logaritmo de la razón de humedad con el tiempo de secado.

Tabla 11. Valores del Coeficiente de difusividad efectiva del agua

T (°C)	Espesor de hoja- L (m)	pendiente	Difusividad – Def (m ² /seg)	R ²
40	0.0004	0.0063	6.47E-12	0.9934
50	0.0004	0.0104	1.07E-11	0.9946
60	0.0004	0.0233	2.39E-11	0.9998

En la Tabla 11 se observa la difusividad en el secado de las hojas de pachataya – pampa taya para las temperaturas de estudio (40, 50 y 60 °C), en donde se puede distinguir claramente que la difusividad adquiere un valor para temperatura de secado, es decir que a mayor temperatura se obtiene mayor

difusión del agua, por ende menor tiempo de secado. La difusión del agua ocurre en periodo de velocidad decreciente, ya que este periodo se caracteriza por presentar mayor tiempo en el secado. La difusividad de pachataya – pampa taya ha sido obtenida a partir de la ecuación linealizada integrada de la segunda ley de Fick, cuyos valores oscilan entre 6.47×10^{-12} a $2.39 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ con coeficientes de correlación $r^2 > 0.9934$, para un espesor promedio de la hoja de $4 \times 10^{-4} \text{ m}$.

Geankoplis (1998), indica este comportamiento es usual para el secado de este tipo de materiales y que la D_{ef} se encuentra comprendidos entre 1×10^{-12} a $1 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, Lema et al. (2007), indica que la difusividad efectiva muestra dependencia tipo Arrhenius con la temperatura, asimismo la difusividad efectiva depende de las características del aire de secado y de las demás propiedades físico-químicas de la especie estudiada (Rizvi, 1986) siendo la esta explicación para la diversidad de resultados encontrados en los trabajos relacionados con el tema.

Colque (2017), encontró valores de D_{ef} que oscilan entre 1.82×10^{-10} a 1.33×10^{-11} para el secado de hojas de Salvia en el intervalo de temperatura de 30 a 70°C; Aspurz (2011) encontró valores de la difusividad efectiva que variaron entre $0,689 \times 10^{-12}$ a $1,19 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ para rangos de temperatura de 30, 40, 50, 60 y 70°C para el secado de Tomillo (*Thymus vulgaris*); por otra parte Doymaz (2010) para el rango de temperatura de 40 a 60°C y velocidad del aire de 2 m/s observó que los valores oscilaron entre 1.097 a $5.99 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, aunque da Rocha (2012) reporta valores de D_{ef} que oscilan 3.69×10^{-12} a $1.19 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ en el rango de 30 °C a 70 °C los que difieren ligeramente a los reportados por Doymaz (2010); Therdthai y Zhou (2009) encontraron para el secado de las hojas de menta (*Mentha cordifolia*) valores de D_{ef} $0,96$ e $1,90 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ para la temperatura de 60 e 70 °C respectivamente, mientras que Silva (2008) encontró valores de D_{ef} para las hojas de cilantro (*Coriandrum sativum*) que oscilan entre 3.48×10^{-13} a $23.97 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ para el intervalo de temperatura de 50°C a 80°C.

Asimismo Jeria y Pozo (2011), en el secado convectivo de hojas de Stevia Rebaudiana encontró valores de difusividad de 2.240×10^{-10} , 3.805×10^{-10} y $4.131 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a 50, 60 y 70 °C, mientras que Espierriz (2011) muestra valores en un rango de 2.01×10^{-11} a $3.93 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, aunque esta depende de la geometría y constitución del material alimenticio a secar, es así que Barbosa et al. (2007)

muestra valores del coeficientes de difusividad efectiva que oscila entre 2.91×10^{-12} a $11,71 \times 10^{-12}$.

Es así que los resultados encontrados son congruentes a los resultados obtenidos para este tipo de material, como son las hojas de pachataya – pampataya.

4.5. Determinación de la Energía de Activación - Ea

Se graficó la difusividad efectiva D_{ef} vs T (Figura 16) con los resultados de la Tabla 11, Como puede observarse la influencia de las diferentes temperaturas de secado sobre el coeficiente de difusividad efectiva en cada una de las experiencias, se ajustó a una línea representativa de una relación tipo Arrhenius, por lo que de la pendiente de la ecuación 25, se han deducido los valores de energía de activación.

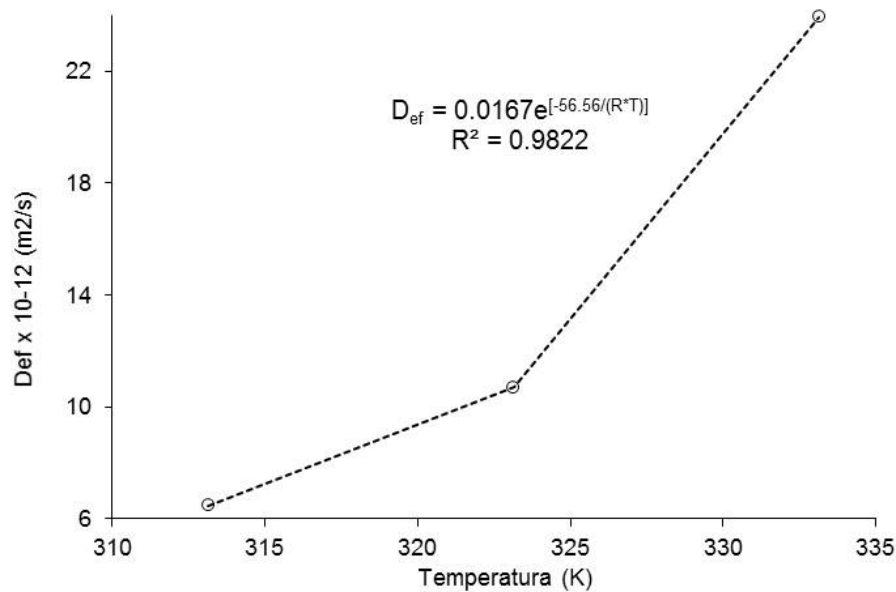


Figura 16. Relación de coeficiente de difusión efectiva vs temperatura absoluta.

En la figura 16 se aprecia la ecuación de Arrhenius, en el cual la energía de activación E_a requerida para iniciar la difusión de la humedad en las hojas de pampataya través del sólido fue de $56.56 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, este valor es muy próximo encontrado por García (2014) cuyo valor fue de $77.16 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, Rodríguez. (2013) al trabajar en el secado de esta misma especie, siendo el valor encontrado de $49.42 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. Barbosa *et al.* (2007) para las hojas de verbena brasileña aroma limón (*Lippia alba*) encontró el valor de la energía de activación de $31,79$

kJ mol^{-1} , se debe considerar que cuanto mayor es el tiempo de permanencia para una determinada temperatura, mayor será la transferencia de calor y consecuentemente mayor será la energía de activación necesaria para la difusión del agua (Espierri, 2011).

De otro lado el factor de Arrhenius D_0 , cuyo valor fue $0.0167 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, el cual generalmente es considerado un parámetro estructural que cinético (Martínez, 1998), así valores altos de D_0 implican una débil resistencia a la difusión (Turhan y Kaletunç, 1992), Choque et al., (2017) encontraron valores de $2.9\text{E}-4 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$;

4.6. Metodología para describir la Clasificación Taxonómica

Para la clasificación taxonómica se describió con la intervención de la Blga. Maria del Carmen Delgado Laime y el uso de (Germplasm Resources Information Network, (2007).

Reino: plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Subclase: Asteridae

Orden: Asterales

Familia: Asteraceae

Subfamilia: Asteroidea

Tribu: Astereae

Género: Baccharis

Especie: Baccharis caespitata

Nombre común: Pampa taya, pachataya

CONCLUSIONES

- La temperatura tiene un efecto significativo ($p\text{-value} < 0.05$) en las curvas de secado, puesto que se observa la dependencia de las curvas de secado a las temperaturas de 40,50 y 60 °C, ya que estos a mayor temperatura del aire del secado, se obtiene menor tiempo de secado.
- El modelo de Page es el que presenta mejor ajuste con $\%E < 10\%$ y $r^2 > 0.98$, para las hojas de pachataya – pampas tayas sometidas a secado a las temperaturas de 40,50 y 60 ° C.
- La evaluación de las curvas de velocidad de secado de las hojas de pachataya – pampa taya, muestra que se presenta mayor velocidad de eliminación de agua a temperaturas mayores, y que para humedades menores de 0.5 g de agua/g s.s. la velocidad es similar en todos los casos.
- La difusividad efectiva del agua durante el secado de las hojas de pachataya – pampa taya, se incrementa de $6.47E-12$ a $2.39E-11$ $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ en el intervalo de 40 a 60°C, lo que indica que la temperatura tiene efecto significativo ($P\text{-VALUE} < 0.05$) así como la dependencia con esta.
- La energía de activación para el secado de las hojas de pachataya – pampa taya, para en el intervalo de 40 a 60°C, fue de 56.56 kJ/mol de agua.
- El nombre científico de la pachataya – pampa taya es (***Baccharis caespitata***).

RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio del efecto de la temperatura en los aceites esenciales de la pachataya – pampa taya.
- Desarrollar un prototipo de un secador que considera las condiciones estudiadas de temperatura.
- Realizar un estudio de análisis organolépticos de las hojas secadas de la pachataya – pampa taya.
- Realizar un estudio del secado de hojas de pachataya – pampa taya, considerando variables a la velocidad de aire y humedad relativa del aire.

SUGERENCIAS

- Se sugiere realizar un estudio biológico, químico y físico de la pachataya – pampa taya
- Se sugiere realizar un estudio de mercado de las hojas de pachataya – pampa taya deshidratadas para su comercialización.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A.O.A.C. (1998). Official method of analysis. Association of official analytical chemists. EUA, Vol II, Edic. 16.
- Aguirre, R., Gabito, J., y Chirife, J. (1985). Utilización de la segunda ley de Fick para la evaluación del coeficiente de difusión en el proceso de alimento controlada por la difusión interna. Tecnología de los alimentos, Vol.20.
- Alizaga, R. (1985). Efecto de la temperatura de secado y del contenido de humedad durante el almacenamiento sobre la calidad de la semilla de frijol, Segunda Edición, Costa Rica.
- Arends, K., Gutiérrez, M. (2008). Características de secado y modelado matemático para el bagazo de caña de azúcar tratado y no tratado en una planta piloto PDA. Trabajo de grado. Universidad Rafael Urdaneta. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Maracaibo, Venezuela.
- Aspurz, J. (2011). *Obtención de curvas de secado de tomillo (thymus vulgaris)*. (Tesis de pregrado). Universidad Pública de Navarra. Vicosa Minas Gerais, Brasil.
- Barbosa, F., Melo, E., Santos, E., Rocha, P., Martinazzo, A. y Randunz, L. (2007). Evaluación de modelos matemáticos para la predicción de capa fina de hojas de verbena brasileña aroma limón (*Lippia alba*). *Revista brasileña de productos agroindustriales*, 9(1).
- Canovas, A. (2005). Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos. España: Editorial AEDOS.
- Carranza J. (2011). *Cinética de secado del plátano (Musa paradisiaca) y de la yuca (Manihot esculenta Crantz)*. Trabajo de Fin de Carrera, Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), Iquitos, Perú.
- Choque, D.; Ligarda, C.A., Taípe, F. (2017). Influencia del proceso de secado en el color de las hojas de punamuña (Satureja boliviana). Informe final de investigación, UNAJMA, Andahuaylas, Perú.
- Colque, L. (2017). Evaluación del proceso de secado y su influencia en el color de la salvia (*Salvia officinalis*), Tesis de maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos, UNSAAC, Cusco, Perú.
- Coulson J.; Richardson, J. (1978). Operaciones Unitarias II Ingeniería Química, 3ra ed. Oxford: Editorial Pergamon.
- Crank, J. (1975). The mathematics of diffusion . 2da ed., Clarendon Press: Oxford.

- da Rocha, R.; Melo, E.; Corbín, J.; Berbert, P.; Donzeles, S.; Tabar, J. (2012). Cinética del secado de tomillo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* V.16, N° 6.
- Doymaz, I.; Tugrul, N.; Pala, M. (2006). Drying Characteristics Of Dill And Parsley Leaves. *Journal of Food Engineering*.
- Espierriz, J. (2011). Obtención de curva de secado de hierba limón (*Cymbopogon citratus*). (Tesis de pregrado). Universidad Pública de Navarra, Vicoso Minas Gerias, Brasil.
- Ethmane. (2009). Evaluation of drying parameters and sorption isotherms of mint Leaves (*M. pulegium*). *Revue des Energies Renouvelables* , p449 – 470.
- Fito, P., Andrés A., Barat J., Albors A. (2001). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. Valencia, editorial U.P.V.
- Frazier, W. (2003). *Microbiología de los Alimentos* (4ta Ed.). Editorial Acriba: Zaragoza, España.
- Garcia, F. (2014). Evaluación de los efectos del proceso de secado sobre la calidad de la stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) y la hierbabuena (*Mentha spicata*). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Garcia, S., Schmalko, M. y Tanzariello, A. (2007). Isotermas de adsorción y cinetica de secado de ciertas hortalizas y aromáticas cultivasdas en misiones. *Agencia de Extensión Rural Oberá- INTA*, 36 (1)
- Geankoplis, C. (1998). *Procesos de transporte y Operaciones Unitarias* (3ra ed.). Editorial, SACCE: México.
- Germplasm Resources Information Network (2007). United States Department of Agriculture.
- Gutiérrez, H. y vara, R. (2008). *Análisis y diseño de Experimentos* (2da ed.). México: Editorial McGraw Hill.
- Ibarz, A. (2005). *Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos*. España: Editorial, Grupo Mundi.
- Jeria, M y Pozo, A. (2011). *Estudio del secado convectivo de hojas de stevia rebaudiana y factibilidad técnico-económico de una plantas elaboradora de edulcorante a base de stevia*. (Tesis de pre grado).Universidad de Chile, Santiago, Chile.

- Lema, A., Pontin, M., Sanmartino, A., Ziletti, M y Martinello, M. (2007). Características del proceso de secado en capa delgada del perejil. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol.11.
- Lomas, M. (1998). Tecnología de los alimento. Zaragoza, España: Editorial ACRIBIA.
- Martínez, N. (1998). Termodinámica y cinética de sistemas: Alimento entorno. Servicio de publicación, Venezuela: editorial AND.
- Mujumdar, A. (2006). Principio, Clasificación y Selección de Secado. Handbook of Industrial Drying.
- Muñoz, F. (1996). Plantas Medicinales y Aromáticas; estudio, cultivo y procesado (2da ed.). Madrid, España: Editorial Mundi Prensa.
- Muñoz, F. (2002). Estudio del cultivo y procesamiento de plantas medicinales y aromaticas,(4 ta ed.). Madrid, España: Editorial Mundi Prensa.
- Paul, R y Heldman, D. (2001). Introducción a la ingeniería de los alimentos. Zaragoza, España: Editorial ACRIBIA.
- Pineda, M., Chancon, A. y Cordero, G. (2009). Efecto sobre las condiciones de secado sobre la cinética de deshidratación de las hojas de morera (Muros alba). *Agronomía mesoamericana*, 20(2).
- Rizvi, S.S.H. (1986). Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: RAO, M.A. & RIZVI, S.S.H. (eds.). *Engineering Properties of Foods*. New York: Marcel Dekker Inc.
- Rocha, R., Melo, E., Corbin, J., Berbert, T.; Donzeles, L. (2012). Cinética del secado de tomillo. *Revista brasileña de Ingeniería Agrícola y Ambiental*, 16(6).
- Sharma, S., Mulvaney, S.; Rizvi, S. (2003). Ingeniería de alimentos: operaciones unitarias y prácticas en laboratorio. México: Editorial LIMUSA WILEY.
- Taharazako. (1985). Fundamental drying characteristics of stevia, *Stevia rebaudiana* Bertoni [Compositae]. *Bulletin of the Faculty of Agriculture - Kagoshima University*, p215-219
- Toledo. (2007). Dehydration. In R. Toledo, *Fundamentals of Food Process Engineering*. Georgia: Springer, p443-458.
- Treybal, R. (200). Operaciones transferencia de masa (2da ed.). México: Mc Graw Hill.

- Vázquez, G., Chenlo, F., Moreira, R. and Costoyas, A. (1999) The dehydration of garlic. 1. Desorption isotherms and modelling of drying kinetics. *Drying Technology*, v17, p1095-1108
- Vega, A. (2007). Simulación matemática del proceso de secado de la gracilaria chilena (*Gracilaria Chilensis*). *Revista chilena de Ingeniería*, 15(1).
- A. Vega y R. Lemus. (2006). Modelado de la cinética de secado de la papaya chilena (*Vasconcellea pubescens*)". *Revista Información Tecnológica*. v27(3), p23-31.
- Vizcarra, M. (1998). Efecto del contenido de humedad y la temperatura en la determinación de la difusividad del agua durante el secado de trigo en lecho fluidificado. *Ciencias ediciones IMIQ*, 3(1).
- Warren, L. Smith, J. y Harriott. P. (1991). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. Madrid, España: McGraw-Will.

ANEXO

ANEXO 1. PANEL DE FOTOGRAFÍA



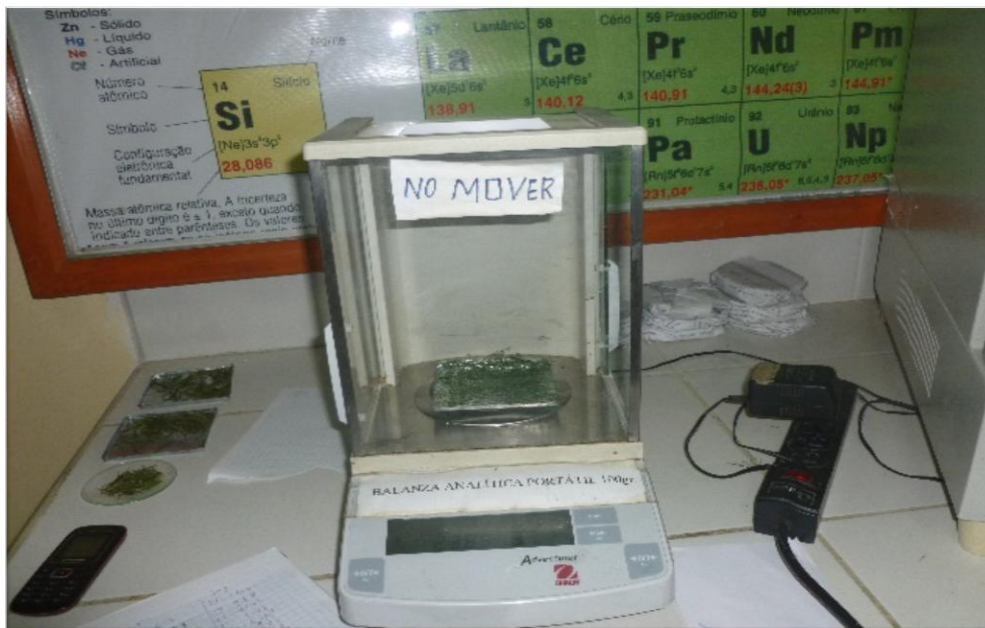
Hojas frescas de pachataya – pampa taya



Selección de hojas de pachataya – pampa taya



Secado de la muestra



Pesado de las hojas de pachataya – pampa taya



Acondicionado de bandejas en el secador



Medición de la velocidad de aire

ANEXO 2. ANALISIS MULTIPLE DE LA HUMEDAD DE EQUILIBRIO O FINAL

ANEXO 2.1: Análisis múltiple de la Humedad de equilibrio o final

Humedad final o de equilibrio

	40 °C	50 °C	60 °C
Replica 01	0.1042	0.0682	0.0624
Replica 02	0.1049	0.0701	0.0593
Replica 03	0.1072	0.0649	0.0617

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
60	3	0.06113	X
50	3	0.06773	X
40	3	0.10543	X

Contraste	Sig.	Diferencia +/-	Límites
40 - 50	*	0.0377	0.00501677
40 - 60	*	0.0443	0.00501677
50 - 60	*	0.0066	0.00501677

* indica una diferencia significativa.

ANEXO 3. DATOS DE HUMEDAD DURANTE EL SECADO

**ANEXO 3.1: Datos de humedad durante el secado
A 40°C**

t (min)	Variación de la fracción de peso (FP)				Variación de la humedad			Fracción de agua (FA)			Promedio FA	40°C-Experimental	
	FP1	FP2	FP3	Prom FA	A1	A2	A3	FA1	FA2	FA3		t(min)	RX
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.7164	0.7164	0.7164	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0	1.0000
10	0.9383	0.9480	0.9403	0.9422	0.6547	0.6645	0.6568	0.9139	0.9275	0.9167	0.9194	10	0.9053
20	0.8897	0.8857	0.8778	0.8844	0.6061	0.6021	0.5942	0.8460	0.8404	0.8294	0.8386	20	0.8106
30	0.7924	0.8485	0.8390	0.8267	0.5088	0.5650	0.5554	0.7102	0.7886	0.7753	0.7580	30	0.7160
40	0.7417	0.8014	0.7950	0.7794	0.4581	0.5178	0.5114	0.6394	0.7228	0.7138	0.6920	40	0.6385
50	0.7079	0.7566	0.7617	0.7421	0.4243	0.4731	0.4782	0.5923	0.6603	0.6674	0.6400	50	0.5774
60	0.6791	0.7268	0.7259	0.7106	0.3956	0.4432	0.4423	0.5521	0.6186	0.6173	0.5960	60	0.5258
70	0.6491	0.6989	0.6978	0.6819	0.3655	0.4154	0.4142	0.5102	0.5798	0.5781	0.5560	70	0.4788
80	0.6320	0.6785	0.6634	0.6580	0.3484	0.3949	0.3798	0.4863	0.5513	0.5302	0.5226	80	0.4396
90	0.6066	0.6681	0.6382	0.6377	0.3230	0.3845	0.3547	0.4509	0.5367	0.4951	0.4942	90	0.4063
100	0.5986	0.6488	0.6125	0.6200	0.3151	0.3652	0.3289	0.4398	0.5098	0.4591	0.4696	100	0.3773
110	0.5790	0.6354	0.5990	0.6045	0.2955	0.3518	0.3154	0.4124	0.4911	0.4403	0.4479	110	0.3519
120	0.5623	0.6192	0.5898	0.5905	0.2787	0.3357	0.3063	0.3890	0.4685	0.4275	0.4284	120	0.3289
130	0.5503	0.6044	0.5778	0.5775	0.2667	0.3208	0.2942	0.3723	0.4478	0.4107	0.4103	130	0.3077
140	0.5394	0.5878	0.5704	0.5658	0.2559	0.3042	0.2868	0.3571	0.4246	0.4003	0.3940	140	0.2886
150	0.5292	0.5749	0.5618	0.5553	0.2456	0.2914	0.2783	0.3428	0.4067	0.3884	0.3793	150	0.2714
160	0.5201	0.5689	0.5501	0.5463	0.2365	0.2853	0.2665	0.3301	0.3983	0.3720	0.3668	160	0.2567
170	0.5104	0.5640	0.5402	0.5382	0.2269	0.2805	0.2566	0.3167	0.3915	0.3582	0.3555	170	0.2434
180	0.5021	0.5559	0.5349	0.5310	0.2185	0.2724	0.2513	0.3050	0.3802	0.3508	0.3453	180	0.2315
190	0.4959	0.5493	0.5283	0.5245	0.2123	0.2657	0.2448	0.2963	0.3709	0.3416	0.3363	190	0.2209
200	0.4863	0.5474	0.5227	0.5188	0.2027	0.2639	0.2392	0.2830	0.3683	0.3338	0.3284	200	0.2116
210	0.4795	0.5445	0.5165	0.5135	0.1960	0.2609	0.2329	0.2735	0.3642	0.3251	0.3209	210	0.2028
220	0.4752	0.5390	0.5104	0.5082	0.1917	0.2555	0.2268	0.2675	0.3566	0.3166	0.3136	220	0.1942
230	0.4691	0.5319	0.5074	0.5028	0.1855	0.2483	0.2239	0.2590	0.3466	0.3125	0.3060	230	0.1853
240	0.4648	0.5281	0.5005	0.4978	0.1813	0.2445	0.2169	0.2530	0.3413	0.3028	0.2990	240	0.1771
250	0.4613	0.5230	0.4940	0.4928	0.1777	0.2394	0.2104	0.2481	0.3342	0.2937	0.2920	250	0.1689
260	0.4579	0.5197	0.4859	0.4878	0.1744	0.2362	0.2023	0.2434	0.3296	0.2824	0.2851	260	0.1608
270	0.4529	0.5140	0.4820	0.4830	0.1694	0.2305	0.1985	0.2364	0.3217	0.2770	0.2784	270	0.1529
280	0.4488	0.5117	0.4745	0.4783	0.1653	0.2281	0.1909	0.2307	0.3184	0.2665	0.2719	280	0.1452
290	0.4467	0.5010	0.4740	0.4739	0.1631	0.2175	0.1905	0.2276	0.3035	0.2658	0.2657	290	0.1380
300	0.4441	0.4966	0.4681	0.4696	0.1605	0.2130	0.1846	0.2240	0.2973	0.2576	0.2596	300	0.1309
310	0.4437	0.4884	0.4634	0.4652	0.1601	0.2049	0.1799	0.2235	0.2860	0.2511	0.2535	310	0.1237
320	0.4407	0.4797	0.4616	0.4607	0.1571	0.1961	0.1780	0.2193	0.2737	0.2485	0.2472	320	0.1163
330	0.4350	0.4777	0.4560	0.4562	0.1514	0.1942	0.1724	0.2113	0.2710	0.2406	0.2410	330	0.1090
340	0.4313	0.4721	0.4523	0.4519	0.1477	0.1885	0.1687	0.2062	0.2631	0.2355	0.2349	340	0.1019
350	0.4267	0.4674	0.4485	0.4475	0.1431	0.1838	0.1649	0.1998	0.2566	0.2302	0.2289	350	0.0947
360	0.4252	0.4590	0.4455	0.4433	0.1417	0.1755	0.1620	0.1977	0.2449	0.2261	0.2229	360	0.0878
370	0.4233	0.4507	0.4432	0.4391	0.1398	0.1671	0.1596	0.1951	0.2332	0.2228	0.2170	370	0.0809
380	0.4202	0.4462	0.4378	0.4347	0.1366	0.1626	0.1543	0.1907	0.2270	0.2153	0.2110	380	0.0738
390	0.4152	0.4397	0.4367	0.4305	0.1317	0.1561	0.1531	0.1838	0.2179	0.2137	0.2051	390	0.0669
400	0.4146	0.4313	0.4337	0.4266	0.1311	0.1478	0.1502	0.1829	0.2062	0.2096	0.1996	400	0.0604
410	0.4112	0.4262	0.4308	0.4227	0.1276	0.1426	0.1472	0.1781	0.1990	0.2055	0.1942	410	0.0541
420	0.4072	0.4216	0.4278	0.4189	0.1236	0.1381	0.1443	0.1725	0.1927	0.2014	0.1889	420	0.0478
430	0.4046	0.4157	0.4249	0.4151	0.1210	0.1322	0.1413	0.1689	0.1845	0.1973	0.1835	430	0.0415
440	0.4011	0.4136	0.4195	0.4114	0.1175	0.1300	0.1359	0.1641	0.1815	0.1897	0.1784	440	0.0355
450	0.3986	0.4087	0.4157	0.4076	0.1150	0.1251	0.1321	0.1605	0.1746	0.1844	0.1732	450	0.0294
460	0.3968	0.4054	0.4100	0.4041	0.1132	0.1218	0.1264	0.1580	0.1701	0.1764	0.1682	460	0.0235
470	0.3950	0.4022	0.4038	0.4003	0.1115	0.1186	0.1203	0.1556	0.1655	0.1679	0.1630	470	0.0174
480	0.3943	0.3988	0.3972	0.3968	0.1107	0.1153	0.1136	0.1546	0.1609	0.1586	0.1580	480	0.0116
490	0.3908	0.3938	0.3948	0.3931	0.1072	0.1102	0.1112	0.1496	0.1539	0.1552	0.1529	490	0.0056
500	0.3885	0.3892	0.3914	0.3897	0.1049	0.1056	0.1079	0.1464	0.1474	0.1506	0.1481	500	0.0000

A 50°C

t (min)	Variación de la fracción de peso (FP)				Variación de la humedad			Fracción de agua (FA)			Promedio FA	50°C-Experimental	
	FP1	FP2	FP3	Prom FA	A1	A2	A3	FA1	FA2	FA3		t(min)	RX
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.7164	0.7164	0.7164	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0	1.0000
10	0.9010	0.8996	0.9073	0.9026	0.6174	0.6160	0.6237	0.8618	0.8598	0.8706	0.8641	10	0.8497
20	0.8181	0.7840	0.8149	0.8056	0.5345	0.5005	0.5313	0.7461	0.6985	0.7416	0.7287	20	0.7001
30	0.7354	0.7218	0.7360	0.7311	0.4518	0.4382	0.4524	0.6307	0.6117	0.6315	0.6246	30	0.5850
40	0.6821	0.6732	0.6679	0.6744	0.3986	0.3897	0.3843	0.5563	0.5439	0.5364	0.5455	40	0.4975
50	0.6273	0.6384	0.6322	0.6327	0.3437	0.3549	0.3487	0.4798	0.4953	0.4867	0.4873	50	0.4331
60	0.5946	0.6067	0.5983	0.5999	0.3111	0.3231	0.3148	0.4342	0.4510	0.4393	0.4415	60	0.3825
70	0.5715	0.5838	0.5634	0.5729	0.2879	0.3002	0.2798	0.4018	0.4190	0.3906	0.4038	70	0.3409
80	0.5468	0.5573	0.5440	0.5494	0.2633	0.2738	0.2604	0.3675	0.3821	0.3635	0.3710	80	0.3046
90	0.5249	0.5352	0.5248	0.5283	0.2414	0.2516	0.2413	0.3369	0.3512	0.3368	0.3416	90	0.2721
100	0.5078	0.5162	0.5034	0.5091	0.2242	0.2326	0.2198	0.3130	0.3247	0.3068	0.3149	100	0.2425
110	0.4929	0.4962	0.4877	0.4923	0.2093	0.2127	0.2041	0.2921	0.2969	0.2849	0.2913	110	0.2165
120	0.4791	0.4810	0.4718	0.4773	0.1955	0.1975	0.1882	0.2729	0.2756	0.2627	0.2704	120	0.1934
130	0.4599	0.4720	0.4620	0.4646	0.1763	0.1884	0.1785	0.2461	0.2630	0.2491	0.2527	130	0.1738
140	0.4502	0.4592	0.4515	0.4537	0.1666	0.1757	0.1680	0.2326	0.2452	0.2345	0.2374	140	0.1569
150	0.4405	0.4500	0.4426	0.4444	0.1569	0.1665	0.1590	0.2191	0.2324	0.2219	0.2244	150	0.1426
160	0.4313	0.4429	0.4350	0.4364	0.1477	0.1593	0.1514	0.2062	0.2224	0.2113	0.2133	160	0.1302
170	0.4240	0.4360	0.4289	0.4296	0.1404	0.1524	0.1453	0.1960	0.2127	0.2029	0.2039	170	0.1198
180	0.4181	0.4302	0.4230	0.4237	0.1345	0.1466	0.1394	0.1878	0.2046	0.1946	0.1957	180	0.1107
190	0.4110	0.4290	0.4151	0.4184	0.1275	0.1454	0.1316	0.1779	0.2030	0.1836	0.1882	190	0.1025
200	0.4064	0.4212	0.4113	0.4130	0.1228	0.1376	0.1278	0.1714	0.1921	0.1783	0.1806	200	0.0941
210	0.4010	0.4176	0.4055	0.4080	0.1174	0.1340	0.1219	0.1639	0.1870	0.1701	0.1737	210	0.0865
220	0.3908	0.4173	0.4016	0.4032	0.1073	0.1337	0.1180	0.1497	0.1867	0.1647	0.1670	220	0.0791
230	0.3881	0.4117	0.3961	0.3986	0.1045	0.1282	0.1125	0.1459	0.1789	0.1570	0.1606	230	0.0720
240	0.3822	0.4070	0.3936	0.3943	0.0987	0.1234	0.1100	0.1377	0.1723	0.1536	0.1545	240	0.0653
250	0.3788	0.4012	0.3928	0.3909	0.0953	0.1176	0.1092	0.1330	0.1642	0.1524	0.1499	250	0.0601
260	0.3777	0.3975	0.3892	0.3881	0.0941	0.1139	0.1056	0.1313	0.1590	0.1474	0.1459	260	0.0558
270	0.3771	0.3940	0.3880	0.3863	0.0936	0.1104	0.1044	0.1306	0.1541	0.1457	0.1435	270	0.0530
280	0.3766	0.3901	0.3847	0.3838	0.0930	0.1065	0.1012	0.1298	0.1486	0.1412	0.1399	280	0.0491
290	0.3749	0.3861	0.3807	0.3806	0.0913	0.1026	0.0971	0.1275	0.1431	0.1356	0.1354	290	0.0441
300	0.3748	0.3824	0.3768	0.3780	0.0912	0.0989	0.0932	0.1273	0.1380	0.1302	0.1318	300	0.0402
310	0.3743	0.3778	0.3732	0.3751	0.0908	0.0942	0.0897	0.1267	0.1315	0.1251	0.1278	310	0.0357
320	0.3722	0.3773	0.3692	0.3729	0.0886	0.0937	0.0857	0.1237	0.1308	0.1196	0.1247	320	0.0323
330	0.3697	0.3712	0.3655	0.3688	0.0861	0.0876	0.0819	0.1202	0.1223	0.1143	0.1189	330	0.0259
340	0.3633	0.3679	0.3612	0.3642	0.0797	0.0844	0.0777	0.1113	0.1177	0.1084	0.1125	340	0.0188
350	0.3629	0.3662	0.3573	0.3621	0.0793	0.0827	0.0737	0.1107	0.1154	0.1029	0.1097	350	0.0157
360	0.3592	0.3619	0.3529	0.3580	0.0756	0.0783	0.0694	0.1056	0.1093	0.0968	0.1039	360	0.0093
370	0.3558	0.3578	0.3493	0.3543	0.0723	0.0743	0.0657	0.1009	0.1037	0.0917	0.0988	370	0.0036
380	0.3525	0.3543	0.3491	0.3520	0.0689	0.0708	0.0656	0.0962	0.0988	0.0915	0.0955	380	0.0000

A 60°C

t (min)	Variación de la fracción de peso (FP)				Variación de la humedad			Fracción de agua (FA)			Promedio FA	60°C- Experimental	
	FP1	FP2	FP3	Prom FA	A1	A2	A3	FA1	FA2	FA3		t(min)	RX
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.7164	0.7164	0.72	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0	1.0000
10	0.8666	0.8980	0.8501	0.8716	0.5831	0.6144	0.57	0.8138	0.8576	0.7908	0.8207	10	0.8040
20	0.7609	0.7919	0.6782	0.7437	0.4773	0.5084	0.39	0.6662	0.7096	0.5509	0.6422	20	0.6089
30	0.6403	0.7251	0.5787	0.6481	0.3567	0.4416	0.30	0.4979	0.6164	0.4120	0.5088	30	0.4629
40	0.5587	0.6695	0.4992	0.5758	0.2751	0.3860	0.22	0.3840	0.5387	0.3010	0.4079	40	0.3527
50	0.4905	0.6154	0.4664	0.5241	0.2070	0.3319	0.18	0.2889	0.4632	0.2551	0.3358	50	0.2738
60	0.4644	0.5463	0.4489	0.4866	0.1809	0.2628	0.17	0.2524	0.3667	0.2308	0.2833	60	0.2165
70	0.4456	0.5052	0.4272	0.4594	0.1621	0.2217	0.14	0.2262	0.3094	0.2005	0.2454	70	0.1750
80	0.4261	0.4787	0.4092	0.4380	0.1425	0.1952	0.13	0.1989	0.2724	0.1754	0.2156	80	0.1424
90	0.4042	0.4594	0.4027	0.4221	0.1207	0.1758	0.12	0.1684	0.2454	0.1662	0.1933	90	0.1181
100	0.3927	0.4395	0.3946	0.4089	0.1091	0.1559	0.11	0.1523	0.2176	0.1550	0.1750	100	0.0980
110	0.3801	0.4257	0.3886	0.3981	0.0965	0.1422	0.11	0.1347	0.1984	0.1466	0.1599	110	0.0815
120	0.3745	0.4105	0.3831	0.3894	0.0909	0.1270	0.10	0.1269	0.1772	0.1389	0.1477	120	0.0682
130	0.3618	0.3973	0.3862	0.3818	0.0783	0.1137	0.10	0.1093	0.1587	0.1432	0.1371	130	0.0566
140	0.3603	0.3874	0.3793	0.3757	0.0767	0.1038	0.10	0.1071	0.1449	0.1337	0.1285	140	0.0472
150	0.3574	0.3718	0.3790	0.3694	0.0738	0.0882	0.10	0.1031	0.1232	0.1332	0.1198	150	0.0377
160	0.3516	0.3653	0.3785	0.3651	0.0681	0.0817	0.09	0.0950	0.1140	0.1325	0.1139	160	0.0312
170	0.3513	0.3565	0.3747	0.3608	0.0678	0.0730	0.09	0.0946	0.1018	0.1272	0.1079	170	0.0246
180	0.3507	0.3559	0.3703	0.3590	0.0672	0.0724	0.09	0.0938	0.1010	0.1211	0.1053	180	0.0218
190	0.3490	0.3524	0.3658	0.3557	0.0654	0.0689	0.08	0.0913	0.0961	0.1147	0.1007	190	0.0168
200	0.3484	0.3486	0.3607	0.3526	0.0648	0.0651	0.08	0.0905	0.0908	0.1077	0.0963	200	0.0120
210	0.3481	0.3448	0.3575	0.3501	0.0645	0.0613	0.07	0.0900	0.0855	0.1032	0.0929	210	0.0083
220	0.3477	0.3437	0.3546	0.3486	0.0641	0.0601	0.07	0.0895	0.0839	0.0991	0.0908	220	0.0060
230	0.3460	0.3428	0.3453	0.3447	0.0624	0.0593	0.06	0.0872	0.0827	0.0862	0.0853	230	0.0000

ANEXO 4. DATOS PARA CALCULAR LAS CURVAS DE VELOCIDAD

Anexo 4.1: Datos para calcular las curvas de velocidad

A 40°C

t (min)	FA	Xt	dXt	dt	V (g agua/min-m ²)
0	1.0000	3.5265			
10	0.9194	3.2421	0.2844	10	0.8064
20	0.8386	2.9575	0.2847	10	0.8072
30	0.7580	2.6733	0.2842	10	0.8059
40	0.6920	2.4405	0.2328	10	0.6601
50	0.6400	2.2570	0.1835	10	0.5203
60	0.5960	2.1019	0.1551	10	0.4397
70	0.5560	1.9608	0.1411	10	0.4001
80	0.5226	1.8430	0.1179	10	0.3343
90	0.4942	1.7429	0.1000	10	0.2836
100	0.4696	1.6559	0.0870	10	0.2468
110	0.4479	1.5796	0.0763	10	0.2163
120	0.4284	1.5106	0.0690	10	0.1958
130	0.4103	1.4469	0.0637	10	0.1807
140	0.3940	1.3895	0.0574	10	0.1627
150	0.3793	1.3376	0.0519	10	0.1470
160	0.3668	1.2935	0.0441	10	0.1252
170	0.3555	1.2535	0.0400	10	0.1133
180	0.3453	1.2178	0.0357	10	0.1012
190	0.3363	1.1859	0.0319	10	0.0905
200	0.3284	1.1580	0.0279	10	0.0792
210	0.3209	1.1318	0.0262	10	0.0743
220	0.3136	1.1058	0.0260	10	0.0738
230	0.3060	1.0792	0.0265	10	0.0753
240	0.2990	1.0544	0.0248	10	0.0703
250	0.2920	1.0297	0.0247	10	0.0701
260	0.2851	1.0055	0.0242	10	0.0686
270	0.2784	0.9817	0.0238	10	0.0674
280	0.2719	0.9587	0.0230	10	0.0652
290	0.2657	0.9369	0.0218	10	0.0619
300	0.2596	0.9157	0.0212	10	0.0602
310	0.2535	0.8940	0.0216	10	0.0613
320	0.2472	0.8717	0.0224	10	0.0634
330	0.2410	0.8499	0.0218	10	0.0619
340	0.2349	0.8285	0.0214	10	0.0606
350	0.2289	0.8070	0.0214	10	0.0608
360	0.2229	0.7861	0.0210	10	0.0595
370	0.2170	0.7654	0.0207	10	0.0586
380	0.2110	0.7441	0.0213	10	0.0603
390	0.2051	0.7234	0.0207	10	0.0587
400	0.1996	0.7039	0.0195	10	0.0554
410	0.1942	0.6849	0.0189	10	0.0537
420	0.1889	0.6660	0.0189	10	0.0536
430	0.1835	0.6473	0.0188	10	0.0533
440	0.1784	0.6292	0.0180	10	0.0511
450	0.1732	0.6107	0.0186	10	0.0526
460	0.1682	0.5931	0.0176	10	0.0499
470	0.1630	0.5748	0.0183	10	0.0518
480	0.1580	0.5573	0.0175	10	0.0497
490	0.1529	0.5392	0.0181	10	0.0513
500	0.1481	0.5224	0.0168	10	0.0475

Xs (kg s.s./kg hoja)
A (m²)

= 0.2836
= 0.01

A 50°C

t (min)	FA	Xt	dXt	dt	V (g agua/min-m ²)
0	1.0000	3.5265			
10	0.8641	3.0472	0.4793	10	1.3592
20	0.7287	2.5699	0.4774	10	1.3536
30	0.6246	2.2027	0.3672	10	1.0411
40	0.5455	1.9238	0.2789	10	0.7909
50	0.4873	1.7183	0.2055	10	0.5827
60	0.4415	1.5570	0.1614	10	0.4576
70	0.4038	1.4241	0.1329	10	0.3768
80	0.3710	1.3084	0.1157	10	0.3280
90	0.3416	1.2048	0.1036	10	0.2938
100	0.3149	1.1104	0.0944	10	0.2677
110	0.2913	1.0272	0.0831	10	0.2357
120	0.2704	0.9536	0.0736	10	0.2087
130	0.2527	0.8913	0.0624	10	0.1769
140	0.2374	0.8373	0.0540	10	0.1531
150	0.2244	0.7915	0.0458	10	0.1298
160	0.2133	0.7522	0.0393	10	0.1115
170	0.2039	0.7190	0.0332	10	0.0943
180	0.1957	0.6900	0.0290	10	0.0822
190	0.1882	0.6636	0.0264	10	0.0748
200	0.1806	0.6369	0.0267	10	0.0757
210	0.1737	0.6125	0.0244	10	0.0691
220	0.1670	0.5890	0.0235	10	0.0666
230	0.1606	0.5664	0.0226	10	0.0642
240	0.1545	0.5449	0.0214	10	0.0608
250	0.1499	0.5285	0.0165	10	0.0467
260	0.1459	0.5146	0.0138	10	0.0392
270	0.1435	0.5059	0.0087	10	0.0247
280	0.1399	0.4933	0.0126	10	0.0358
290	0.1354	0.4775	0.0158	10	0.0448
300	0.1318	0.4649	0.0126	10	0.0357
310	0.1278	0.4506	0.0143	10	0.0406
320	0.1247	0.4397	0.0109	10	0.0308
330	0.1189	0.4195	0.0203	10	0.0575
340	0.1125	0.3967	0.0228	10	0.0646
350	0.1097	0.3867	0.0100	10	0.0284
360	0.1039	0.3665	0.0202	10	0.0574
370	0.0988	0.3483	0.0182	10	0.0516
380	0.0955	0.3368	0.0115	10	0.0326

Xs (kg s.s./kg hoja) = 0.2836
A (m²) = 0.01

A 60°C

t (min)	FA	Xt	dXt	dt	V (g agua/min-m2)
0	1.0000	3.5265			
10	0.8207	2.8944	0.6322	10	1.7926
20	0.6422	2.2649	0.6295	10	1.7851
30	0.5088	1.7941	0.4707	10	1.3348
40	0.4079	1.4386	0.3556	10	1.0083
50	0.3358	1.1840	0.2545	10	0.7218
60	0.2833	0.9992	0.1848	10	0.5242
70	0.2454	0.8654	0.1338	10	0.3795
80	0.2156	0.7602	0.1051	10	0.2981
90	0.1933	0.6818	0.0784	10	0.2223
100	0.1750	0.6171	0.0647	10	0.1835
110	0.1599	0.5640	0.0531	10	0.1507
120	0.1477	0.5208	0.0432	10	0.1224
130	0.1371	0.4834	0.0375	10	0.1062
140	0.1285	0.4533	0.0301	10	0.0852
150	0.1198	0.4225	0.0308	10	0.0874
160	0.1139	0.4015	0.0210	10	0.0596
170	0.1079	0.3804	0.0211	10	0.0598
180	0.1053	0.3713	0.0091	10	0.0257
190	0.1007	0.3552	0.0161	10	0.0458
200	0.0963	0.3397	0.0154	10	0.0438
210	0.0929	0.3277	0.0120	10	0.0340
220	0.0908	0.3203	0.0074	10	0.0211
230	0.0853	0.3010	0.0193	10	0.0548

Xs (kg s.s./kg hoja) = 0.2836

A (m2) = 0.01

ANEXO 5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA HUMEDAD FINAL O DE EQUILIBRIO A LAS TEMPERATURAS DE SECADO

Anexo 5.1: Análisis estadístico para la humedad final o de equilibrio a las temperaturas de secado

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.0034	2	0.0017	427.35	0.00
Intra grupos	2.4E-05	6	4.0E-06		
Total (Corr.)	0.0035	8			

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Casos	Media	Grupos Homogéneos
60	3 0.06113	X
50	3 0.06773	X
40	3 0.10543	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
40 – 50	*	0.0377	0.00501677
40 – 60	*	0.0443	0.00501677
50 – 60	*	0.0066	0.00501677

* indica una diferencia significativa.

ANEXO 6. MATRIZ DE CONSISTENCIA

ANEXO 6.1: Matriz de Consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	DEFINICIÓN DE OPERACIONES				RECOLECCIÓN DE DATOS	
			VARIABLES	INDICADOR	VALOR ESCALAR	MÉTODO	TÉCNICA	INSTRUMENTO
GENERAL ¿Cómo influye la temperatura de secado en las hojas de pachataya – pampa taya?	GENERAL Evaluar el efecto de la temperatura de Secado en las hojas de pachataya – pampa taya	GENERAL La temperatura de secado influye significativamente en el secado en las hojas de pachataya – pampa taya	DE ENTRADA					
ESPECÍFICOS - ¿Cuál es el comportamiento de las curvas de secado de las hojas la pachataya – pampa taya a diferentes temperaturas? - ¿En qué medida se ajustaran modelos matemáticos a la cinética de secado de las hojas de pachataya – pampa taya a las temperaturas 40,50 y 60°C? - ¿Cómo se comportan las curvas de velocidad de secado de las hojas de pachataya – pampa taya a las temperaturas 40,50 y 60°C? - ¿En qué medida es posible determinar el coeficiente de difusividad efectiva para el secado hojas de pachataya – pampa taya a las temperaturas 40,50 y 60°C? - ¿Cuál es la energía de activación de secado de las hojas de la pachataya – pampa taya a las temperaturas de estudio? - ¿Cuál es la descripción taxonómica de las hojas de pachataya – pampa taya?	ESPECÍFICOS - Evaluar las curvas de secado de las hojas de la pachataya – pampa taya a las temperaturas 40,50 y 60°C. - Modelar las curvas de secado de las hojas de la pachataya – pampa taya a las temperaturas 40,50 y 60°C. - Evaluar la curva de velocidad de secado en las hojas de pachataya – pampa taya a las siguientes temperaturas 40,50 y 60°C. - Determinar el coeficiente de difusividad efectiva en las hojas de la pachataya – pampa taya a las temperaturas 40,50 y 60°C. - Determinar la energía de activación en las hojas de la pachataya – pampa taya a las siguientes temperaturas 40,50 y 60°C. - Describir taxonómicamente la planta en estudio.	ESPECÍFICAS - Las curvas de secado para las hojas de la pachataya – pampa taya presentan diferente comportamiento con la variación de temperatura. - Los modelos matemáticos propuestos se ajustan adecuadamente a la cinética de secado de las hojas de pachataya – pampa taya a las temperaturas 40,50 y 60°C. - La temperatura muestra efecto significativo en las curvas de velocidad de secado de las hojas de pachataya pampa taya - El coeficiente de difusividad efectiva Def del agua varía significativamente con la temperatura. - La energía de activación para el secado de las hojas de pachataya – pampa taya, varía significativamente cuando se somete a diferentes temperaturas. - La descripción taxonómica de las hojas de pachataya – pampa taya, permite clasificar adecuadamente a la planta.	Temperatura de secado	Temperatura	°C	Instrumental	Lectura	Termómetro
			DE SALIDA					
			Humedad final	Humedad en base seca	%	Instrumental	Pesado	Secador
			Tiempo de secado	Tiempo	minutos	Instrumental	Lectura	Cronometro
			Modelo matemático	Cofeciente de correlación r ²	Adimensio nal	Numérico	Calculo	Software
			Cofeciente de difusividad efectiva	Difusividad	m ² /s	Iterativo matemático	Iterativo matemático	Calculo/determinación indirecta
			Energía de activación	Energía de activación	kJ/mol	Iterativo matemático	Iterativo matemático	Calculo/determinación indirecta