

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



**DESHIDRATACIÓN DE LA PUNAMUÑA (*Satureja boliviana*) EN
SECADOR DE BANDEJAS**

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

TESISTA

Br. MONARES ESPINOZA, Higler

ASESOR

Ing. TAIPE PARDO, Fredy

ANDAHUAYLAS – PERÚ

2015

DEDICATORIA.

A Dios, porque a lo largo de mi formación profesional me ha enseñado que debo hacerme cargo de lo posible, y él se encargara de lo imposible.

Con todo cariño y amor para quienes me dieron la oportunidad de vivir, que han luchado juntos para que logre mis sueños, por motivarme y darme la mano incondicionalmente cuando más lo he necesitado, mis queridos padres **Ambrosio e Isabel**, a ustedes mi eterno agradecimiento.

A mis hermanas, quienes que me ayudaron a formarme y prepararme para los grandes retos de la vida diaria y a mi querida hija Anjhely por ser la fuerza y motivo para mi graduación. A mis queridos maestros y amigos.

Higler Monares Espinoza

PRESENTACION

La evaluación del estudio se realiza teniendo como objetivo la deshidratación de la punamuña (*Satureja boliviana*) en secador de bandejas, donde se determinó la humedad de equilibrio, las curvas de velocidad, la cinética de secado y el modelado de deshidratación en un secado convectivo así como las curvas de velocidad de secado, teniendo en cuenta los factores que influyen directamente en la cinética de secado sin embargo también existen otros factores que intervienen en el secado como los cambios de la propiedad del producto, es así que el estudio de la cinética de secado es esencial para diseñar un correcto proceso de secado que permita además obtener un producto de calidad. Por otro lado un buen modelo matemático del proceso de secado puede considerarse como una herramienta muy eficiente para salvar obstáculos, tales como, daños al producto, consumo excesivo de energía, desgaste del equipo o la disminución del rendimiento

El presente trabajo de investigación se desarrolló para optar el título profesional de Ingeniero Agroindustrial, en la Universidad Nacional José María Arguedas, facultad de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial (EPIA), el estudio se realizó en el laboratorio de química con el equipo de la estufa, bajo condiciones de temperatura y velocidad de aire cuyo informe evalúa la deshidratación de la punamuña (*Satureja boliviana*) en secador de bandejas, bajo condiciones de temperatura y velocidad de aire a una humedad relativa al 60%, obteniendo un producto deshidratado determinando el tiempo necesario de secado, energía necesaria y desgaste de los equipos.

Al ser el producto estacionario es decir perenne para su adquisición, es importante tener de manera permanente en el mercado local, nacional e internacional, las condiciones de secado que permitan conocer las variables tecnológicas de operación tales como la temperatura y humedad relativa es una alternativa para diversificar el consumo de la punamuña y así poder abaratar los costos de transporte, el secado de la Punamuña que ha sido poco estudiado; más aún si se toma en cuenta los hábitos actuales de consumo de productos deshidratados.

AGRADECIMIENTOS

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

A la Universidad Nacional José María Arguedas - Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial (EPIA), por haberme facilitado los laboratorios y equipos para realizar el presente trabajo de investigación.

A mis Padres Ambrosio Monares Palomino, Isabel Espinoza Flores por la voluntad, amor, apoyo y esfuerzo para lograr que sea una mejor persona y brindarme Mi educación, gracias por las oportunidades de la vida.

A mis hermanas Ruth, Marlhy, Katy y Xiomara y mi sobrina Dianna por la incentivación y por cada alegría que traen en mi vida, los amo.

A mi pareja Adeli y mi queridísima Hija Anjhely Isabel, quienes fueron la incentivación de mi graduación como Ingeniero Agroindustrial.

A mi asesor y amigo Ing. Fredy Taipe Pardo, por la dedicación de su tiempo, paciencia, apoyo y consejos para optar un buen resultado, el cual es la tan ansiada obtención del título profesional

A mis catedráticos: MSc. David Choque Quispe, MSc. Thomas Ancco Vizcarra, MSc. Abel Manuel Serna Herrera y demás profesores por compartirme sus experiencias académicas y personas los cuales coadyuvan en mi desenvolvimiento profesional

A mis familiares, amigos y compañeros quienes me colaboraron en el desarrollo de la tesis.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	ii
PRESENTACIÓN	iii
APROBACIÓN DEL ASESOR DE TESIS	iv
APROBACIÓN DEL JURADO EVALUADOR	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CUADROS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE ANEXOS	xi
ABREVIATURAS Y UNIDADES	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
I. INTRODUCCIÓN	01
1.1. ANTECEDENTES	02
1.2. PROCESO DE SECADO	03
1.2.1. Parámetros de secado	03
1.2.2. Periodos de secado	06
1.3. CINÉTICA DEL SECADO	08
1.4. MODELADO	09
1.4.1. Modelo matemático	10
1.4.2. Etapas para modelar	12
1.4.3. Modelos cinéticos de deshidratación de secado de alimentos	13
1.5. ISOTERMAS DE SORCIÓN	14
1.5.1. Modelos matemáticos para las isotermas de adsorción	18
1.5.2. Sistemas de medición de isotermas de adsorción	19
1.6. PUNAMUÑA	20
1.6.1. Distribución	20
1.6.2. Estudio botánico	21

1.6.3. Características etnobotánicas	22
1.6.4. Variedades y sinonimia	23
1.7. JUSTIFICACIÓN	24
1.8. OBJETIVOS	25
II. MATERIALES Y MÉTODOS	
2.1. LUGAR DE EJECUCIÓN	26
2.2. MATERIAL DE ESTUDIO	26
2.2.1. Población	26
2.2.2. Muestra	26
2.2.3. Unidad de análisis	26
2.3. DISEÑO DE CONTRASTACIÓN	27
2.4. MÉTODOS Y TÉCNICAS	27
2.4.1. Métodos para el desarrollo del secado de la punamuña	27
A. Recolección de puna muña	27
B. Acondicionamiento de las muestras	28
C. Determinación de humedad inicial	28
D. Determinación de la humedad de equilibrio experimental	28
E. Operación de secado	30
F. Evaluación de las isotermas de adsorción	31
2.5. MÉTODOS DE EVALUACIÓN Y ANÁLISIS	32
2.5.1. Caracterización de las curvas de secado	32
2.5.2. Evaluación y modelamiento de la cinética de secado	32
2.5.3. Caracterización de las curvas de velocidad de secado	34
2.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	34
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
3.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS CURVAS DE SECADO	37
3.2. EVALUACIÓN Y MODELADO DE LA CINÉTICA DE SECADO	44
3.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS CURVAS DE VELOCIDAD	63
CONCLUSIONES	66
RECOMENDACIONES	67
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
ANEXOS	76

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 01 Modelos matemáticos para ajuste de isotermas de adsorción	19
Cuadro 02 Matriz de diseño para el secado de punamuña	27
Cuadro 03 Modelos matemáticos para describir la cinética de secado	33
Cuadro 04 Humedad final y tiempo de secado de las hojas de punamuña	42
Cuadro 05 ANOVA de los efectos de las variables para la humedad final	43
Cuadro 06 ANOVA de los efectos de las variables para el tiempo de secado	44
Cuadro 07 Humedad de equilibrio (X_e) y parámetros de los modelos	46
Cuadro 08 Parámetros y estadígrafos en el modelado del secado a 40°C y 0.5 m/s	48
Cuadro 09 ANOVA para los modelos de secado a 40°C – 0.5 m/s	49
Cuadro 10 Parámetros y estadígrafos en el modelado del secado a 50°C y 0.5 m/s	50
Cuadro 11 ANOVA para los modelos de secado a 50°C – 0.5 m/s	51
Cuadro 12 Parámetros y estadígrafos en el modelado del secado a 60°C y 0.5 m/s	53
Cuadro 13 ANOVA para los modelos de secado a 60°C – 0.5 m/s	54
Cuadro 14 Parámetros y estadígrafos en el modelado de secado a 40°C y 1.0 m/s	55
Cuadro 14 ANOVA para los modelos de secado a 40°C – 1.0 m/s	56
Cuadro 15 Parámetros y estadígrafos en el modelado de secado a 50°C y 1.0 m/s	57
Cuadro 16 ANOVA para los modelos de secado a 50°C – 1.0 m/s	58
Cuadro 17 Parámetros y estadígrafos en el modelado de secado a 60°C y 1.0 m/s	59
Cuadro 18 ANOVA para los modelos de secado a 60°C – 1.0 m/s	60
Cuadro 19 Características de las curvas de velocidad	65

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 01 Curva de secado típica	7
Figura 02 Curva de velocidad de secado	8
Figura 03 Esquema de proceso	9
Figura 04 Cinco tipos de isothermas de adsorción de Van der Waals	16
Figura 05 Isothermas de absorción, desorción e histéresis	17
Figura 06 Método estático gravimétrico	20
Figura 07 Flujograma para la determinación de la humedad de equilibrio	29
Figura 08 Esquema de la operación de secado	30
Figura 09 Curvas de secado de las hojas de punamuña a 0.5 m/s	37
Figura 10 Curvas de secado de las hojas de punamuña a 1.0 m/s	38
Figura 11 Curvas de secado de las hojas de punamuña a 40°C	40
Figura 12 Curvas de secado de las hojas de punamuña a 50°C	40
Figura 13. Curvas de secado de las hojas de punamuña a 60°C	41
Figura 14 Diagrama de efectos de las variables para la humedad final	43
Figura 15 Diagrama de efectos de las variables para el tiempo de secado	44
Figura 16 Isothermas de adsorción para las hojas de punamuña deshidratada	46
Figura 17 Modelado de las curvas de secado a 40°C y 0.5 m/s	49
Figura 18 Modelado de las curvas de secado a 50°C y 0.5 m/s	51
Figura 19 Modelado de las curvas de secado a 60°C y 0.5 m/s	52
Figura 20 Modelado de las curvas de secado a 40°C y 1.0 m/s	56
Figura 21 Modelado de las curvas de secado a 50°C y 1.0 m/s	58
Figura 22 Modelado de las curvas de secado a 60°C y 1.0 m/s	60
Figura 23 Modelado de las curvas de secado - Modelo Thompson a 0.5 m/s	62
Figura 24 Modelado de las curvas de secado - Modelo Page a 1.0 m/s	62
Figura 25 Curvas de velocidad a 0.5 m/s de aire	63

ÍNDICE DE ANEXO

	Pág.
Anexo 01 Pruebas de Múltiples Rangos para la humedad final	76
Anexo 02 Datos experimentales para el cálculo de X_e	77
Anexo 03 Datos reportados para el modelamiento a 40°C y 0.5 m/s	80
Anexo 04 Pruebas de Múltiple Rangos para los modelos a 40°C y 0.5 m/s	82
Anexo 05 Datos reportados para el modelamiento a 50°C y 0.5 m/s	83
Anexo 06 Pruebas de Múltiple Rangos para los modelos a 50°C y 0.5 m/s	85
Anexo 07 Datos reportados para el modelamiento a 60°C y 0.5 m/s	86
Anexo 08 Pruebas de Múltiple Rangos para los modelos a 60°C y 0.5 m/s	88
Anexo 09 Datos reportados para el modelamiento a 40°C y 1.0 m/s	89
Anexo 10 Pruebas de Múltiple Rangos para los modelos a 40°C y 1.0 m/s	91
Anexo 11 Datos reportados para el modelamiento a 50°C y 1.0 m/s	92
Anexo 12 Pruebas de Múltiple Rangos para los modelos a 50°C y 1.0 m/s	94
Anexo 13 Datos reportados para el modelamiento a 60°C y 1.0 m/s	95
Anexo 14 Pruebas de Múltiple Rangos para los modelos a 60°C y 1.0 m/s	96
Anexo 15 Datos para la curva de velocidad a 0.5 m/s	98
Anexo 16 Datos para la curva de velocidad a 0.5 m/s	100
Anexo 17 Sustancias químicas y sus ecuaciones para obtener a_w .	102
Anexo 18 Fotografías	103

ABREVIATURAS Y UNIDADES

M/s	:	Metros por segundo.
°C	:	Grados Celsius.
GAB	:	Guggenheim-Anderson-de Boer.
A, B, C, D	:	Descripción de la caracterización de las curvas de secado.
LP	:	Regresión lineal.
NLP	:	Regresión no lineal.
gr	:	Gramos.
aw	:	Actividad de agua.
cm	:	Centímetros.
mm	:	Milímetros.
m.s.n.m.	:	Metros sobre el nivel del mar.
mt	:	Metros.
X_e	:	Humedad de equilibrio.
R_X	:	Razón de humedad.
h	:	Horas.
ml	:	Mililitros.
X_{e,exp}	:	Humedad de equilibrio experimental.
R²	:	Coefficiente de determinación.
EMR	:	Error medio relativo.
ANOVA	:	Análisis de varianza.
Bh	:	Base húmeda.
G_{ss}	:	Gramos de solido seco.
HR	:	Humedad relativa.

RESUMEN

El objetivo del estudio fue evaluar la deshidratación de las hojas de punamuña (*Satureja boliviana*) en un secador de bandejas bajo condiciones de temperatura y velocidad de aire. Se determinó la humedad de equilibrio, las curvas de velocidad, la cinética de secado y el modelado de deshidratación en un secado convectivo así como las curvas de velocidad. La humedad de equilibrio (X_e) fue obtenida a través de las isotermas de adsorción utilizando el método estático gravimétrico exponiendo las hojas de punamuña a atmósferas generadas con soluciones salinas saturadas a las temperaturas de 40, 50 y 60°C. La cinética de secado se modeló a 12 modelos matemáticos, los cuales fueron ajustados a los datos experimentales a través de un análisis de regresión no lineal, por el método Quasi-Newton, los valores experimentales de X_e se ajustaron al modelo GAB. El secado se realizó a las temperaturas antes mencionadas y a las velocidades de aire de 0.5 y 1.0 m/s, para los 06 tratamientos diferentes. Las curvas de velocidad presentan relación inversa con la temperatura y velocidad de aire, en la caracterización de las curvas de secado el incremento de la temperatura aumenta el periodo de velocidad constante y disminuye el periodo de velocidad del secado. Donde los ajustes de la cinética de secado dan idea del tiempo necesario para el secado, el uso de energía necesaria y desgastes de equipos, en donde se diversificó el consumo decreciente. Siendo el modelo Thompson el que mejor ajuste presenta a las temperaturas de estudio y 0.5 m/s ($R^2 > 0.94$ y $\%E < 22.77$), mientras que el modelo Page se ajusta mejor a la velocidad de aire de 1.0 m/s ($R^2 > 0.985$ y $\%E < 11.85$) de la punamuña. Las curvas de velocidad muestran que la humedad crítica (X_c) tiene una relación inversa con la temperatura, y el tiempo de secado a velocidad constante es mayor a menor temperatura.

Palabras clave: *humedad de equilibrio, curvas de secado, cinética, curvas de velocidad, modelo matemático*

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the dehydration leaves punamuña (*Savory bolivia*) in a tray dryer under conditions of temperature and air velocity. Moisture balance, cornering speed, drying kinetics and modeling of dehydration and convective drying rate curves were evaluated. The equilibrium moisture content (X_e) was determined through adsorption isotherms using the gravimetric static method punamuña exposing leaves to atmospheres generated with saturated salt solutions at temperatures of 40, 50 and 60°C, the experimental values of X_e GAB model were adjusted. Drying at the above temperatures and air velocities of 0.5 and 1.0 m/s was performed, for a total of 06 treatments. Speed curves presented inverse relationship with temperature and air velocity in the characterization of the drying curves increasing the temperature increases the period of constant speed but decreases the period of speed settings. Where drying kinetics give insight the time required for drying, use of energy and wear necessary equipment, where the decreasing consumption diversify. The kinetics of drying model 12 mathematical models, which were fitted to the experimental data through an analysis of nonlinear regression by the Quasi-Newton method, with the Thompson model which best fit presents temperatures study and 0.5 m/s ($R^2 > 0.94$ and $\%E < 22.77$), while the model Page is better air speed 1.0 m/s ($R^2 > 0.985\%$ and $E < 11.85$) adjusted. punamuña of speed curves show that the critical moisture (X_c) has an inverse relationship with temperature and time of constant rate drying is high to low temperature.

Keywords: Equilibrium moisture, drying curves, kinetics of drying velocity curves, mathematical model

INTRODUCCIÓN

Un aspecto crítico de calidad en las hierbas se presenta durante el proceso de secado, por lo que es importante buscar la combinación adecuada de tiempo, temperatura y velocidad de aire, para minimizar su pérdida ya que esta es la principal característica de calidad que tienen las hierbas aromáticas (Heldman y Lund, 2007).

El secado es un método de conservación basado en la disminución de la actividad acuosa de los alimentos para prolongar el período de vida útil de estos (Hermida, 2000), además reduce el peso y el volumen, lo cual facilita el transporte y el almacenamiento (Fennema, 2000), este método es muy utilizado en la conservación de productos agrícolas, así el contenido de humedad final del producto debe tener un valor tal que éste sea estable durante un tiempo prolongado (Hermida, 2000).

La cinética de secado muestra la variación de la humedad del material (intensidad de evaporación) con el tiempo. Las curvas de cinética de secado dan idea del tiempo necesario de secado, del consumo de energía, del mecanismo de transferencia de agua, de las condiciones predominantes en la transferencia de calor y masa, y de la influencia que tienen en la velocidad de secado de las variables de proceso tales como: la temperatura, humedad relativa y la velocidad del aire, asimismo de la geometría y espesor del producto que se pretende secar (Krokida *et al.*, 2003).

Las condiciones de secado que permitan conocer las variables tecnológicas de operación tales como la temperatura y humedad relativa es una alternativa para diversificar el consumo de la punamuña y así poder abaratar los costos de transporte, el secado de la Punamuña ha sido poco estudiado; más aún si se toma en cuenta los hábitos actuales de consumo de productos deshidratados.

Es así que el estudio de la cinética de secado es esencial para diseñar un correcto proceso de secado que permita además obtener un producto de calidad. Por otro lado un buen modelo matemático del proceso de secado puede considerarse como una herramienta muy eficiente para salvar obstáculos, tales como, daños al producto, consumo excesivo de energía, desgaste del equipo o la disminución del rendimiento (Olivas *et al.*, 1999).

El Perú siendo un país mega-diverso, es poseedor de la riqueza natural más grande de América, donde se encuentran un riquísimo potencial de recursos fitogenéticos

tales como las plantas aromáticas y medicinales, el uso de estas no solo se limita a la alimentación o industria sino también está orientada a la aplicación en el campo de la salud. No es de extrañar que un tiempo a esta parte, se estén utilizando diversas técnicas o métodos curativos, una de ellas es la herboterapia.

Al ser las hierbas aromáticas de producción estacional, muchas veces no se encuentran en el mercado local o nacional, por otra parte la conservación en estado fresco, requiere de refrigeración y está presenta limitaciones sobre todo en el periodo de vida útil.

1.1. ANTECEDENTES

García et al., (2007), estudiaron 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 como: orégano (*Origanum mejorana* L.) y perejil (*Petroselinum sativus* Hoffm), Los datos de la cinética de secado se ajustaron a 10 modelos matemáticos, así 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, por otro lado. (Pineda et al., (2009), evaluaron la cinética de deshidratación de las hojas de morera (*Morus alba*), ajustando los datos al modelo de Newton, de otro lado observaron que la variable más influyente fue la temperatura seguida de la velocidad.

Por otra parte, Silva et al., (2008), realizaron el estudio de las cinéticas de secado de hoja y tallo de cilantro (*Coriandrum sativum*) a 50, 60, 70 y 80°C con velocidad constante del aire (1,5 m/s) en un secador de lecho fijo, ajustando a tres modelos matemáticos: Pabis y Henderson, Midilli, y el logarítmico, de estos el modelo Medilli presentó mejor ajuste, asimismo se comprobó que el aumento de la temperatura del aire de secado, aumentó la velocidad de secado de la hoja y tallo de cilantro, para García (2014), al realizar el secado de la Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) y la Hierbabuena (*Mentha spicata*) a 40, 50, 60 y 70°C, el modelo que mejor ajuste presentó fue el de logarítmico para ambas variedades, sin embargo, Da Rocha et al., (2012), determinó que para el secado de tomillo (*Thymus vulgaris* L.) el modelo que mejor se ajusto fue el de Page para el secado a 30, 40, 50, 60 y 70°C.

Por otra parte Vega y Lemus (2005), al modelar la cinética de secado de la papaya chilena (*Vasconcellea pubescens*), a 40, 50, 60, 70 y 80°C con velocidad de aire de 2.0 m·s⁻¹, con los modelos de Newton, Henderson - Pabis y Page, demostró que el

modelo de Page obtuvo la mejor calidad de ajuste en cada curva de secado, en tanto que Della (2010), al modelar el secado de la papa con los modelos Peleg, Hawkes y Flink, Azuara y Raoult Wack, observo que el modelo de Peleg presento mejores ajustes a la cinética de secado.

1.2. PROCESO DE SECADO

El secado es un proceso en el que el agua se elimina para detener o aminorar el crecimiento de microorganismos perjudiciales, así como de ciertas reacciones químicas. La eliminación de agua de los alimentos se consigue mayoritariamente utilizando aire caliente (excepto para algunas operaciones tales como liofilización y deshidratación osmótica) que elimina el agua de la superficie del producto y la lleva hacia fuera. El proceso de secado de alimentos no sólo afecta al contenido en agua del alimento, sino también a otras de sus características físicas y químicas. La deshidratación de alimentos no es una operación unitaria trivial. Son varios los factores que afectan al rendimiento de un secadero, así como a la calidad del producto durante la operación de secado. Los cambios físicos y químicos del alimento durante una operación de secado pueden potenciar ciertas características deseadas de los productos, pero también puede disminuir la cantidad de nutrientes y cambiar las propiedades organolépticas. Sin embargo, con un adecuado manejo, estas reacciones y cambios físicos pueden asegurar un alimento con un alto contenido en nutrientes y aumentar significativamente su vida comercial (Geankopolis, 1998).

1.2.1. PARÁMETROS DE SECADO

Díaz (2009), considera que los parámetros que influyen en el proceso de secado son: la humedad relativa del aire, la temperatura del aire, la velocidad del aire, el contenido de humedad inicial, final, de equilibrio y crítico para un producto, a continuación se detalla:

A. HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE

La humedad relativa del aire se define como la razón de la presión de vapor de agua presente en ese momento, con respecto a la presión de saturación de vapor de agua a la misma temperatura. Generalmente, se expresa en porcentaje (%), a medida que se incrementa la temperatura del aire aumenta su capacidad de absorción de humedad y viceversa.

Cuando el aire contiene su máxima capacidad, se dice que se trata de un aire completamente saturado y por lo tanto incapaz de absorber más humedad, por el contrario, un aire no saturado tiene la posibilidad de absorber una cantidad determinada de humedad hasta lograr su saturación.

B. TEMPERATURA DEL AIRE

La temperatura del aire desempeña un papel importante en los procesos de secado. En forma general, conforme se incrementa su valor se acelera la eliminación de humedad dentro de los límites posibles. En la práctica de secado, la elección de la temperatura se llevara a cabo tomando en consideración el producto que se vaya a someter al proceso.

Existen diversos niveles de temperaturas que se mantienen durante el proceso de secado:

- ✓ **Temperatura de bulbo seco:** es aquella del ambiente, se mide con instrumentación ordinaria como por ejemplo un termómetro de mercurio.
- ✓ **Temperatura de bulbo húmedo:** es la temperatura de equilibrio que se alcanza cuando la mezcla de aire seco y vapor de agua pasa por un proceso de enfriamiento adiabático hasta llegar a la saturación.

C. VELOCIDAD DEL AIRE

La velocidad del aire de secado tiene como funciones principales, en primer lugar, transmitirle energía requerida para calentar el agua contenida en el material facilitando su evaporación, y en segundo lugar, transportar la humedad saliente del material hacia el exterior del secador.

Durante las primeras etapas del secado, la velocidad del aire desempeña un papel muy importante, sobre todo cuando el material contiene un alto contenido de humedad. A mayor velocidad, mayor será la tasa de evaporación y menor el tiempo de secado y viceversa, si la velocidad del aire disminuye la tasa de evaporación disminuye y el tiempo de secado aumenta.

Por tal razón, para asegurar un secado rápido y uniforme es indispensable tener una buena circulación del aire constante y regular.

En la práctica, la economía del proceso determina la velocidad del aire. Se utiliza velocidades mayores a 3 m/s solo en casos excepcionales (productos con alto contenido de humedad), pero en general, la velocidad se considera entre 0.2 y 3 m/s. En algunos casos, es recomendable utilizar velocidades de secado altas al inicio del proceso de secado, pero a medida que disminuye la humedad se sugiere disminuir la velocidad. Lo anterior es posible si se cuenta con extractores de velocidad variable.

D. CONTENIDO DE HUMEDAD INICIAL

El contenido de humedad inicial del producto, es la humedad que tiene el producto al cosecharse y depende del tiempo de cosecha. El contenido de humedad inicial también influye en la tasa de secado. Cuanto más elevado sea el contenido de humedad del producto, mayor será la cantidad de agua evaporada por unidad de energía.

La cantidad de humedad inicial de algún producto puede ser expresada en base húmeda, es decir, la cantidad de agua que tiene el producto en total sobre su peso de materia seca más agua; o en base seca, que es la cantidad de agua que tiene el producto en relación solamente a la cantidad de materia seca; pueden ser expresadas como un porcentaje o decimal. Ambas expresiones pueden representarse de la siguiente forma:

$$h_{bh} = \frac{m_w}{m_w + m_s} = \frac{m_w}{m_t} \quad (\text{Ec. 01})$$

$$h_{bs} = \frac{m_w}{m_s} \quad (\text{Ec. 02})$$

Dónde: h_{bh} , es la humedad en base húmeda, h_{bs} es la humedad en base seca, m_w es la masa de agua, m_s es la masa de producto seco y m_t es la masa total del producto.

E. CONTENIDO DE HUMEDAD FINAL

El contenido de humedad final del producto, es la humedad que tiene el producto después de secarlo. La humedad final depende del tiempo que se desea almacenar el producto, así como la calidad que se desea obtener en el mismo. Si el producto no tiene la humedad final mínima que se requiere para almacenarlo, se presenta un ambiente favorable para la proliferación de microorganismos.

F. CONTENIDO DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO

La humedad de equilibrio, se define como el contenido de humedad que alcanza un producto después de haber sido expuesto en un ambiente de humedad relativa y temperatura constante, por un largo período de tiempo; depende de las condiciones de humedad y temperatura ambiente, además de la variedad, madurez y especie del producto.

Varias ecuaciones empíricas han sido desarrolladas para expresar el contenido de humedad de equilibrio como una función de la humedad relativa y de la temperatura. Una de las ecuaciones es la de BET y HASLEY, además de otras, utilizadas para construir isothermas de adsorción

G. CONTENIDO DE HUMEDAD CRÍTICA

El contenido de humedad crítica, es la que tiene el producto cuando la resistencia interna al transporte de humedad es igual a la resistencia externa a la remoción de vapor de agua de la superficie del producto; depende de las condiciones de secado y de las características del producto tales como el tamaño y la forma. En otras palabras, es la humedad que tiene el producto cuando termina el período de velocidad de secado constante y empieza el período de velocidad decreciente.

1.2.2. PERIODOS DE SECADO

Las Figuras (01) y (02) muestran curvas típicas de secado, una trazada sobre la base de contenido de humedad contra el tiempo, y la otra sobre la base de la velocidad de secado contra el contenido de humedad. La Figura (01) es la forma en la cual se obtienen generalmente los datos experimentales para el secado. La Figura (02) muestra una descripción más detallada del proceso

desechado. Esta última se obtiene diferenciando los datos de la Figura (01) la cual está sujeta a una disgregación considerable de los datos, y por consiguiente a una falta de certidumbre (Foust *et al.*, 1970).

Estas curvas típicas para el secado, están relacionadas con el mecanismo que tiene lugar en el proceso. El proceso de secado representado por el segmento AB o A'B, de las curvas de las Figuras (01) y (02) es el período en el estado inestable, durante el cual la temperatura del sólido alcanza el valor correspondiente al estado estable. Aunque la forma que se aprecia es típica, casi puede decirse que cualquier forma es posible, y AB puede presentarse lo mismo en una velocidad decreciente que creciente (Heldman y Lund, 2007).

En el segmento BC de ambas figuras es una línea recta, por lo que la pendiente y la velocidad de secado son constantes durante este período y se le denomina período de velocidad constante de secado. En el punto C (punto crítico) de ambas figuras, la velocidad de secado comienza a disminuir e inicial el período de velocidad decreciente, hasta llegar al punto D. En este primer período de velocidad, la velocidad de secado disminuye linealmente con respecto al cambio de humedad. En el punto D, la velocidad de secado disminuye con menor rapidez, hasta que llega al punto E, donde el contenido de humedad en el sólido es la humedad de equilibrio (X_e) (Foust *et al.*, 1970). En el secado de algunos materiales, la región CD puede no existir o bien contribuir la totalidad del período de velocidad decreciente (Geankoplis, 1998).

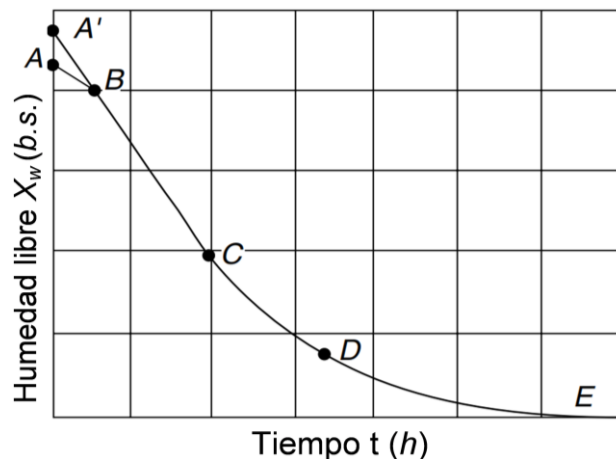


Figura 01: Curva de secado típica.

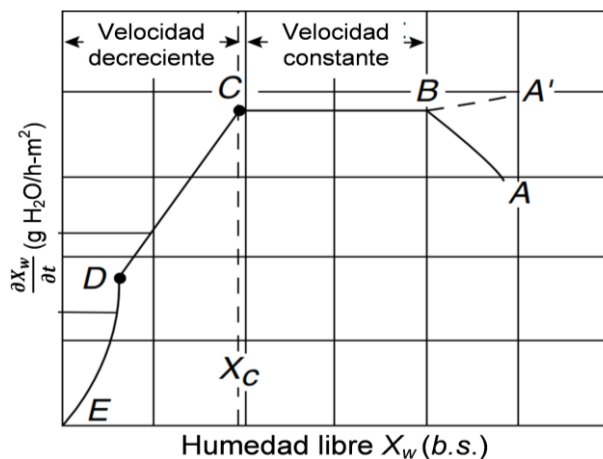


Figura 02. Curva de velocidad de secado

Se define velocidad de secado como la velocidad con que disminuye la humedad del producto, como se muestra en la ecuación (03):

$$v_s = \frac{\partial X_w}{\partial t} \quad (\text{Ec. 03})$$

Por tanto, la pendiente de la curva de secado (dX_w/dt) nos da la velocidad de secado, en la que también pueden diferenciarse las tres zonas definidas anteriormente como se puede ver la Figura (02) así como su correspondencia con la curva de secado (Heldman y Lund, 2007).

1.3. CINÉTICA DEL SECADO

La cinética de secado es evaluar controlando la pérdida de peso de una muestra en función del tiempo (López *et al.*, 2003). Se usa frecuentemente para describir los mecanismos microscópicos y macroscópicos de transferencia de calor y masa durante el secado, y es afectada por las condiciones de secado, tipos de secador y características de los materiales a ser secados. Los modelos de cinética de secado son esenciales para el diseño de equipo, optimización de proceso y mejoramiento de la calidad del producto (Giri y Prasad, 2007).

Los procesos de remoción de humedad y su dependencia en las variables de proceso se expresan en términos de cinética de secado, y por lo tanto, la determinación de la velocidad de secado (Guiné y Castro, 2002), es esencial para el desarrollo de modelos confiables del proceso (Kiranoudis *et al.*, 1997).

Las curvas de secado se representan de diferentes maneras como por ejemplo el contenido de humedad en función del tiempo, la velocidad del secado en función

del tiempo o la velocidad del secado en función del contenido de humedad (Karin y Hawlader, 2005).

1.4. MODELADO

Modelar es la acción de construir un modelo, de enconsertar la realidad, como se muestra en la Figura (03) (Ramos *at al.*, 2010), el modelado es una herramienta muy útil para averiguar rápidamente el efecto de los parámetros en un sistema de procesos sobre el resultado de este mismo. Es así que minimiza el número de experimentos que necesitan ser transmitidos para determinar la influencia de parámetros diversos sobre un proceso (Jun y Irudayaraj, 2009).

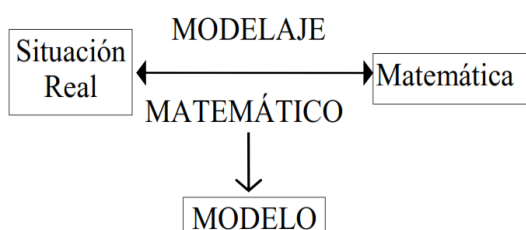


Figura 03: Esquema de proceso (Biembengut y Hein, 1995)

Los sistemas a resolver durante la tarea de modelado son muy diversos. Por ejemplo, todo problema de diseño se caracteriza, entre muchos aspectos, por la necesidad de seleccionar una opción óptima (estructura a diseñar, por ejemplo, un edificio, un proceso, un circuito electrónico, etc.) de entre el número (generalmente enorme en problemas reales) de alternativas posibles. Esto implica, por un lado, la necesidad de dominar métodos matemáticos para optimizar una función objetivo, por lo general fuertemente no lineal, con restricciones de todo tipo (desigualdades e igualdades, generalmente no lineales), con variables continuas (reales) o discontinuas (enteras), y por supuesto de muy elevada dimensión. Por otra parte, será necesario comprender conceptualmente algunos de los métodos formales, para generar las alternativas estructurales posibles para un diseño dado y seleccionar una de acuerdo con ciertos criterios de óptimo impuesto por el diseñador, (Scena, 1999).

1.4.1. MODELO MATEMÁTICO

El modelo es un esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento. Un modelo es, en

definitiva, una herramienta de ayuda a la toma de decisiones. Por esta razón, sus resultados deben ser inteligibles (comprendido y entendido) y útiles, (Ramos *et al.*, 2010).

Existen diferentes métodos aproximados para solucionar problemas de modelado de procesos, los cuales son descritos por ecuaciones matemáticas algunas incluyen derivadas parciales por las razones del proceso; la falta de disponibilidad de soluciones analíticas a las correlaciones o ecuaciones empíricas, hace que se requieran de datos experimentales sobre todo para propósitos de diseño, así estos modelos o ecuaciones, presentan simplicidad de solución, facilidad para determinar rápidamente un parámetro, hay tres categorías principales en las cuales modelado matemático puede describirse: un método diferencial, método integral, y método estocástico. (Jun y Irudayaraj, 2009)

La solución de una ecuación no lineal o de una función trascendente, como método, supone la búsqueda de un valor tal que satisfaga la ecuación o función en cuestión. (Scenna, 1999), lo cual implica la optimización de tal solución.

Los métodos analíticos imponen demasiadas restricciones a las funciones objetivos. Además, no siempre es posible resolver el sistema de ecuaciones analíticamente. Por este motivo se desarrollaron los métodos numéricos, se han utilizado diversos modelos matemáticos para describir la cinética de secado de productos agrícolas. Estos modelos son utilizados para estimar el tiempo desecado de los diferentes productos en relación con las curvas de secado. Existen tres tipos de modelos de secado usados para describir la cinética de secado en capa fina de productos agrícolas. El modelo teórico, que solo considera la resistencia interna, la transferencia de calor y el agua entre el producto y el aire caliente, los modelos semiteóricos y los empíricos, que presentan una relación directa entre la humedad del producto y el tiempo de secado. (Midilli *et al.*, 2002).

Entre los modelos semiteóricos tenemos los modelos de Page, Page modificado, Henderson y Pabis, y Logarítmico, que se utilizan para la cinética del secado de productos agrícolas, (Corrêa *et al.*, 2007).

Los modelos empíricos no forman una perspectiva de los importantes procesos que suceden durante el secado, aunque en algunos casos pueden describir las curvas de secado para determinadas condiciones experimentales como el Wang y Singh, (Keey, 1972). Entre estos modelos, el que más ha sido utilizado en estudios de cinética de secado de productos agrícolas es el modelo propuesto por Thompson.

AJUSTE DE CURVAS DE SECADO

Los métodos iterativos hallan la solución exacta (si eso ocurre) sólo en un número infinito de iteraciones. En la práctica, las iteraciones se detienen cuando el error es menor que una adecuada tolerancia, impuesta por el usuario. El valor exacto del error no puede usarse como criterio de terminación, porque normalmente no se conoce. (Scenna, 1999). En este caso, además del orden interviene el costo computacional por iteración que es importantísimo para definir la eficiencia de un método.

Método de Newton

Encuentra la raíz de la derivada de la función objetivo. Para ello, utiliza el método numérico para encontrar raíces de Newton. En este caso en particular, la ecuación de iteración es:

$$x_{k+1} = x_k + \frac{f(x_k)}{f'(x_{k+1})} \quad (\text{Ec. 04})$$

Se debe verificar continuamente si realmente el nuevo punto es mejor que el anterior. La desventaja de este método es que converge lentamente cuando la derivada segunda tiende a cero. Además, necesita conocer la derivada primera y la derivada segunda (Tarifa, 2000).

Métodos Quasi-Newton

(Tarifa, 2000), estos métodos imitan el método de Newton pero calculan numéricamente las derivadas.

En este caso se utilizan diferencias centrales para estimar las variables, pero también es posible utilizar diferencias hacia adelante $([f(x+h)-f(x)]/h)$ o hacia atrás $([f(x)-f(x-h)]/h)$.

La única desventaja de este método es que requiere más evaluaciones de la función objetivo que el anterior.

1.4.2. ETAPAS PARA MODELAR

Las etapas que componen el modelado son las siguientes (Ramos *et al.*, 2010):

✓ **IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

Consiste en la recolección y análisis de la información relevante para el problema (datos). Esta etapa es fundamental para que las soluciones proporcionadas y las conclusiones obtenidas sean útiles, las decisiones adoptadas sean correctas. Los datos suelen ser vitales para conseguir un realismo o aplicabilidad en las soluciones. A menudo representan el cuello de botella del proceso de modelado.

✓ **ESPECIFICACIÓN MATEMÁTICA Y FORMULACIÓN**

Escritura y/o aplicación matemática del problema de modelación, definiendo sus variables, sus ecuaciones, su función objetivo, sus parámetros. En esta etapa se analiza el tamaño del problema, la estructura de la matriz de restricciones, su tipo (LP, NLP). Es una etapa de creación donde se debe prestar especial atención a la precisión en la formulación, a la escritura o utilización de las ecuaciones que describen el problema o fenómeno.

✓ **RESOLUCIÓN**

Se trata de implantar un algoritmo de obtención de la solución numérica (muy próxima a la matemática) óptima o cuasi óptima. El algoritmo puede ser de propósito general (método simplex, Quasi-Newton u otros) o específico. Puede haber diferentes métodos de solución de un problema o diferentes implantaciones de un mismo método. El tiempo de resolución de un problema también puede depender drásticamente de cómo esté formulado.

1.4.3. 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 y Chenlo, 1997).

Debido a la complejidad de los fenómenos de transferencia de materia se han desarrollado una serie de modelos empíricos sencillos para simular la transferencia de agua en sólidos higroscópicos como son los alimentos (Sharaf - Eldeen *et al.*, 1979). La mayoría de estos modelos consideran que el contenido de humedad inicial es uniforme, que el comportamiento de las piezas es isótropo y que la resistencia interna es predominante al transporte del agua.

La forma general de estas relaciones empíricas según propuso, (Lewis, 1921) representa matemáticamente una relación de proporcionalidad directa entre la velocidad de secado y la diferencia de humedad entre el material que se está secando y la del mismo en condiciones de equilibrio con el aire de secado:

$$\frac{dW}{dt} = -k_c(W - W_e) \quad (\text{Ec. 05})$$

Siendo W la humedad media del sólido en el instante t , W_e la humedad que tendría una vez alcanzado el equilibrio con el aire de secado dónde esta humedad es. A 40°C es 0.2069 g de agua / g s.s., a 50°C es 0.2252 g de agua / g s.s. y para 60°C 0.2305 g de agua / g s.s. y k_c es un coeficiente cinético del modelo. Integrando se obtiene la siguiente expresión:

$$\emptyset = \exp(-k_c \cdot t) \quad (\text{Ec. 06})$$

Donde \emptyset es la humedad adimensional definida como $(W - W_e)/(W_i - W_e)$ siendo W_i la humedad inicial del sólido. O bien según Jayaraman y Das Gupta (1992) con una constante de ajuste C más:

$$\emptyset = C. \exp(-k_c. t) \quad (\text{Ec. } 07)$$

Ambas expresiones son conocidas como modelo exponencial, en las que k_c es un coeficiente cinético que tiene en cuenta la influencia de la temperatura, pero también incluye el efecto conjunto del tamaño y forma de las partículas, la velocidad del aire, etc.

Posteriormente Henderson y Pabis (1961), relacionaron el valor de k_c con la temperatura mediante una ecuación tipo Arrhenius:

$$k_c = a. \exp(-b/T) \quad (\text{Ec. } 08)$$

Donde a y b son constantes del material y T es la temperatura absoluta del producto. Todas estas expresiones sin embargo son incapaces de describir el proceso completo de secado y tienen una validez muy restringida debido a su limitación a tamaños y formas concretas de partículas y condiciones de operación.

1.5. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

La isoterma de adsorción se define como la relación entre la actividad de agua (o la humedad relativa de equilibrio de aire circundante) y el contenido de humedad de un material en equilibrio a temperatura constante, la cual se obtiene cuando el proceso de equilibrio parte de una muestra húmeda o seca, y a esta se le permite equilibrarse con la humedad del aire circundante perdiendo o ganando humedad, reflejando así, la forma como el agua se liga al sistema (Fuentes, 1996). La relación entre el contenido de agua y la actividad acuosa o la presión de vapor relativa es conocida como isoterma de adsorción, (Badui, 1982).

Las características de adsorción de los materiales alimentarios son esenciales para diseñar, modelar y optimizar muchos procesos tales como el secado, la aireación y el almacenamiento de alimentos, (Trujillo *et al*, 2003).

Su importancia para la ciencia de los alimentos se basa en la capacidad para predecir potenciales cambios en la estabilidad de los productos, a la vez de ser útiles para seleccionar empaques e ingredientes por predecir la humedad máxima a permitir durante el almacenamiento, (Madigan, 2003).

La presencia y el estado del agua en un material son descritos por el contenido de agua en equilibrio y la actividad de agua de un alimento. Los fenómenos importantes en el procesamiento de alimentos están relacionados más a la actividad de agua que al contenido de agua, (Heldman y Lund, 2007).

La adsorción de agua ocurre inicialmente por formación de una monocapa en la superficie del producto seguida de una adsorción en multicapa. La adsorción en multicapa de agua consiste en la captación de agua en los poros y espacios capilares, disolución de solutos, y finalmente en el atrapamiento mecánico de agua. Estas fases pueden traslaparse y difieren entre los distintos tipos de alimentos, dependiendo de su composición y estructura, (Barbosa, 1997).

Las isothermas de adsorción de alimentos se construyen para conocer la actividad de agua de cada alimento a una determinada temperatura según su contenido en humedad. Una isoterma es la expresión de la relación funcional existente entre el contenido de humedad de un alimento (expresado como gramos de agua por 100 gramos de sólidos secos) y la actividad acuosa del mismo alimento. La isoterma se puede presentar en forma gráfica o bien en forma de ecuación, (Ramírez, 2012).

Existen diferentes tipos de isothermas de adsorción en función del recubrimiento del adsorbente (capa monomolecular o multimolecular de adsorbato) dependiendo de la presencia de poros o capilares, mostrando todas ellas un cierto grado de histéresis (Hermida, 2000). En este momento la fase fluida posee una concentración de soluto C , mientras que en la fase sólida la cantidad de soluto por unidad de masa de adsorbente es m .

Tóth (2001), muestra cinco tipos de comportamiento de isothermas de sorción (Figura 04). Shafiur (2003), si los alimentos contienen compuestos cristalinos hidrosolubles como azúcares o sales, la isoterma es cóncava del tipo III, la mayoría de los restantes alimentos tienen isothermas sigmoideas del tipo II, el punto de inflexión de la isoterma (tipo II) indica el cambio de la capacidad de ligar agua o a las cantidades relativas de agua unida y libre. El tipo I es indicativo de un sólido poroso no hinchable, tal como los silicatos anti aglomerantes (“anticracking”).

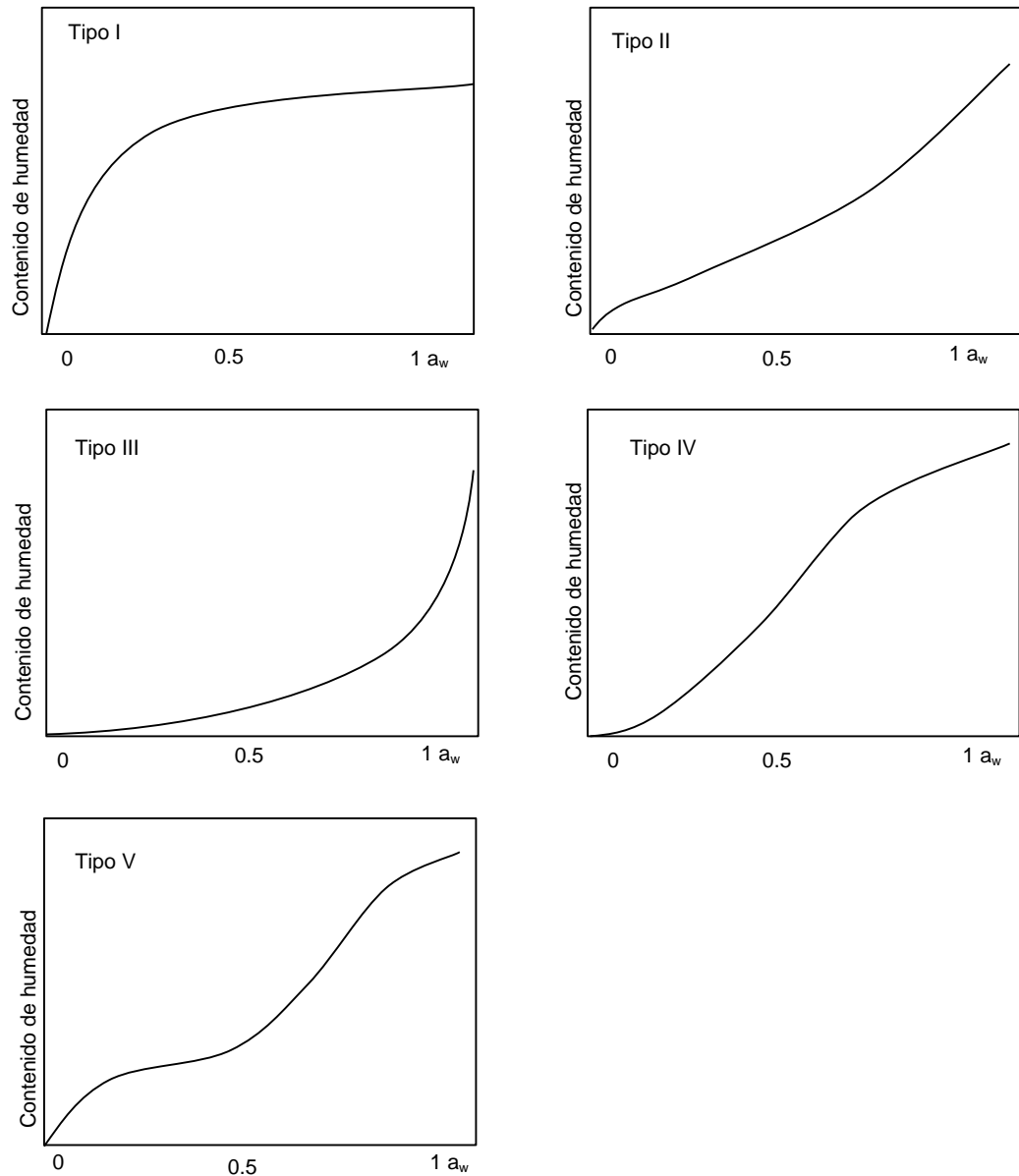


Figura 04: Cinco tipos de isothermas de adsorción de Van der Waals (Shafiur, 2003).

Las isothermas de los alimentos, se dividen en tres regiones (Figura 04) denotadas por *A*, *B* y *C*. En la región *A*, las moléculas de agua están enérgicamente ligadas a los sitios específicos en el sólido, estos sitios contienen a los grupos hidroxil de los polisacáridos, carbonil y amino de las proteínas, uniéndose a través de puentes de hidrogeno y fuerzas ión-dipolo. Es así que esta agua no está disponible como solvente y por lo tanto no colabora microbiológicamente, enzimáticamente o químicamente. *A*, esta zona se la denomina monocapa (Fellows, 2000). En la región *B* el agua se encuentra en multicapas (Brennan, 2008), menos fuertemente unida, estando presente normalmente en pequeños capilares (Shafiur, 2003) y en

la región C se presenta estructuralmente y puede presentar soluciones (Brennan, 2008), suelta en grandes capilares o está libre (Shafiur, 2003).

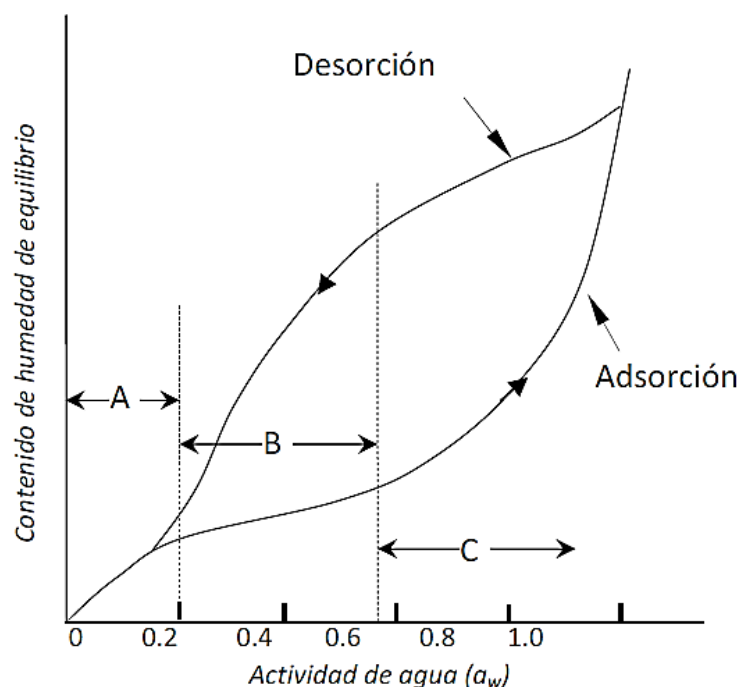


Figura 05: Isotermas de absorción, desorción e histeresis, (Brennan, 2008).

Otra característica de las isotermas es su variación con respecto a la temperatura. En la generalidad de los casos, aumentando la temperatura, se representa una disminución en el contenido de humedad cuando la a_w permanece constante, la higroscopicidad del producto disminuye, es decir, el incremento en la temperatura repercute en un cambio descendente en la isoterma de adsorción; lo que se puede apreciar como un acercamiento de la isoterma hacia el eje de a_w , (Fennema, 2000).

La isoterma de adsorción es la relación de equilibrio entre la concentración en la fase fluida y la concentración en las partículas de adsorbente a una temperatura determinada. Para el caso de gases la concentración viene generalmente dada como fracción molar o como presión parcial. Para líquidos la concentración se expresa habitualmente en unidades de masa, tales como partes por millón. La concentración de adsorbato sobre el sólido viene dada como masa adsorbida por unidad de masa de adsorbente original, (McCabe *et al.*, 2007).

Para la elaboración de isotermas, el control de la actividad acuosa es la parte experimental de mayor importancia, es decir los medios generadores (sales) de humedad. De los factores que pueden influir en la obtención de una isoterma, tales

como la historia, la composición y características del alimento, la higroscopicidad del material de construcción de la cámara, el espacio existente en la cámara y el área de exposición tanto de la muestra como del material de referencia, y la preparación de sal, la temperatura probablemente es uno de los más importantes a controlar. La temperatura afecta la movilidad de las moléculas de agua y el equilibrio dinámico entre el vapor y las fases adsorbidas, un incremento en la temperatura determina una disminución en la higroscopicidad del alimento con excepción de ciertos azúcares y componentes alimenticios de bajo peso molecular, (Alvarado *et al.*, 2001).

1.5.1. MODELOS MATEMÁTICOS PARA LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Para la mayoría de los fines prácticos, la isoterma se presenta como una ecuación modelo empírica o teórica (Shafiur, 2003).

Fennema *et al.*, (1975), mencionan que las isotermas se representan graficando la presión parcial de vapor (P_A) en equilibrio con la concentración de sólidos de una sustancia (C_A), a una temperatura (T) constante, representada en una función (Ecuación 09).

$$P_A = f(C_A), \quad T = \text{constante} \quad (\text{Ec. 09})$$

Existen varias ecuaciones empíricas y semi-empíricas, que se han propuesto para correlacionar el contenido de humedad de equilibrio con la actividad de agua de un alimento, sin embargo, la ecuación de *GAB* (Guggenheim-Anderson-de Boer) (Ecuación 10) mostrada en la Tabla (01) es de amplio uso en alimentos (Shafiur, 2003) y es recomendada por el proyecto Europeo COST90, que trata sobre las propiedades físicas de los alimentos (Saravacos *et al.*, 1986), y muestra un amplio uso hasta valores de a_w 0.94, esta ecuación está basada en la teoría de adsorción de *BET* (Brunauer – Emmet - Teller), la cual da una explicación física a los parámetros involucrados en ella. (Heldman y Lund, 2007).

Por otro lado, la isoterma *GAB*, contiene una tercera constante k , que mide la diferencia de potencial químico estándar entre las moléculas de esta segunda etapa y aquellas del estado líquido puro. Si k es menor a la unidad, se estimará una sorción menor a la predicha por *BET*. (Zug, 2002). Así, la isoterma de *GAB*, presentan el parámetro de la monocapa X_m , que se define

como la actividad del agua crítica (Shafiur, 2003). Cáceres (2002), observó que el parámetro X_m (monocapa) en el modelo GAB, presenta una dependencia lineal decreciente ($R^2 = 0.9973$) para la uva deshidratada, para las isotermas a diferentes temperaturas.

Tabla 01: Modelos matemáticos para ajuste de isotermas de adsorción, con dependencia e independencia de la temperatura.

Modelo	Modelo matemático	Ec.
GAB	$x_e = \frac{x_m c_{GAB} k_{GAB} a_W}{[(1 - k_{GAB} a_W)(1 - k_{GAB} a_W + c_{GAB} k_{GAB} a_W)]}$	(10)
Hasley	$a_W = \exp \left[\frac{-A}{x_e^B} \right]$	(11)

Dónde: A, B, k_{GAB} =Constantes de las ecuaciones; X_e =Humedad de equilibrio expresada en base seca (g de agua/g masa seca); X_m =Humedad de la monocapa molecular (g de agua/g masa seca).

1.5.2. SISTEMAS DE MEDICIÓN DE ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Los métodos higrométricos y gravimétricos son más frecuentes para la construcción de isotermas, sin embargo hay técnicas más sofisticadas que se están utilizando en algunos laboratorios para el mismo fin, pero son más costosas por el equipamiento e instrumentación requerida. (Alvarado *et al.*, 2001).

Los datos de equilibrio se pueden determinar utilizando dos técnicas diferentes:

- ✓ Técnicas manométricas o higrométricas, basadas en la determinación directa de la presión del vapor de agua o la humedad relativa de la interface de un sólido de contenido de humedad conocido.
- ✓ Técnicas gravimétricas, basadas en la determinación del contenido de humedad de la muestra después de que ésta ha alcanzado el equilibrio con un aire de humedad relativa conocida. Este procedimiento se puede desarrollar por métodos estáticos o dinámicos (Martínez *et al.*, 1998).

Las técnicas gravimétricas de método estático consisten en colocar dentro de una cámara herméticamente cerrada una disolución saturada de una sal con una a_w conocida (Figura 06). En el espacio libre que queda por encima de la disolución se origina un ambiente cuya humedad relativa en el equilibrio, a una temperatura determinada será exactamente la a_w de la sal a esa misma temperatura. Si en el interior de la cámara se coloca también la muestra, ésta irá ganando o perdiendo agua hasta quedar en equilibrio con el ambiente (peso constante). El equilibrio se considera en el momento en que la diferencia de peso de dos pesadas consecutivas es menor de $1mg/g$, (Labuza *et al.*, 1985). La a_w de la muestra en ese momento será la de equilibrio con la sal. Puesto que al estar saturada la solución de la sal, ésta absorbe las variaciones de humedad de manera que la humedad relativa del ambiente permanece constante. La humedad puede determinarse experimentalmente o calcularse conociendo la humedad inicial de la muestra, así como pesos inicial y final.

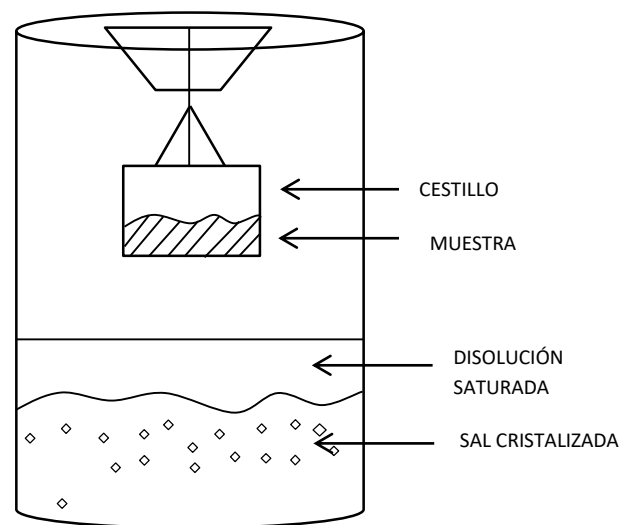


Figura 06: Método estático gravimétrico (Martínez *et al.*, 1998)

1.6. PUNAMUÑA

1.6.1. DISTRIBUCIÓN

En el ecosistema Andino del Perú, se desarrolla un importante germoplasma vegetal de vida silvestre y con propiedades curativas reportadas por la medicina tradicional y la Etnobotánica. Entre muchas de ellas se menciona a la "Cjuñuca", "Cjuñu muña" u "Orégano de los Incas", "Martín-muña"

sinonimias populares atribuidas a una de las especies de la familia Lamiaceae, la *Satureja boliviana* (Salaverry, 2005).

Entre las propiedades farmacológicas: antisépticas, antiespasmódicas, analgésicas, antiescabióticas, etc. También es utilizado como conservante de alimentos frescos como insecticidas y ectoparaticida (Hammond *et al.*, 1998).

1.6.2. ESTUDIO BOTÁNICO

Ojeda (2004), esta planta ha sido empleada milenariamente por muchos antepasados, siendo múltiples los usos que se le atribuye, inclusive viene siendo confundida en la actualidad con otras especie de la misma familia, la “Muña” *Minthostachys spicata* que en términos cualitativos, cuantitativos y de rendimiento del aceite esencial, la *Satureja boliviana* (punamuña) le supera.

Planta subarborescente, perenne, cuya altura promedio fluctúa entre 60-80 cm. de longitud. Hojas pequeñas muy aromáticas con peciolo glabro de 1.5-4 mm. De longitud, láminas de 0.5-2.5 cm. de longitud por 0.4-1 cm de ancho, lanceoladas, obtusas en el ápice y cuneadas en la base de margen crenulado, glanduloso-punteadas, glabras o pubésculas en ambas caras, tallos ramosos pubésculos. Flores abundantes después de la estación lluviosa (ver fotografía 01). Su hábitat, preferentemente en la zona de estudio es en el talud de las carreteras y laderas adyacentes. Crece en el noroeste y dentro de Argentina, extendiéndose hasta Bolivia y Perú.

La ubicación taxonómica de la especie, según el sistema de clasificación de Arthur Cronquist, es la siguiente, (Alkire *et al.*, 1994):

REYNO	: Vegetal
DIVISIÓN	: Magnoliophyta
CLASE	: Magnoliopsida
SUB CLASE	: Asteridae
ORDEN	: Lamiales
FAMILIA	: Lamiaceae
GÉNERO	: <i>Satureja</i>
ESPECIE	: <i>Satureja boliviana</i> (Benth) Bring.

Fotografía 01: a) Tallo con hojas y floración de la punamuña, b) arbusto de punamuña en su hábitat.



a)



b)

1.6.3. CARACTERÍSTICAS ETNOBOTÁNICAS

En medicina folclórica se usa en enfermedades respiratorias y en elevadas dosis como abortivo. Además es recomendable contra los dolores de estómago, cólicos y empachos, tomando la infusión o el cocimiento de la hierba. Tomar la infusión de la hierba con un poco de licor en el tratamiento de la indigestión que causa dolores de estómago (Rojas *et al.*, 2003).

Incluso se usa para contrarrestar los dolores de cabeza los mareos, tomar la infusión de la planta. Para provocar la expulsión de las lombrices intestinales, tomar la infusión.

La infusión se recomienda en los procesos de menstruación. Se le emplea como condimento. Preserva los tubérculos andinos del ataque de larvas de insectos y de hongos.

Característica de los productos deshidratados como punamucha o similares.

1.6.4. VARIEDADES Y SINONIMIA

Según La Royal Botanic Gardens (Rojas *et al.*, 2003), las variedades de Muña, son:

Minthostachys mollis. Se encuentra en Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú

- *Mentha mollis* Benth
- *Bystropogon mollis* Kunth in F.W.H.von Humboldt,

var. *hybrida* Schmidt-Leb.

var. *mandoniana* (Briq.) Schmidt-Leb., se encuentra desde Perú hasta el oeste de Bolivia.

- *Bystropogon mandonianus* Briq.
- *Minthostachys mandoniana* (Briq.) Epling

var. *mollis*. Se encuentra en Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú

- *Bystropogon canus* Benth.
- *Bystropogon tomentosus* Benth.
- *Bystropogon confertus* Willd ex Steud.
- *Bystropogon reticulatus* Willd. ex Steud.
- *Bystropogon pavonianus* Briq
- *Minthostachys tomentosa* (Benth.)

En el Perú y en otros países como Venezuela, Ecuador y Colombia, tiene las siguientes sinonimias (Alkire *et al.*, 1994):

- Muña-Muña
- Muña Negra
- Arash Muña
- Chancas
- Ismus
- Hupaimuña
- Poleo
- Peperina
- Huayco
- Coa
- Chancua

1.7. JUSTIFICACIÓN

Un aspecto crítico de calidad en las hierbas es que son muy sensible durante el proceso de secado, por lo que es importante buscar la combinación adecuada de temperatura y velocidad de remoción de aire caliente y con ello determinar el tiempo al que deben ser sometidos la punamuña y se logre minimizar la pérdida de calidad ya que esta es la principal característica que tienen las hierbas aromáticas

La demanda actual de productos que hayan sufrido la mínima transformación, están en boga en el mercado nacional e internacional, dentro de ellos se encuentran las plantas aromáticas, entre ellas la Punamuña, y esta demanda se debe a las características medicinales que presentan, pues se dice que calma dolores estomacales y gástricos (Rojas *et al.*, 2003).

Así la conservación de las hierbas como la Punamuña, se puede lograr a través del deshidratado, y este se convierte en un factor importante para conservarlas el mayor tiempo posible.

La importancia de proponer un sistema real de ingeniería consiste en representarlo de una manera adecuada, de tal forma de lograr una sustitución del sistema real por uno más adecuado para el tratamiento formal o práctico, esto se logra a través de un modelo matemático, el cual se pretende aplicar en el secado de las hojas de punamuña considerando los parámetros de la operación de secado.

Por lo tanto la primera parte de este proyecto consistirá en obtener los parámetros de proceso de forma experimental usando un secador de bandejas a diferentes temperaturas de secado, es así que este proyecto se centra en el secado de la punamuña que es muy usada en nuestro medio con fines medicinales y alimenticios como aromatizante.

Se utilizará distintas metodologías como las Isotermas de adsorción a partir de la cual se obtendrá la humedad de equilibrio del producto, luego se obtendrá las curvas de la cinética de secado, las cuales se modelaran aplicando ecuaciones matemáticas que permitan encontrar las condiciones de secado de las hojas de Punamuña.

1.8. OBJETIVOS

Los objetivos que se pretende alcanzar en el presente proyecto de investigación son:

GENERAL

- Evaluar la deshidratación de la punamuña (*Satureja boliviana*) en secador de bandejas.

ESPECÍFICOS

- ✓ Caracterizar las curvas de secado de las hojas de punamuña (*Satureja boliviana*) a diferentes velocidades y temperaturas de aire.
- ✓ Evaluar y modelar la cinética de secado de las hojas de punamuña (*Satureja boliviana*) a diferentes velocidades y temperaturas, a través de los modelos matemáticos.
- ✓ Caracterizar las curvas de velocidad de secado de las hojas de punamuña (*Satureja boliviana*) a diferentes velocidades y temperaturas.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. LUGAR DE EJECUCIÓN

La investigación se desarrolló en los laboratorios de Química y Procesos agroindustriales de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la UNAJMA

2.2. MATERIAL DE ESTUDIO

2.2.1. POBLACIÓN

El universo y/o población se refirió al material genético es decir la punamuña (*Satureja boliviana*), las cuales procedieron de los cultivos silvestres ubicados en la zona alta de la provincia de Andahuaylas por encima de los 3200 msnm, específicamente en la zona de Campanayoc – Yunca Alta del distrito de Andahuaylas, cartográficamente se ubica a Latitud 13°36'07.89" S, longitud 73°16'33.13" O.

2.2.2. MUESTRA

Se consideró una muestra de 5 kg de hojas frescas de punamuña correspondientes a los periodos de vegetación enero – marzo del 2015, las cuales fueron recolectadas teniendo en cuenta los siguientes criterios: plantas con floración y sin aparente marchites, que se encuentren a no menos de 2 m de cualquier camino de herradura existente, hojas sin manchas ni quebradas ni secas.

Las hojas recolectadas fueron colocadas en bolsas de papel Krab sin someterlas a presión, las cuales son transportadas en cajas de cartón evitando el contacto directo con la luz solar una vez recolectados, en seguida fueron inmediatamente llevados a un ambiente refrigerado a 10°C a fin de evitar que se marchiten rápidamente.

2.2.3. UNIDAD DE ANÁLISIS

La unidad de análisis estuvo referida a los datos obtenidos durante el proceso de secado tales como la humedad de equilibrio, humedad en base seca, humedad relativa del aire, velocidad del aire a las temperaturas de estudio.

2.3. DISEÑO DE CONTRASTACIÓN

Para el secado de las hojas de punamuña, se utilizó el diseño factorial 3X2, debido a que se manipulara dos variables, la cual es la temperatura en tres niveles y la velocidad de aire en dos niveles, el matriz de diseño se muestra en la Tabla (02).

Mientras que la variable de salida será la humedad de equilibrio (X_e), y la razón de humedad (RX), a través de la cual se modelara la cinética de secado.

Tabla 02: Matriz de diseño para el secado de punamuña

Tratamiento	Variable de entrada		Variable de respuesta
	Temperatura (°C)	Velocidad de aire (m/s)	Razón de humedad (RX)
TR 01	T1 (40)	V1 (1.0)	RX1
TR 02	T2 (50)	V1 (1.0)	RX2
TR 03	T3 (60)	V1 (1.0)	RX3
TR 04	T1 (40)	V2 (0.5)	RX4
TR 05	T2 (50)	V2 (0.5)	RX5
TR 06	T3 (60)	V2 (0.5)	RX6

Fuente: Elaboración propia

2.4. MÉTODOS Y TÉCNICAS

2.4.1. MÉTODOS PARA EL DESARROLLO DEL SECADO DE LA PUNAMUÑA

A. RECOLECCIÓN DE PUNA MUÑA

Se considera hojas frescas de punamuña correspondientes a los periodos de vegetación enero – marzo del 2015, las cuales fueron recolectadas teniendo en cuenta los siguientes criterios: plantas con floración y sin aparente marchites, que se encuentren a no menos de 2 mt de cualquier camino de herradura existente, hojas sin manchas ni quebradas ni secas.

Las hojas recolectadas fueron colocadas en bolsas de papel Krab sin someterlas a presión, las cuales serán transportadas en cajas de cartón evitando el contacto directo con la luz solar una vez recolectados, en seguida serán inmediatamente llevados a un ambiente refrigerado a 10°C a fin de evitar que se marchiten rápidamente.

B. ACONDICIONAMIENTO DE LAS MUESTRAS

Los tallos de punamuña fueron sometidos a desojado o despapillado manual, para obtener las hojas, las que serán lavadas en abundante agua a corro a fin de eliminar material extraño y fueron almacenadas en refrigeración a 10°C para evitar su marchitamiento y para conservar su integridad

Enseguida se eliminó el agua residual de lavado utilizando paños absorbentes, y se dejó esparcido en una bandeja de acero inoxidable durante 30 minutos a fin de permitir la eliminación total del agua de lavado.

Luego se colocaron en recipientes de acero inoxidable de 10X10 cm de lado, que permitan contener 5 gr de hojas de punamuña, las cuales fueron inmediatamente llevada al secador de bandejas a la temperatura correspondiente donde el secado se realiza a un solo lado. Geankoplis (1998).

C. DETERMINACIÓN DE HUMEDAD INICIAL

El contenido de humedad se determinó a través de la pérdida de peso por desecación en estufa, metodología desarrollada por Della (2010). Durante 2 h se las seca a 70°C y luego a 104°C por 72 h más. En un principio el secado se realiza a menor temperatura para evitar la pérdida abrupta de agua y la pérdida de material.

D. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DE EQUILIBRIO EXPERIMENTAL

La humedad de equilibrio se determinó a través de la isoterma de adsorción, el cual se basó en el método estático gravimétrico método de control continuo de cambios de peso, descrito por Labuza (1984).

Las isotermas de adsorción se evaluaron a las temperaturas de 40, 50 y 60°C. Las condiciones de humedad relativa, serán obtenidas con la preparación de soluciones saturadas (de acuerdo al anexo 17) y que luego fueron vertidos en los potes con cierre hermético. Se acondicionaron 08 potes de 200 ml de capacidad con tapa de cierre hermético, en el que se introducirán las hojas de Punamuña secas, con un peso aproximado de 1 g por cada pote, los potes de cierre hermético contuvieron un trípode de acero inoxidable como soporte, en ellas se presenta otro recipiente que contenga las hojas de Punamuña. Primeramente, se preparó 20 ml de solución saturada con cada una de las sustancias químicas (sales) en un vaso de precipitado, se agitará a 500 rpm

en un agitador termo magnético modelo M6 a las temperaturas de evaluación, luego se verterá la solución saturada al pote correspondiente, la operación se repetirá para cada una de las soluciones saturadas, a la humedad relativa deseada, seguidamente se introducirán los trípodes armados, donde se depositarán los recipientes que contengan las hojas de Punamuña, enseguida los potes serán cerrados herméticamente, los potes cargados se llevarán a la estufa a una temperatura de 60°C. El pesaje de las hojas de Punamuña se realizará en la balanza analítica de precisión, cada día hasta que las muestras presenten un peso constante, que indica el momento en la que llego al equilibrio con su atmósfera, tal como se muestra en la (Figura 07).

La evaluación de la isoterma a 40°C se desarrolló por duplicado con el fin de minimizar errores sistemáticos o aleatorios, la experiencia se repite para las temperaturas de 50 y 60°C, cada una por triplicado, a fin de tener resultados más robustos.

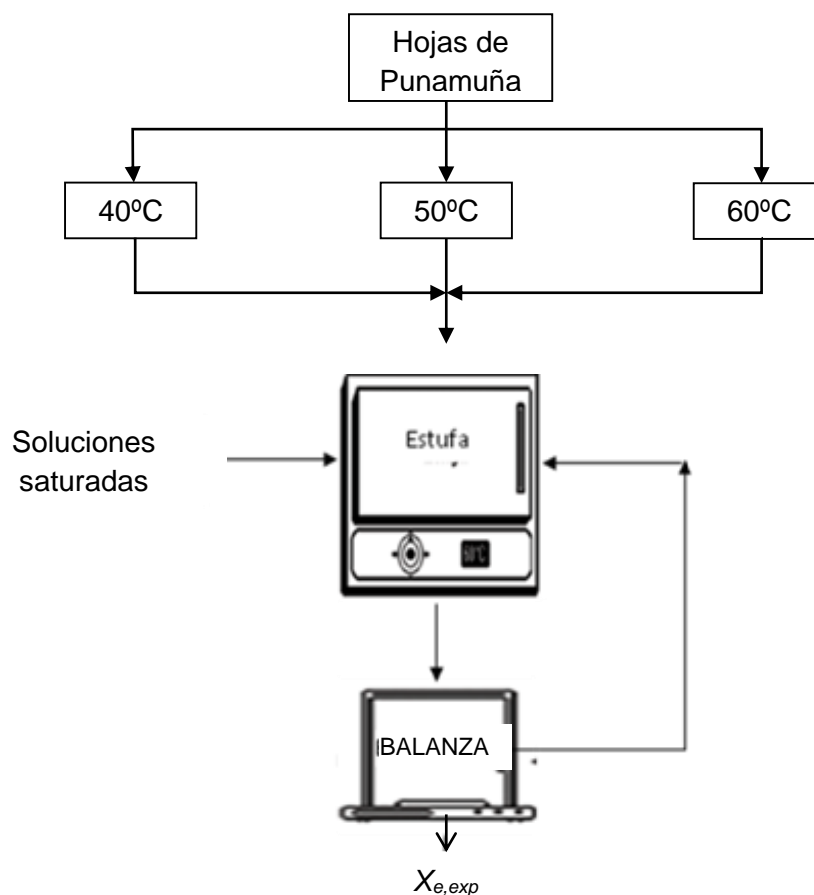


Figura (07): Flujograma para la determinación de la humedad de equilibrio X_e de las hojas de punamuña a diferentes humedades relativas (Labuza, 1984)

La humedad de equilibrio experimental en el secador ($X_{e,exp}$) (Ecuación 12) fue calculada por la diferencia entre la masa de la muestra que presentó equilibrio y la masa seca, de acuerdo a la ecuación utilizada por (Soleimani et al., 2006).

$$X_{e,exp} = \frac{m_{eq} - m_s}{m_s} \quad (\text{Ec. 12})$$

Dónde:

$X_{e,ex}$ = humedad de equilibrio experimental a la humedad relativa en b. s.
 m_{eq} = masa de la muestra en el equilibrio, (g)., y
 m_s = masa de la muestra seca, (g).

E. OPERACIÓN DE SECADO

La metodología fue propuesta por Carranza (2001), en los 5 g de hojas de punamuña previamente acondicionadas, fueron colocadas en una bandeja de acero inoxidable de 10X10 cm de lado, llenando por completo la base del recipiente, de tal manera que sólo quede expuesta a la corriente de aire de secado la superficie superior de la materia prima. La pérdida en peso de humedad durante el secado se determinó retirando y pesando una muestra de la bandeja en una balanza analítica, tal como se muestra en la (Figura 08).

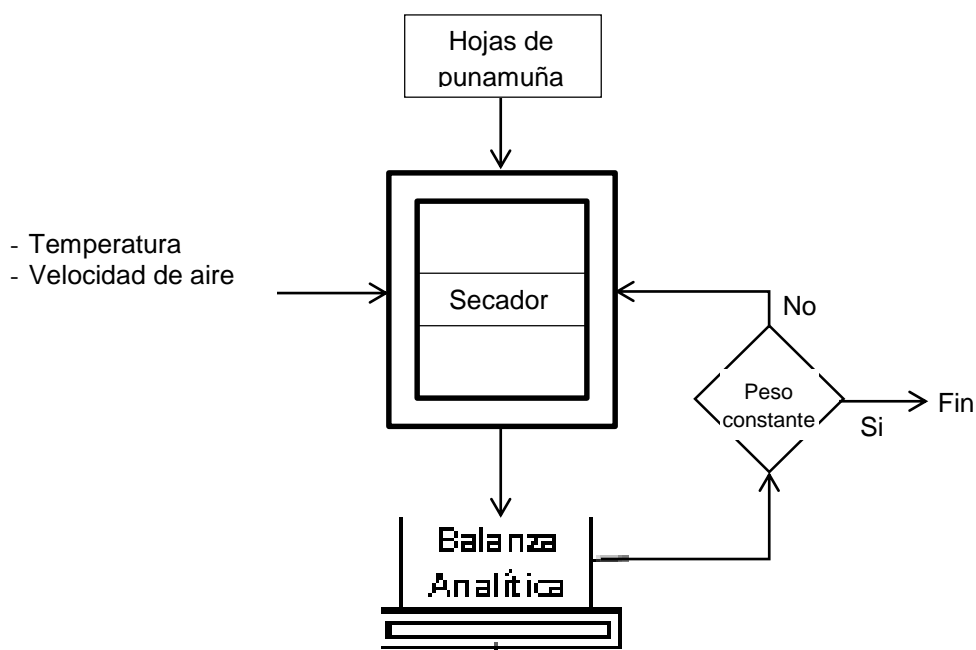


Figura 08: Esquema de la operación de secado (Carranza, 2001).

El pesado de cada muestra se realizó cada 10 minutos hasta que el peso de las muestras no varié (peso constante). Este procedimiento se desarrolló considerando dos niveles para la velocidad del aire de 0.5 m/s y 1.0 m/s, el cual se controló a través de un anemómetro marca Ohaus. Para cada velocidad de aire se realizará el secado a las temperaturas de 40, 50 y 60°C, con cinco repeticiones para cada caso.

F. EVALUACIÓN DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Los datos de la humedad de equilibrio experimental $X_{e,exp}$, se modelaron con las ecuaciones: GAB (Guggenheim, Anderson y de Boer) y HALSEY las que se presentan en la Tabla (01).

Para el ajuste de los modelos de las isothermas de adsorción se muestran ecuaciones en la Tabla (01) esta se realizara por el método de estimación Quasi-Newton basada en la diferencia mínima de cuadrados, para ello se evaluó el coeficiente de determinación (R^2), para conseguir un buen modelado de los datos experimentales y por el porcentaje de error medio relativo (%E) parámetro estadístico ampliamente utilizado en isothermas de alimentos (Toloaba *et al.*, 2004) por medio de la siguiente ecuación:

$$(\%)E = \frac{100}{n} * \sum_{i=1}^n \frac{X_{e,exp} - X_{e,mod}}{X_{e,mod}} \quad (\text{Ec. 13})$$

Dónde:

$X_{e,exp}$ = Humedad de equilibrio experimental (g agua/ g m.s.);

$X_{e,mod}$ = Humedad de equilibrio calculada a partir del modelo (g agua/g m.s.);

n = Es el número de observaciones.

Así de esa manera se obtuvo una ecuación normalizada que permita determinar la humedad de equilibrio $X_{e,mod}$ a la humedad relativa y temperatura de secado correspondiente.

La resolución de las ecuaciones de los modelos matemáticos para el cálculo de los diferentes parámetros se utilizó el programa Excel 2010 y Statistica 8.0.

2.5. MÉTODOS DE EVALUACIÓN Y ANÁLISIS

2.5.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS CURVAS SECADO

La caracterización de las curvas de secado se desarrolló graficando la evolución de la pérdida de humedad de las hojas de punamuña en función del tiempo hasta que llega al equilibrio de secado, para las diferentes temperaturas de estudio y las velocidades de secado, donde se explican el suceso de los 04 periodos correspondientes. (Pineda et al., 2009).

2.5.2. EVALUACIÓN Y MODELAMIENTO DE LA CINÉTICA DE SECADO

Se siguió la metodología propuesta por Arends y Gutiérrez (2008), se construirán curvas de secado graficando la razón de humedad (RX) de las hojas de punamuña en función del tiempo (Ecuación 14), para cada temperatura de secado.

$$RX_{exp} = \frac{X_t - X_{e,mod}}{X_0 - X_{e,mod}} \quad (\text{Ec. 14})$$

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

$X_{e,mod}$ = contenido de agua en el equilibrio, en b.s.

La determinación de la humedad de equilibrio $X_{e,mod}$, se realizó a través del modelo de isoterma de adsorción que mejor ajuste presente, considerando la humedad relativa del aire y la temperatura de secado.

En contenido de humedad en el tiempo t (X_t), se determinó de acuerdo a la Ecuación (15).

$$x_t = \frac{m_t - m_s}{m_s} \quad (\text{Ec. 15})$$

m_t = masa de la muestra en el tiempo t en gr , durante el secado, y

m_s = masa de la muestra seca, (g).

Los valores de RX_{exp} , para cada tratamiento de secado fueron ajustados a 12 modelos matemáticos los cuales se muestran en la Tabla (03) el cual permitirá describir el comportamiento durante el secado de las hojas de

punamuña donde se observa la diferencia para cada modelo el R^2 y % E respecto a ello se tomara el modelo de mayor ajuste.

Tabla 03: Modelos matemáticos para describir la cinética de secado

Modelo	Ecuación	Referencia
Exponencial simple con 2 parámetros	$RX = a. \exp(-k. t)$	Henderson y Pabis (1961)
Exponencial simple con 3 parámetros	$RX = a. \exp(-k. t) + b$	Akpinar y Bicer (2005)
Exponencial doble con 2 parámetros	$RX = a. \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-kat)$	Kassem (1998)
Exponencial doble con 3 parámetros	$RX = a. \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-kbt)$	Sharaf-Elden <i>et al.</i> (1980)
Exponencial doble con 4 parámetros	$RX = a. \exp(-k_0. t) + b. \exp(-k_1 t)$	Henderson (1974)
Exponencial triple con 6 parámetros	$RX = a. \exp(-k. t) + b. \exp(-k_0 t) + c. \exp(-k_1 t)$	Karathanos (1999)
Lewis (primer orden)	$RX = \exp(-k. t)$	Lewis (1921)
Page	$RX = \exp(-k. t^n)$	Page (1949)
Page modificado	$RX = \exp(-k. t)^n$	Overhults <i>et al.</i> (1973)
Midilli	$RX = a. \exp(-k. t^n) + b. t$	Midilli <i>et al.</i> (2002)
Thompson	$RX = \exp(-a - (a^2 + 4b. t)^{\frac{1}{2}}) / 2b$	Thompson <i>et al.</i> (1968)
Wang y Singh	$RX = 1 + a. t + b. t^2$	Wang y Singh (1978)

Dónde: a, b, c, k, k_0, k_1, n , son las constante cinéticas de los modelos

El ajuste de los modelos matemáticos a los datos experimentales así como la determinación de las constantes de los modelos, se realizó el análisis de regresión no lineal, por el método Quasi-Newton, para eso utilizamos el programa Statistica 8.0, los valores de los parámetros de los modelos serán estimados en función de la temperatura del aire de secado (Resende *et al.*, 2006).

La elección del modelo se realizó en función del coeficiente de determinación ajustado (R^2), del error medio relativo (EMR). El error medio relativo para cada modelo, serán determinados por la Ecuación (16) respectivamente, (Gutiérrez y de la Vara, 2010).

$$EMR = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - Y_0|}{Y} \quad (\text{Ec. 16})$$

Dónde:

n = número de observaciones

Y = valor observado experimental

Y_0 = valor estimado por el modelo

2.5.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS CURVAS DE VELOCIDAD DE SECADO

Las curvas de velocidad de secado se determinaron utilizando la ecuación propuesta por (Geankoplis 1998), a través de la Ecuación (17).

$$R = -\frac{X_s}{A} \cdot \frac{dX_t}{dt} \quad (\text{Ec. 17})$$

Dónde:

X_s = kg de solido seco/kg de hoja

A = área de la bandeja de secado (m^2)

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

$X_{t,i-1}$, 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)

2.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis estadístico de los datos de las respuestas se utilizó un diseño completamente aleatorizado DCA, considerando dos factores de variabilidad, la temperatura y la velocidad de aire mientras que las respuestas serán la humedad de equilibrio y la razón de humedad (RX)

Se aplicarán los siguientes análisis estadísticos:

A. ANÁLISIS DE VARIANZA

Se aplicó un ANOVA de dos factores: Velocidad y temperatura del aire de secado.

El planteamiento de hipótesis estadística para el ANOVA será:

Hipótesis nula – H_0 : La media de los resultados de la humedad de equilibrio reportada por los modelos de adsorción ($X_{e,mod}$) y la razón de humedad (RX) a las temperaturas de estudio no muestran diferencia significativa.

$$\bar{x}_i = \bar{x}_j$$

Hipótesis alterna – H_A : La media de los resultados de la humedad de equilibrio reportada por los modelos de adsorción ($X_{e,mod}$) y la razón de humedad (RX) a las temperaturas de estudio muestran diferencia significativa.

$$\bar{x}_i \neq \bar{x}_j, \text{ para algún } i, j.$$

Nivel de significancia (α)

Para el caso de comparaciones de tratamientos habitualmente se emplea $\alpha = 0.05$ (Gutiérrez y de la Vara, 2004).

B. COMPARACIÓN MÚLTIPLE

Se aplicó el test Tukey (análisis paramétrico), referidos a las variables de respuesta medibles o paramétricas.

El planteamiento de hipótesis estadística para el test Tukey, será:

Hipótesis nula – H_0 : La media de un par de los resultados de la humedad de equilibrio reportada por los modelos de adsorción ($X_{e,mod}$) y la razón de humedad (RX) a las temperaturas de estudio no muestran diferencia significativa.

$$\bar{x}_i = \bar{x}_j$$

Hipótesis alterna – H_A : La media de un par de los resultados de la humedad de equilibrio reportada por los modelos de adsorción ($X_{e,mod}$) y la razón de humedad (RX) a las temperaturas de estudio muestran diferencia significativa.

$$\bar{x}_i \neq \bar{x}_j, \text{ para algún par } i, j.$$

Nivel de significancia (α)

Para el caso de comparaciones de tratamientos habitualmente se empleó $\alpha = 0.05$ (Gutiérrez y de la Vara, 2010).

Criterio para la prueba de hipótesis

Se rechaza H_0 si $\alpha > p\text{-value}$

Para la evaluación tanto del ANOVA y Tes Tukey, se utilizó el Software Excel 2010 y Statistica 8.0.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS CURVAS DE SECADO

El desarrollo del secado de las hojas de punamuña se muestran en la Figura (09) y (10) a través de la curvas de secado a las temperaturas de 40°C, 50°C y 60°C, para una velocidad de aire de 0.5 m/s y 1.0 m/s respectivamente, a una humedad relativa de 60% medidos a través de un anemómetro (Anexo 18).

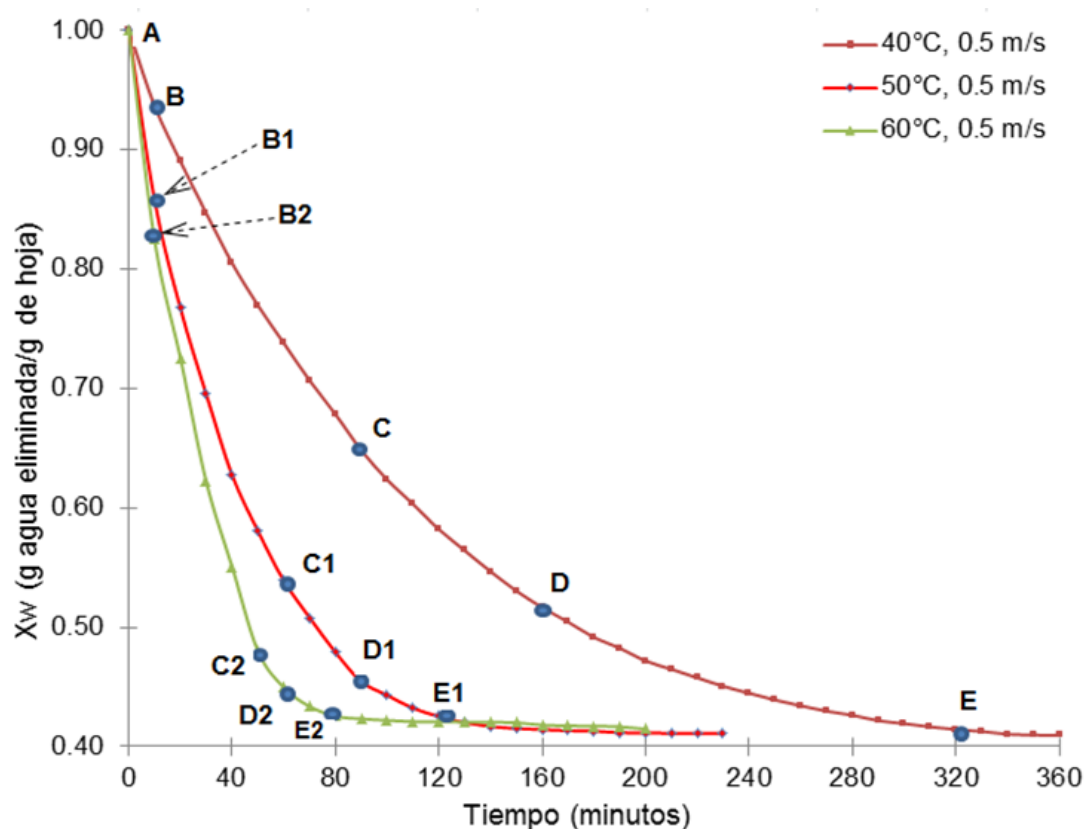


Figura 09: Curvas de secado de las hojas de punamuña a 0.5 m/s

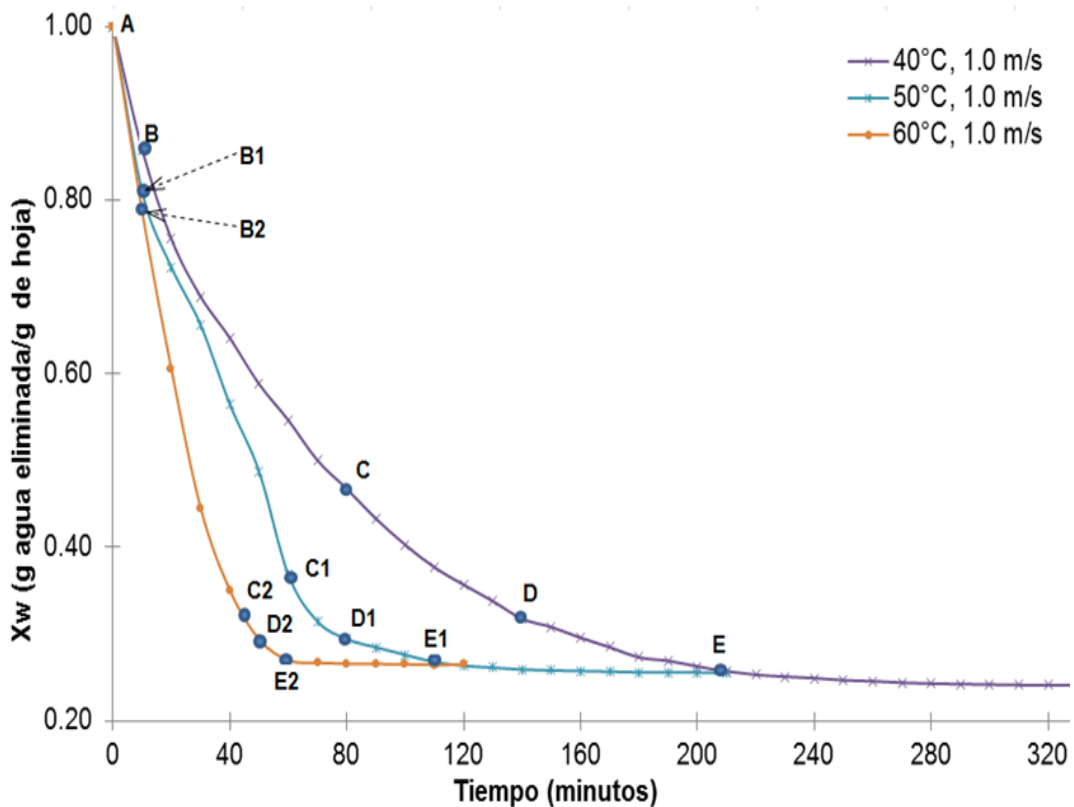


Figura 10: Curvas de secado de las hojas de punamuña a 1.0 m/s

En ambos casos se observa que existe mayor eliminación de agua de las hojas de punamuña a medida que se incrementa la temperatura, es decir al aumentar la temperatura del aire se incrementó la pendiente de la curva de secado de las hojas de punamuña, lo cual implica una disminución en el tiempo de secado, esto ocurre por una combinación de dos factores, primero: un aumento en la temperatura del producto y en del coeficiente de difusión del agua (Geankoplis, 1998), consiguiendo que la velocidad de secado sea apreciablemente menor. A esto se suma que a mayor temperatura la humedad relativa del aire es menor, lo que aumenta su capacidad para absorber agua, favoreciendo la remoción de humedad (Bimbenet *et al.*, 1985), donde la humedad inicial es 0.77 en las hojas de la punamuña, hacemos que esto representa al 100% para las gráficas correspondientes, (Gaenkoplis 1998) Así se puede confirmar que la pérdida de humedad en las hojas de punamuña depende tanto de la velocidad como de la temperatura del aire (Doymaz *et al.*, 2006).

Al observar las gráficas de las curvas de secado, se aprecia que el aumento de 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*), (García 2014) para las hoja

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 la Figura (09) se aprecia que la etapa de calentamiento inicial A-B o periodo inestable (Flores, 2008) para el secado a 40°C sucede para un intervalo de tiempo de 10 minutos, lo mismo que a 50°C y 60°C, aunque el descenso de la humedad es mayor conforme se incrementa la temperatura, este mismo hecho se manifiesta en la Figura (10) para el secado a la velocidad de aire de 1.0 m/s, aunque para este periodo a esta velocidad sucede mayor eliminación de agua, este periodo normalmente es de poca duración en la cual la evaporación no es significativa por su intensidad ni por su cantidad (Arends y Gutierrez, 2008), aunque este periodo está sujeto al tipo de material a secar (Heldman y Lund, 2007).

El periodo de secado a velocidad constante se encuentra en el intervalo B-C en las curvas de secado mostradas en las Figuras (09) y (10) este periodo tiene una duración de 80 minutos a 40°C y 0.5m/s, se observa una disminución del tiempo de secado a velocidad constante conforme se incrementa la temperatura de secado y la velocidad de aire, en esta etapa o periodo se evapora la humedad libre o no ligada de las hojas de punamuña, presentando un comportamiento no higroscópico (Heldman y Lund, 2007), así en el punto C se encuentra la humedad crítica estado en el cual comienza a disminuir la velocidad de secado, es así que en el intervalo CD de las figuras en mención se presenta la velocidad decreciente cuyos tiempos de secado disminuyen con el incremento de la temperatura. Por otra parte en el punto D la velocidad de secado disminuye con mayor rapidez en todos los casos, hasta llegar al punto E donde el contenido de humedad en las hojas de punamuña se considera como la humedad de equilibrio, las cuales se manifiestan a menor tiempo conforme se incrementa la temperatura de secado y la velocidad del aire, (Gaenkoplis 1998). De igual manera se muestra los intervalos de ocurrencia de la velocidad en las Figuras (24) y (25) para las curvas de velocidad de secado a las condiciones de estudio.

En la Figura (11), (12) y (13) se aprecia las curvas de secado en función de la velocidad de aire, donde un incremento de la velocidad del aire va unido con un incremento de la pendiente de la curva de secado, así como la disminución del tiempo de secado, este comportamiento se fundamenta en el hecho de que al elevarse la

velocidad del aire aumenta la eliminación de humedad superficial en la hoja de punamuña, dado el recambio de aire y la mayor remoción de agua que es arrastrada por este flujo (Singh y Heldman, 1993).

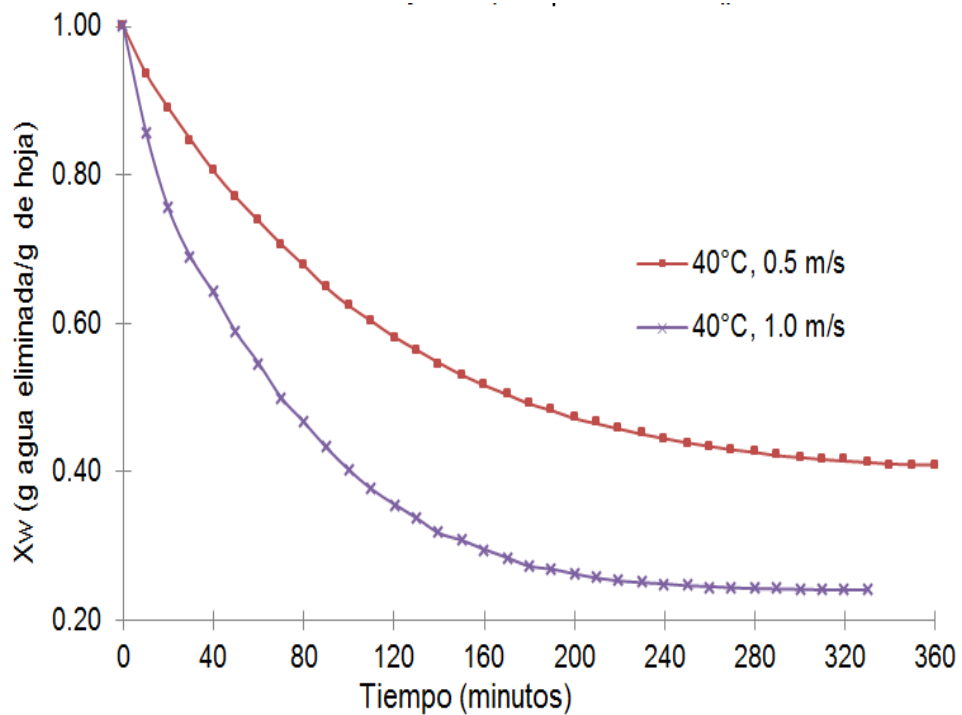


Figura 11: Curvas de secado de las hojas de punamuña a 40°C

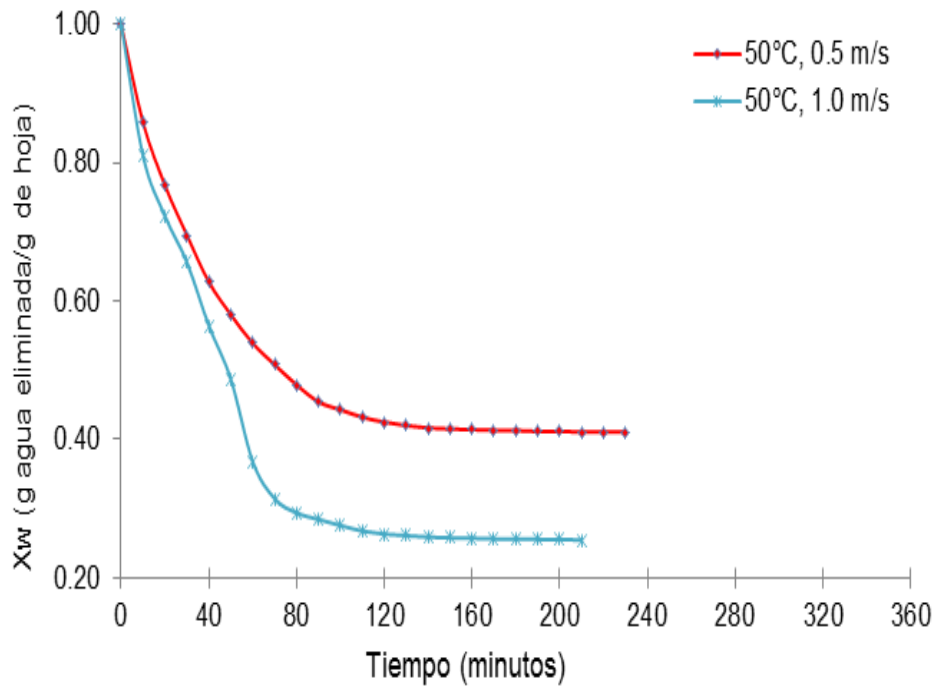


Figura 12: Curvas de secado de las hojas de punamuña a 50°C

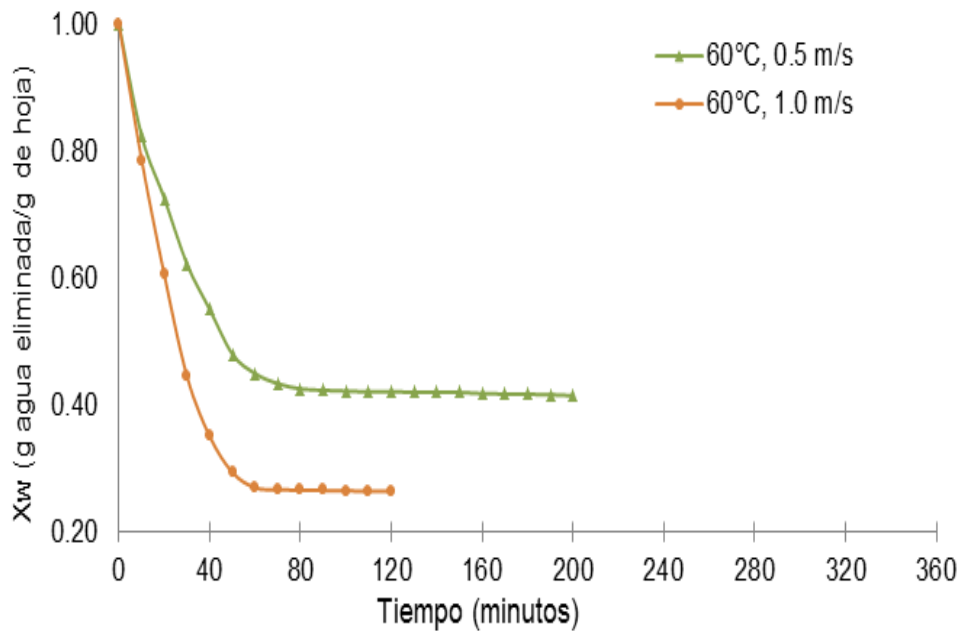


Figura 13: Curvas de secado de las hojas de punamuña a 60°C

Por otra parte en la Tabla (04) se muestra los tiempos de secado y humedades finales para los diferentes tratamientos de secado de las hojas de punamuña, se aprecia que existe un ligero incremento de la humedad final cuando se incrementa la temperatura a velocidad constante de 0.5 m/s, mientras que para la velocidad de 1.0 m/s el incremento de la humedad final es mucho mayor.

El hecho del incremento de la humedad con el incremento de la temperatura, se debe a que a mayor temperatura sucede una rápida eliminación del agua superficial de las hojas de punamuña, esto hace que el calor de vaporización sea mayor (Singh y Heldman, 1993), en consecuente eliminación del agua superficial, similar resultado obtuvo (García 2014) para las hoja de Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) y para la Hierbabuena (*Mentha spicata*) donde se incrementó la humedad a medida que se incrementaba la temperatura de secado.

Según (Geankoplis 1998), los materiales coloidales y fibrosos como vegetales y otros productos alimenticios, se contraen al eliminarse la humedad, lo que tiene como efecto el desarrollo de una capa superficial dura e impermeable al flujo de líquido o de vapor, lo que disminuyó la velocidad de secado. Uno de los factores que influye en la formación de esta capa es que, conforme el agua se mueve hacia la superficie arrastra materiales solubles como azúcares y sales y, cuando el agua se evapora en la superficie, las sustancias solubles se acumulan en esta superficie deshidratada, lo cual impide el secado (Brennan, 2006), debido al descenso de la difusividad del agua

(McCabe *et al.*, 1991). Además, en muchos alimentos, si el secado se realiza a temperaturas muy altas, se forma en la superficie una capa de células contraídas que se adhieren unas a otras formando un sello (Panyawong y Devahastin, 2007). Este fenómeno, denominado endurecimiento superficial, se constituye entonces en una barrera a la migración de la humedad (De Michelis *et al.*, 2008). Para disminuir estos efectos del secado, es factible emplear aire húmedo, el cual, debido a su saturación, tiene la propiedad de humectar la cubierta impermeable de material seco que disminuye la transferencia de masa y de calor a través del producto (Geankoplis, 1998), lo que puede explicar que la deshidratación de las hojas de punamuña se vea favorecida con el incremento de la humedad final por incremento de la temperatura. Adicionalmente, la forma aplanada de las hojas de punamuña hace que éstas se adhieran unas con otras, limitando el espacio para el paso del aire.

Tabla04: Humedad final y tiempo de secado de las hojas de punamuña.

Tratamiento	T (°C)	V (m/s)	Humedad inicial (g de agua/g hoja fresca)			Humedad final (g de agua/g hoja seca)			tiempo de secado (min)
			\bar{x}	\pm	σ	\bar{x}	\pm	σ	
T1	40	0.5	0.7736	\pm 0.0020		0.1829	\pm 0.0043 ^d	360	
T2	50	0.5	0.7736	\pm 0.0020		0.1847	\pm 0.0062 ^{d,e}	230	
T3	60	0.5	0.7736	\pm 0.0020		0.1883	\pm 0.0039 ^e	200	
T4	40	1.0	0.7736	\pm 0.0020		0.0144	\pm 0.0045 ^a	330	
T5	50	1.0	0.7736	\pm 0.0020		0.0279	\pm 0.0024 ^b	210	
T6	60	1.0	0.7736	\pm 0.0020		0.0381	\pm 0.0016 ^c	120	

Donde \bar{X} es la media, σ es la desviación estándar

Las letras iguales significan que no hay diferencia significativa, evaluadas con el test Tukey al 5% (anexo 01)

En la Tabla (05) se muestra los efectos de las variables temperatura y velocidad sobre la humedad final de las hojas de punamuña secas, evaluadas a través de un ANOVA bifactorial, los resultados indican que la temperatura y la velocidad del aire muestran efecto significativo en el secado puesto que $p\text{-value} < 0.05$, así como la interacción de las variables.

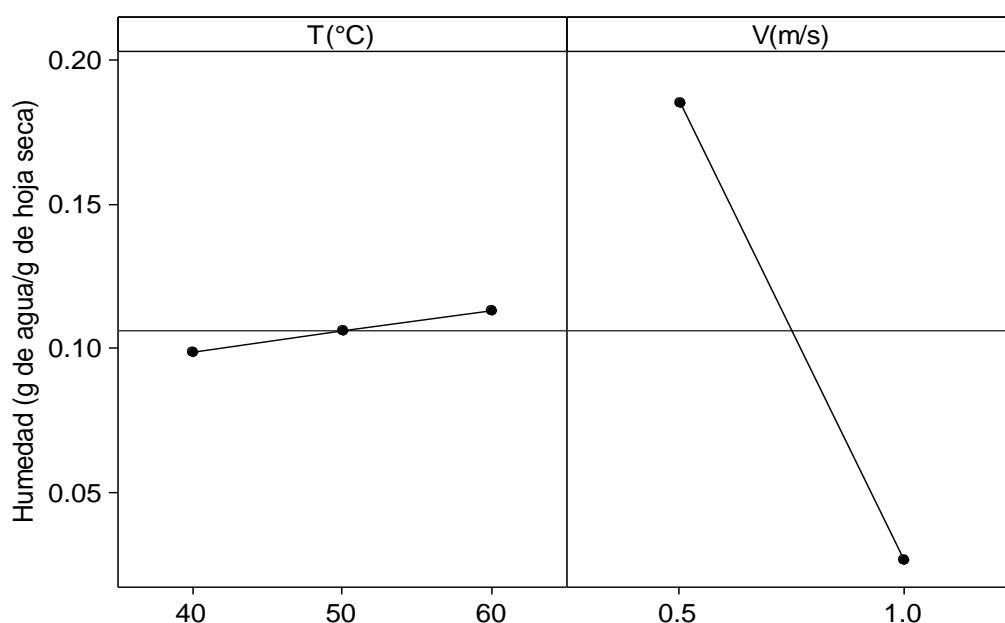
Este mismo evento se muestra en la Figura (14) donde la temperatura incrementa ligeramente la humedad final, aunque este efecto es ligeramente significativo, por el contrario la velocidad de secado influye drásticamente ya que muestra una pendiente muy pronunciada.

Tabla 05: ANOVA de los efectos de las variables para la humedad final

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	<i>p-value*</i>
A:T	0.0011	2	0.0005	31.79	0.0000
B:V	0.1884	1	0.1884	11263	0.0000
INTERACCIONES					
AB	0.0004	2	0.0002	12.78	0.0002
RESIDUOS	0.0004	24	2E-05		
TOTAL (CORREGIDO)	0.1903	29			

*Evaluados a un nivel de significancia del 5%

Figura 14: Diagrama de efectos de las variables para la humedad final



En la Tabla (04) también se muestra el tiempo de secado para los diferentes tratamientos, se observa que a medida que se incrementa la temperatura y la velocidad disminuye el tiempo de secado, logrando un tiempo mínimo de 120 minutos para una velocidad de 1 m/s a 60°C mientras, el tiempo de secado depende de la geometría y de la composición del material que se desee secar (De Michelis *et al.*, 2008), (García 2014) al deshidratar hojas de hierbabuena encuentra una disminución del tiempo con el incremento de la temperatura, logrando tiempos de secado de 5.7 h a 60°C y 33.0 h a 30°C, mientras que para la Stevia 4.0 h a 60°C y 20 h a 40°C, mientras que (García *et al.*, 2007) a temperatura de 60°C logra tiempos de secado de 82 minutos para el orégano, 90 minutos para el perejil, 197 minutos para la cebollita verde, 250 minutos para el puerro y 233 minutos para el pimiento verde.

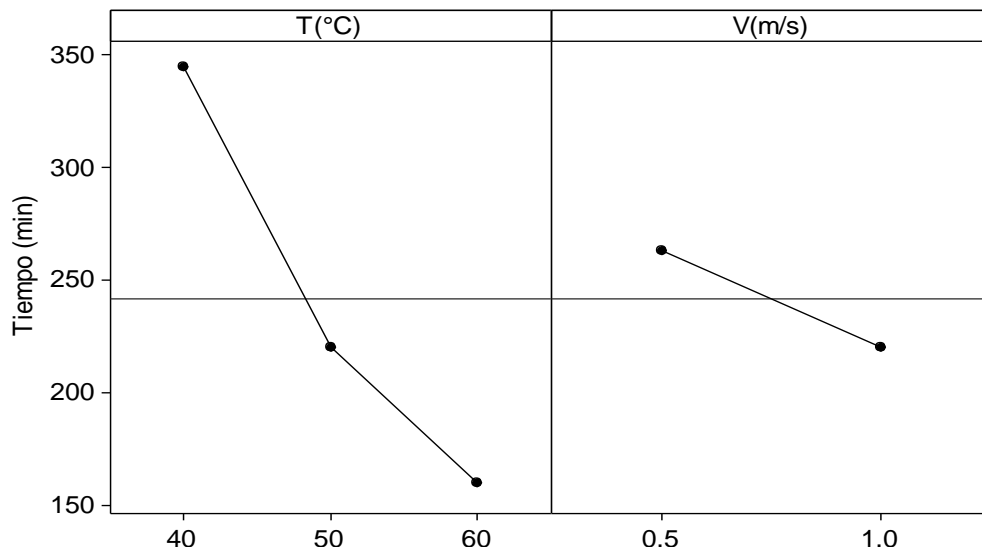
Por otra parte en la Tabla (06.) se aprecia los efectos de las variables en el tiempo de secado, se observa que la temperatura y la velocidad de aire muestra efecto significativo esto es $p\text{-value} < 0.05$, así como la interacción temperatura-velocidad, en la Figura (15) se observa este comportamiento siendo que la velocidad de aire disminuye el tiempo de secado ligeramente, mientras que el efecto de la temperatura es mayor.

Tabla 06: ANOVA de los efectos de las variables para el tiempo de secado

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	$p\text{-value}^*$
A:T	178167	2	89083	127262	0.000
B:V	14083	1	14083	20119	0.000
INTERACCIONES					
AB	5166.7	2	2583.3	3690.5	0.000
RESIDUOS	16.8	24	0.7		
TOTAL (CORREGIDO)	197433	29			

*Evaluados a un nivel de significancia del 5%

Figura 15: Diagrama de efectos de las variables para el tiempo de secado



3.2. EVALUACIÓN Y MODELADO DE LA CINÉTICA DE SECADO

Para la evaluación y modelado de la cinética de secado, previamente se calculó la humedad de equilibrio a través de las isotermas de adsorción de GAB y Halsey, los resultados se muestran en la Tabla (07) en ella se muestra que el modelo GAB es el que mejor ajuste presenta ya que presenta valores más altos de R^2 y bajos

valores de %E, el modelo de GAB es uno de los que más aplicación tiene en el área de alimentos. Debido a esto se han reportado valores de las constantes para numerosos productos y rangos de temperatura (Babalís *et al.*, 2005).

Argyropoulos *et al.*, (2012) Determinaron el estudio del contenido de humedad en equilibrio para hojas y tallos de toronjil a temperaturas de 25, 35 y 45°C, los datos experimentales de adsorción se ajustaron a cinco modelos de sorción de humedad de tres parámetros tales como Chung-Pfost, GAB, Halsey, Henderson, Oswin, donde el modelo de Oswin mostró ser el mejor modelo para describir las isotermas de adsorción tanto de hojas como de tallos de toronjil. (hodake 2007) evaluó seis modelos de curvas de sorción en hojas de té, encontrando que el modelo de Halsey modificado describe correctamente las isotermas de sorción para las hojas de té negro y verde, asimismo (García 2014), determinó las isotermas de sorción para la Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) a las temperaturas de 20°C, 50°C y 60°C para la Hierbabuena (*Mentha spicata*) a 20°C, en donde el mejor modelo que describe las isotermas de sorción para la Stevia es el modelo de Oswin y para la *Mentha spicata* es el modelo de Peleg; (García *et al.*, 2007), ajusto los datos experimentales de adsorción de la cebollita verde, puerro, pimienta verde, orégano y perejil al modelo de GAB que reporto valores de error porcentual promedio inferiores al 11%.

Así los valores de la humedad de equilibrio durante el secado de las hojas de punamuña se calcularon a partir del modelo GAB, considerando la humedad relativa del aire (HR) del 60% a la entrada del secador, asimismo la humedad de la hoja deshidratada fue del $12.10 \pm 0.55\%$ (b.h.).

La humedad de equilibrio aumenta con la temperatura siendo que para 40°C es 0.2069 g de agua / g s.s., a 50°C es 0.2252 g de agua / g s.s. y para 60°C fue de 0.2305 g de agua / g s.s., calculados a partir de la ecuación de GAB

En la Figura (16) se aprecia la gráfica de las isotermas de adsorción para las hojas de punamuña secas, ajustadas por la modelo de GAB, se observa que existe un entrecruzamiento aproximadamente a 30% de HR, a partir de este punto el incremento de temperatura incrementa la humedad de equilibrio de las hojas de punamuña, lo que guarda relación con la temperatura de secado, donde el incremento de la temperatura incrementaba la humedad final de secado en las hojas de punamuña.

Modelo	Parámetros	40°C	50°C	60°C
GAB	X_{GAB}	0.1157	0.1336	0.1285
	C_{GAB}	24.4989	10.5440	9.9037
	K_{GAB}	0.7763	0.7750	0.8245
	R^2	0.9454	0.9560	0.9701
	%E	7.92	6.75	6.90
	%HR (aire)	60.0	60.0	60.0
	X_e (g de agua / g s.s.)	0.2069	0.2252	0.2305
Halsey	A	0.0090	0.0127	0.0183
	B	2.5075	2.3735	2.1794
	R^2	0.9131	0.9013	0.9325
	%E	13.10	18.54	17.88
	%HR (aire)	60.0	60.0	60.0
	X_e (g de agua / g s.s.)	0.1994	0.2105	0.2169

Los datos experimentales se muestran en el anexo (02)

*Evaluados a un nivel de significancia del 5%

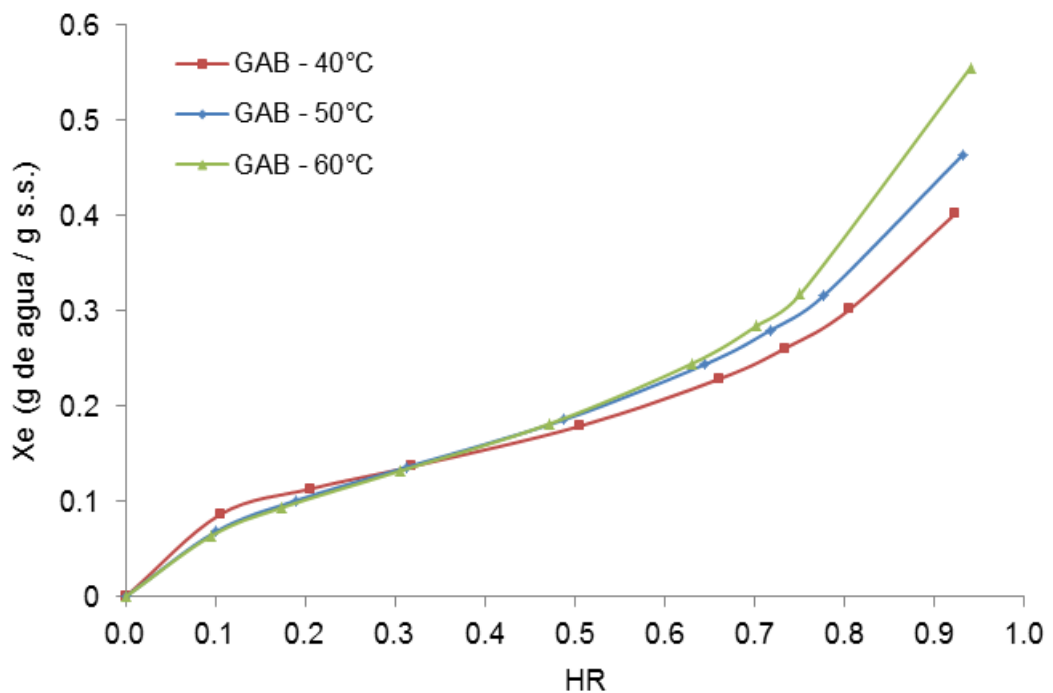


Tabla 07: Humedad de equilibrio (X_e) y parámetros de los modelos

Así el modelado de las curvas de secado se realizó a través de 12 modelos o ecuaciones matemáticas propuestas, los resultados se muestran en las tablas siguientes.

En la Tabla (08) se muestra los parámetros y los estadígrafos para el modelado del secado de las hojas de punamuña a 40°C y 0.5 m/s, en ella se aprecia que los modelos presentan valores del coeficiente de correlación R^2 mayores a 0.98 y error medio relativo E menores al 7.43%, Gutiérrez y de la Vara (2004) menciona que valores de R^2 superiores a 0.7 son considerados de buen ajuste a la hora de evaluar modelos matemáticos, sin embargo el modelo de Midilli es el que presenta mejor valor de R^2 (0.996) y menor valor de %E (6.59), no obstante en la Figura (17) se observa que su curva modelada presenta una tendencia de incremento de la humedad en el tiempo, esto no es característico de las curvas de secado, las curvas de secado siguen una atendencia exponencial negativa (Resende *et al.*, 2006), el hecho de que el modelo de Midilli persiga la tendencia creciente para tiempos mayores de secado se puede deber a que presenta una constante “ a ” la cual es aditiva en el tiempo ya que esta es positiva. Por otra parte el modelo de Wang y Singh presenta alta desviación debido a que este es del tipo cuadrático.

Tabla 08: Parámetros y estadígrafos en el modelado del secado a 40°C y 0.5 m/s

Modelo	Parámetros	R^2	%E	Test Tukey*
Exponencial simple con 2 parámetros	a 0.9894	0.994	7.4100	A
	k 0.0177			
Exponencial simple con 3 parámetros	a 0.9894	0.996	7.4150	A
	k 0.0177			
	b 0.0000			
Exponencial doble con 2 parámetros	a 0.0208	0.994	7.4260	A
	k 0.8435			
Exponencial doble con 3 parámetros	a 0.0000	0.995	7.3367	A
	k 0.0207			
	b 0.8644			
Exponencial doble con 4 parámetros	a 0.0208	0.994	7.4261	A
	k0 2.0000			
	b 0.9792			
	k1 0.0175			
Exponencial triple con 6 parámetros	a 0.3297	0.994	7.4159	A
	k 0.0177			
	b 0.3297			
	k0 0.0177			
	c 0.3297			
	k1 0.0177			
Lewis (primer orden)	k 0.0179	0.994	7.337	A
Page	k 0.0159	0.994	6.998	A
	n 1.0273			
Page modificado	k 0.1338	0.994	7.337	A
	n 0.1338			
Midilli	a 0.9632	0.996	6.597	A
	k 0.0123			
	n 1.0784			
	b 0.0000			
Thompson	a -60.8201	0.995	5.641	A
	b -2.8023			
Wang y Singh	a -0.0097	0.98		A
	b 0.9894			

*Las letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencia significativa, evaluados a un nivel de significancia del 5%, los reportes de los cálculos se muestran en el anexo (03) y (04).

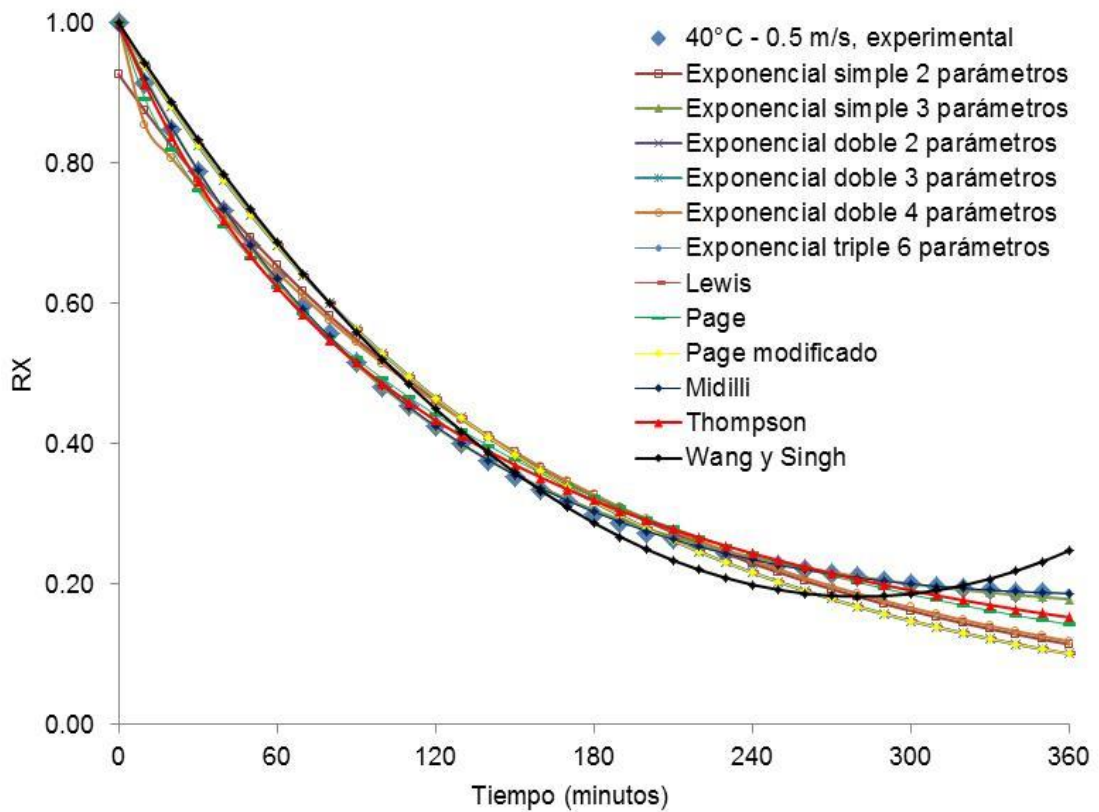


Figura 17: Modelado de las curvas de secado a 40°C y 0.5 m/s

La comparación múltiple de las curvas de secado revela que no existe diferencia significativa, $p\ value > 0.05$ (Tabla 09 – ANOVA), entre los 12 modelos estudiados letras iguales en la Tabla (08) evaluadas a través del test Tukey, es decir cualquier moldeo podría representar el proceso de secado de las hojas de punamuña.

Tabla 09: ANOVA para los modelos de secado a 40°C – 0.5 m/s

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.00458707	11	0.000417007	0.01	1.0000
Intra grupos	25.755	432	0.059618		
Total (Corr.)	25.7595	443			

*Evaluados a un nivel de significancia del 5%

Tabla 10: Parámetros y estadígrafos en el modelado del secado a 50°C y 0.5 m/s

Modelo	Parámetros	R^2	%E	Test Tukey*
Exponencial simple con 2 parámetros	A 0.8583 k 0.0113	0.8942	42.35	A
Exponencial simple con 3 parámetros	a 0.8265 k 0.0250 b 0.1737	0.999	2.75	A
Exponencial doble con 2 parámetros	a 0.2583 k 0.0402	0.922	38.66	A
Exponencial doble con 3 parámetros	a 0.8780 k 0.0229 b -0.0790	0.999	1.47	A
Exponencial doble con 4 parámetros	a 0.1169 k ₀ -0.0020 b 0.8760 k ₁ 0.0225	0.994	1.52	A
Exponencial triple con 6 parámetros	a 0.1168 k -0.0020 b 0.5306 k ₀ 0.0225 c 0.3454 k ₁ 0.0225	0.999	1.52	A
Lewis (primer orden)	k 0.0137	0.858	71.23	A
Page	k 0.0741 n 0.6185	0.966	16.02	A
Page modificado	k 0.1171 n 0.1171	0.858	71.23	A
Midilli	a 0.9989 k 0.0258 n 0.9276 b 0.0008	0.999	2.00	A
Thompson	a -27.3734 b 38.4091	0.974	14.74	A
Wang y Singh	a -0.0113 b 3.6E-05	0.892		A

*Las letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencia significativa, evaluados a un nivel de significancia del 5%, los reportes de los cálculos se muestran en el anexo (05) y (06).

En la Tabla (10) se presenta los parámetros y los estadígrafos para los modelos que evalúan las curvas de secado a 50°C y 0.5 m/s, en ella se aprecia que los

modelos reportan estadígrafos de R^2 mayores a 0.85 y %E menores a 71.23, el modelo que mejor ajuste presenta es el Exponencial doble con 03 parámetros ($R^2 = 0.999$ y %E = 1.47), sin embargo cuando se aprecia la gráfica (Figura 18) se observa una tendencia creciente para tiempos de secado mayores a 230 minutos, nuevamente este hecho son anómalos para este tipo de proceso de secado. Nuevamente el modelo de Wang y Singh muestra un diferente a los otros moldeos, como ya se indicó este hecho se atribuye a que la ecuación es del tipo cuadrático.

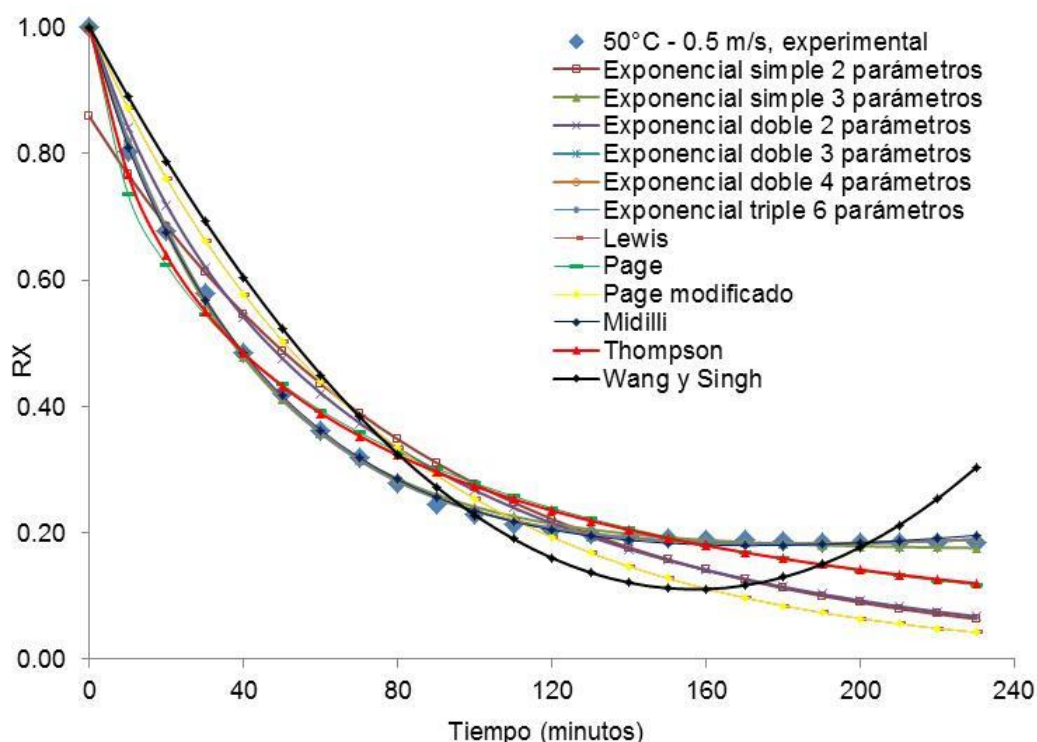


Figura 18: Modelado de las curvas de secado a 50°C y 0.5 m/s

Al realizar la comparación múltiple a través del ANOVA (Tabla 11) se aprecia que $p\text{-value} > 0.05$, esto indica que las RX reportadas por los modelos no presentan diferencia significativa, esto se contrasta con la aplicación del test Tukey (letras iguales en la Tabla 10).

Tabla 11: ANOVA para los modelos de secado a 50°C – 0.5 m/s

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.026	11	0.002	0.04	1
Intra grupos	16.191	277	0.058		
Total (Corr.)	16.217	288			

*Evaluados a un nivel de significancia del 5%

En la Tabla (12) se aprecia los resultados del modelado del secado de las hojas de punamuña a 60°C y 0.5 m/s, los valores de R^2 son mayores a 0.76 mientras que %E son menores a 13.6%, el modelo que mejor ajuste presento fue el Exponencial triple con 6 parámetros con R^2 0.997 y %E 3.04, aunque este modelo al observar en la gráfica presenta una tendencia creciente cuando se simulan tiempos de secado mayores a 200 minutos (Figura 19).

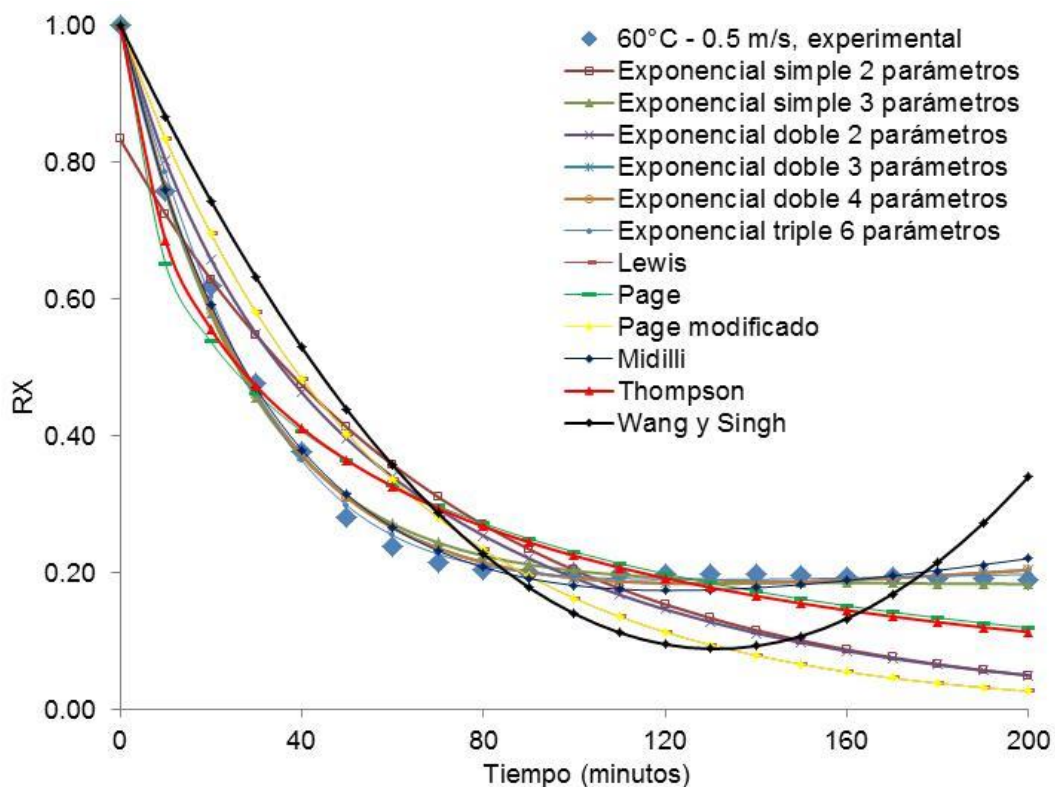


Figura 19: Modelado de las curvas de secado a 60°C y 0.5 m/s

Tabla 12: Parámetros y estadígrafos en el modelado del secado a 60°C y 0.5 m/s

Modelo	Parámetros	R^2	%E	Test Tukey*
Exponencial simple con 2 parámetros	a 0.8332 k 0.0141	0.8077	68.42	A
Exponencial simple con 3 parámetros	a 0.8347 k 0.0374 b 0.1826	0.993	5.04	A
Exponencial doble con 2 parámetros	a 0.2713 k 0.0496	0.845	69.11	A
Exponencial doble con 3 parámetros	a 0.8748 k 0.0329 b -0.0730	0.995	4.66	A
Exponencial doble con 4 parámetros	a 0.8822 k_0 0.0336 b 0.1286 k_1 -0.0023	0.995	4.60	A
Exponencial triple con 6 parámetros	a -8.7668 k 0.0591 b 0.1697 k_0 -0.0007 c 9.5900 k_1 0.0562	0.997	3.04	A
Lewis (primer orden)	k 0.0182	0.763	136.94	A
Page	k 0.1251 n 0.5350	0.932	21.24	A
Page modificado	k 0.1400 n 0.1300	0.858	136.94	A
Midilli	a 1.0050 k 0.0332 n 0.9473 b 0.0011	0.993	6.84	A
Thompson	a -12.8364 b 36.1437	0.938	22.77	A
Wang y Singh	a -0.0139 b 5.3E-05	0.792	42.46	A

*Las letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencia significativa, evaluados a un nivel de significancia del 5%, los reportes de los cálculos se muestran en el anexo (07) y (08).

El ANOVA indica que no existe diferencia significativa entre los modelos evaluados, ya que $p\text{-value} > 0.05$ (Tabla 13) donde indica que cualquier modelo podría

representar el proceso de secado de las hojas de punamuña, sin embargo algunos a pesar de presentar altos valores de R^2 tienen una tendencia creciente de la humedad final de secado para tiempos mayores a 200 minutos, este hecho se puede deber a que estos modelos crecientes tienen en su ecuación constante aditivas a la parte exponencial.

Tabla 13: ANOVA para los modelos de secado a 60°C – 0.5 m/s

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.026	11	0.002	0.04	1.00
Intra grupos	16.191	277	0.058		
Total (Corr.)	16.217	288			

*Evaluados a un nivel de significancia del 5%

En la Tabla (14) se presenta los parámetros y estadígrafos del modelado del secado de las hojas de punamuña a 40°C y 1.0 m/s, se observa que los modelos presentan un coeficiente de correlación R^2 similares aunque para el modelo Wang y Singh este es de apenas 0.98, sin embargo el modelo Thompson presenta el menor valor de %E (5.64).

La tendencia de las curvas es similar en todos los casos o modelos de secado (Figura 20) a excepción de moldeo de Wang y Singh el cual tiene una tendencia creciente, que anómala a las curvas de secado.

Tabla 14: Parámetros y estadígrafos en el modelado de secado a 40°C y 1.0 m/s

Modelo	Parámetros	R^2	%E	Test Tukey*
Exponencial simple con 2 parámetros	a 0.9894	0.994	7.41	A
	k 0.0177			
Exponencial simple con 3 parámetros	a 0.9894	0.996	7.42	A
	k 0.0177			
	b 0.0000			
Exponencial doble con 2 parámetros	a 0.0208	0.994	7.43	A
	k 0.8435			
Exponencial doble con 3 parámetros	a 0.0000	0.995	7.34	A
	k 0.0207			
	b 0.8644			
Exponencial doble con 4 parámetros	a 0.0208	0.994	7.43	A
	k_0 2.0000			
	b 0.9792			
	k_1 0.0175			
Exponencial triple con 6 parámetros	a 0.3297	0.994	7.42	A
	k 0.0177			
	b 0.3297			
	k_0 0.0177			
	c 0.3297			
	k_1 0.0177			
Lewis (primer orden)	k 0.0179	0.994	7.34	A
Page	k 0.0159	0.994	7.00	A
	n 1.0273			
Page modificado	k 0.1338	0.994	7.34	A
	n 0.1338			
Midilli	a 0.9632	0.996	6.60	A
	k 0.0123			
	n 1.0784			
	b 0.00E+00			
Thompson	a -60.8201	0.995	5.64	A
	b -2.8023			
Wang y Singh	a -0.0097	0.98		A
	b 2.15E-05			

*Las letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencia significativa, evaluados a un nivel de significancia del 5%, los reportes de los cálculos se muestran en el anexo (08) y (10).

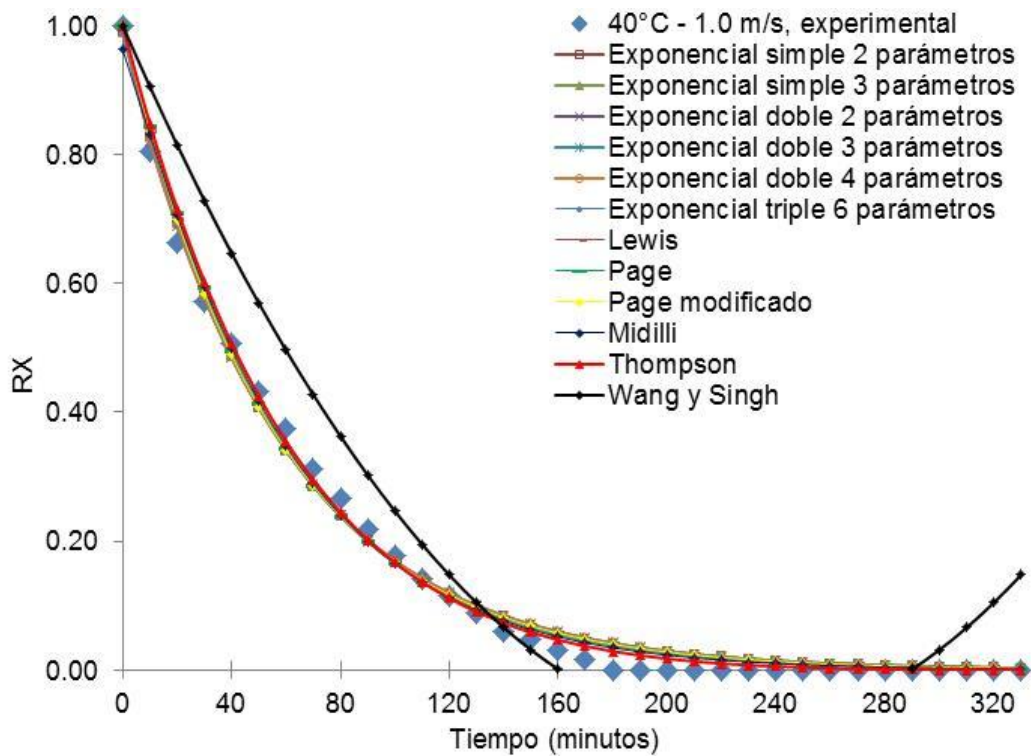


Figura 20: Modelado de las curvas de secado a 40°C y 1.0 m/s

Al realizar el ANOVA (Tabla 15) se aprecia que los modelos no muestran diferencia significativa, $p\text{-value} > 0.05$, esto indica que cualquiera de los modelos podría ser útil para simular el proceso de secado

Tabla 15: ANOVA para los modelos de secado a 40°C – 1.0 m/s

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.0084	11	0.00076	0.01	1.000
Intra grupos	27.868	396	0.07037		
Total (Corr.)	27.876	407			

*Evaluados a un nivel de significancia del 5%

Por otro lado en la Tabla (16) se presentan los resultados del modelamiento del proceso de secado de las hojas de punamuña a 50°C y 1.0 m/s, a través de los parámetros y estadígrafos, en ella se aprecia que los modelos reportan valores de R^2 mayores a 0.97, con excepción del modelo Wang y Sinhg, por otra parte los valores de %E es menor para el modelo Midilli, Page y Thompson, las curvas de secado modeladas se presentan en la Figura (20) donde se ve claramente que el modelo Wang y Singh presenta un crecimiento pronunciado a tiempos de secado prolongados.

Tabla 16: Parámetros y estadígrafos en el modelado desecado a 50°C y 1.0 m/s

Modelo	Parámetros	R^2	%E	Test Tukey*
Exponencial simple con 2 parámetros	a 1.0354	0.974	14.06	A
	k 0.0294			
Exponencial simple con 3 parámetros	a 1.0353	0.978	14.06	A
	k 0.0294			
	b 0.0000			
Exponencial doble con 2 parámetros	a 0.0012	0.973	14.04	A
	k 23.5533			
Exponencial doble con 3 parámetros	a -201.21	0.984	12.25	A
	k 0.0486			
	b 0.9966			
Exponencial doble con 4 parámetros	a 0.4899	0.974	14.06	A
	k_0 0.0294			
	b 0.5454			
	k_1 0.0294			
Exponencial triple con 6 parámetros	a 0.3451	0.974	14.06	A
	k 0.0294			
	b 0.3451			
	k_0 0.0294			
	c 0.3452			
	k_1 0.0294			
Lewis (primer orden)	k 0.0286	0.973	14.04	A
Page	k 0.0090	0.985	11.85	A
	n 1.3000			
Page modificado	k 0.1690	0.973	14.04	A
	n 0.1690			
Midilli	a 0.9454	0.987	11.48	A
	k 0.0055			
	n 1.4150			
	b 0.0000			
Thompson	a -38.497	0.979	13.28	A
	b -1.611			
Wang y Singh	a -0.0147	0.874	16.15	A
	b 0.0000			

*Las letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencia significativa, evaluados a un nivel de significancia del 5%, los reportes de los cálculos se muestran en el anexo (11) y (12).

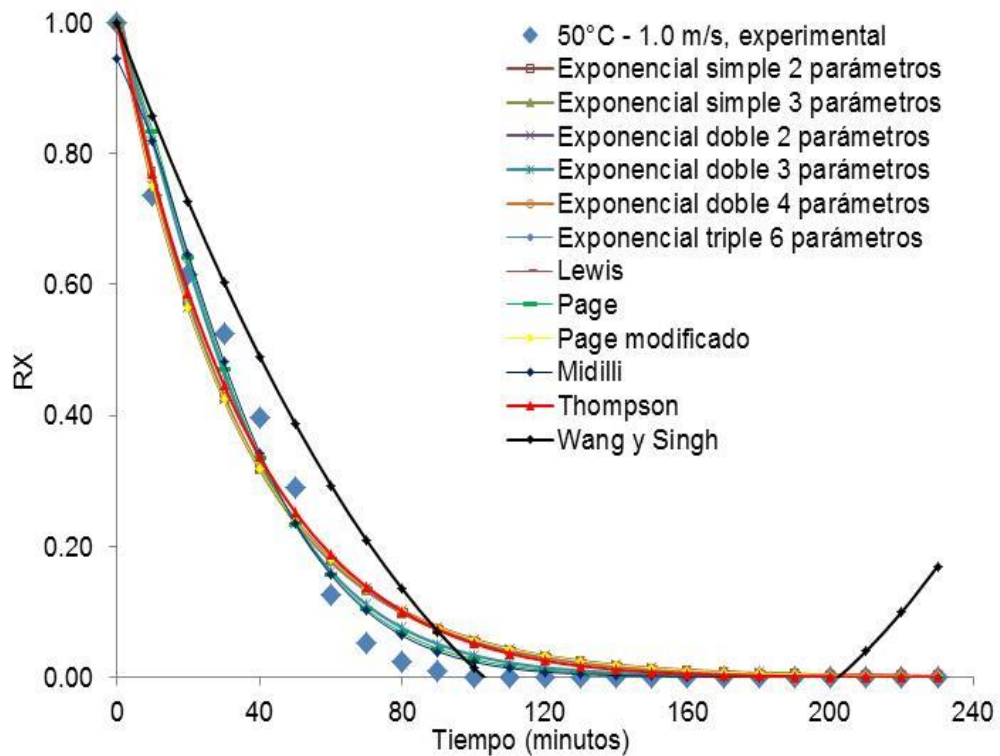


Figura 21: Modelado de las curvas de secado a 50°C y 1.0m/s

El ANOVA mostrado en la Tabla (17) indica que los modelos no presentan diferencia significativa en referencia a modelar curvas de secado de las hojas de punamuña, ya que $p\text{-value} > 0.05$.

Tabla 17: ANOVA para los modelos de secado a 50°C – 1.0 m/s

Fuente	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.0084	11	0.00076	0.01	1.000
Intra grupos	27.868	396	0.07037		
Total (Corr.)	27.876	407			

*Evaluados a un nivel de significancia del 5%

En la Tabla (18) se presenta los parámetros y estadígrafos de los modelos evaluados, donde los valores de R^2 se encuentran por encima de 0.97, el modelo Wang y Singh presenta el menor valor de R^2 y mayor valor de %E, este mismo modelo en la Figura (21) presenta un incremento de RX en el tiempo, lo cual es típico para los procesos de secado, a pesar de suceder este hecho los modelos evaluados no muestran diferencia significativa entre ellos, ya que $p\text{-value} > 0.05$ (Tabla 19).

Tabla 18: Parámetros y estadígrafos en el modelado de secado a 60°C y 1.0 m/s

Modelo	Parámetros	R^2	%E	Test Tukey*
Exponencial simple con 2 parámetros	a 1.0457	0.983	10.86	A
	k 0.0494			
Exponencial simple con 3 parámetros	a 1.0457	0.987	10.86	A
	k 0.0494			
	b 0.0000			
Exponencial doble con 2 parámetros	a 0.0000	0.981	11.12	A
	k 1432.0			
Exponencial doble con 3 parámetros	a -353.11	0.997	6.47	A
	k 0.0914			
	b 0.9975			
Exponencial doble con 4 parámetros	a 0.4848	0.983	10.86	A
	k_0 0.0494			
	b 0.5609			
	k_1 0.0494			
Exponencial triple con 6 parámetros	a 0.3485	0.974	10.86	A
	k 0.0494			
	b 0.3486			
	k_0 0.0494			
	c 0.3486			
	k_1 0.0494			
Lewis (primer orden)	k 0.0477	0.981	11.11	A
Page	k 0.0120	0.998	5.35	A
	n 1.4221			
Page modificado	k 0.2184	0.981	11.11	A
	n 0.2184			
Midilli	a 0.9917	0.998	5.30	A
	k 0.0113			
	n 1.4376			
	b 0.0000			
Thompson	a -18.05	0.967	13.12	A
	b -0.6790			
Wang y Singh	a -0.0266	0.941	13.32	A
	b 0.0002			

*Las letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencia significativa, evaluados a un nivel de significancia del 5%, los reportes de los cálculos se muestran en el anexo (13) y (14).

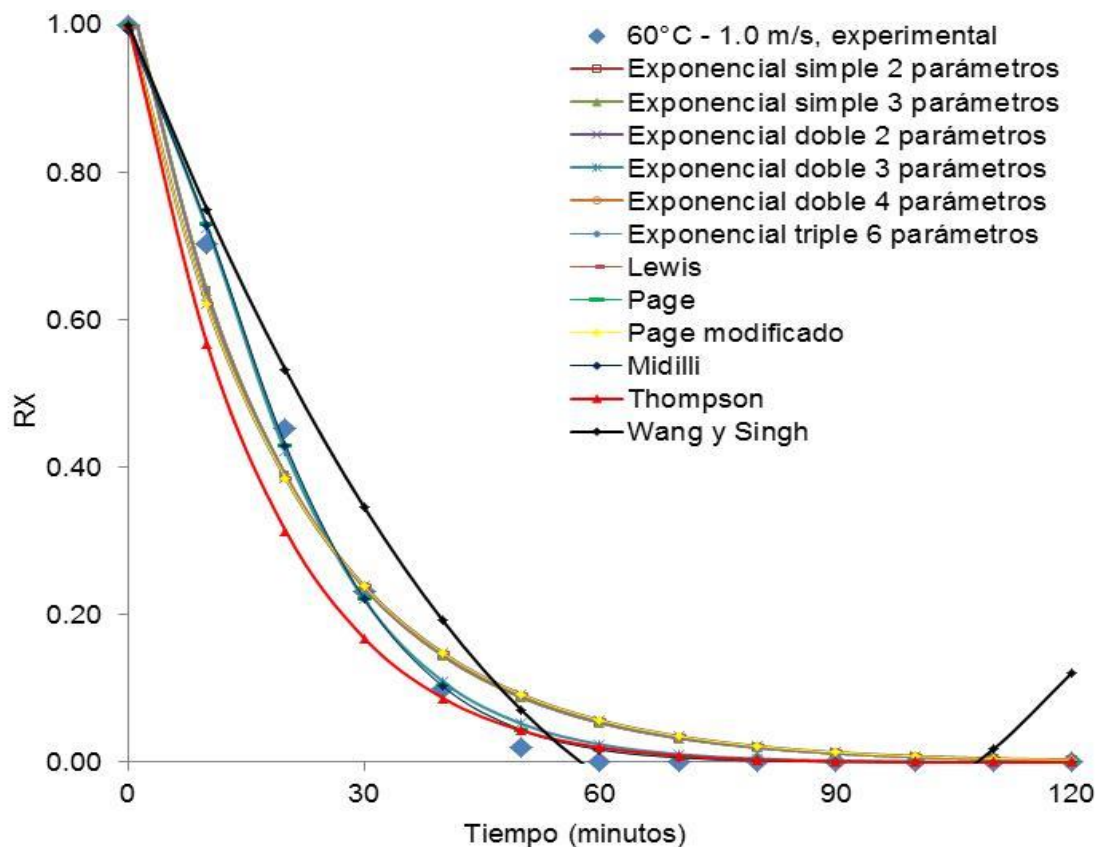


Figura 22: Modelado de las curvas de secado a 60°C y 1.0 m/s

Tabla 19: ANOVA para los modelos de secado a 60°C – 1.0 m/s

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.014	11	0.0013	0.01	1.00
Intra grupos	14.415	144	0.1001		
Total (Corre.)	14.430	155			

*Evaluados a un nivel de significancia del 5%

De acuerdo a los estadígrafos evaluados para cada temperatura y velocidad de aire se determinó que los modelos, Exponencial doble con 2 parámetros, Exponencial doble con 3 parámetros, Lewis, Page, Page modificado y Thompson, son los que mejor ajuste presentan. No obstante para la velocidad de secado de 0.5 m/s el modelo de Thompson en el que mejor ajuste presenta ($R^2 > 0.94$ y $\%E < 22.77$), mientras que para velocidades de secado de 1.0 m/s el modelo Page es el que mejor ajuste presenta ($R^2 > 0.985$ y $\%E < 11.85$).

La ecuación de Page puede predecir mejor el comportamiento de la pérdida de agua (Moreira y Murr, 2004), el modelo Page y Page modificado son los que mejor describen el proceso de secado de tomillo para temperaturas en el intervalo de 30°C

y 70°C (Da Rocha, 2012), para el perejil en el rango de 50°C a 70°C (García, *et al.*, 2010), (Della 2010) encontró que el modelo de Page ajustó satisfactoriamente para el secado convectivo de papa, así como Doymaz (2010), en el secado de tomillo (*Thymus vulgaris*) por aire a convección del aire de secado en el rango de 40 a 60°C, velocidad del aire de 2 m/s y la humedad relativa de 14 a 45%, fueron utilizados varios modelos matemáticos a los datos experimentales y el modelo de Midilli fue que mejor se ajusta a los datos experimentales, asimismo para el secado de las hojas de Laurel (*Laurus nobilis* L.), Demir *et al.*, (2004) utilizaron diferentes métodos de secado (aire a 40,50 y 60°C, secado a sol y sombra), entre los diversos modelos matemáticos ajustados a los datos experimentales, el modelo de Page fue el que mejor describía el proceso de secado para las condiciones estudiadas, por otra parte en el estudio realizado con hojas de alecrim (*Rosmarinus officinalis* L.) (Arslan y Ozcan 2008) utilizaron 3 métodos de secado (a sol con temperaturas en un rango de 20 a 30°C, estufa a 50°C y en microondas a 700 W), los autores verificaron que el modelo exponencial simple de 3 parámetros y el de Midilli y Kucuk fueron los más adecuados para describir el proceso de secado realizado mediante el sol y en la estufa, mientras que los modelos de Page, Page modificado, Midilli y Kucuk fueron los que mejor se ajustaban los datos experimentales de secado con el microondas.

Radünz *et al.*, (2011) utilizó seis temperaturas de aire de secado (40, 50, 60, 70, 80 e 90°C), con el objetivo de estudiar la cinética de secado de la Carqueja (*Baccharis trimera*), los autores ajustaron los datos experimentales a doce modelos matemáticos, concluyendo que el modelo de Midilli, presentó el mejor ajuste a los datos para el rango de temperatura de 40 a 90°C, y el modelo de Page presentó un ajuste adecuado a los datos experimentales para el rango de temperatura de 60 a 90°C.

En la Figura (23) se muestra las curvas de secado y modelado con la ecuación de Thompson ($R^2 > 0.94$ y $\%E < 22.77$), y donde se muestra una tendencia exponencial negativa para ambas velocidades de la curva a 0.5m/s, en ella se aprecia la relación inversa de la eliminación de humedad con la temperatura y que a mayor temperatura la curva presenta mayor pendiente, esto es, sucede mayor pérdida de agua en menor tiempo, mientras que en la Figura (24) se aprecia las curvas de secado modelado con la ecuación de Page, ($R^2 > 0.985$ y $\%E < 11.85$).

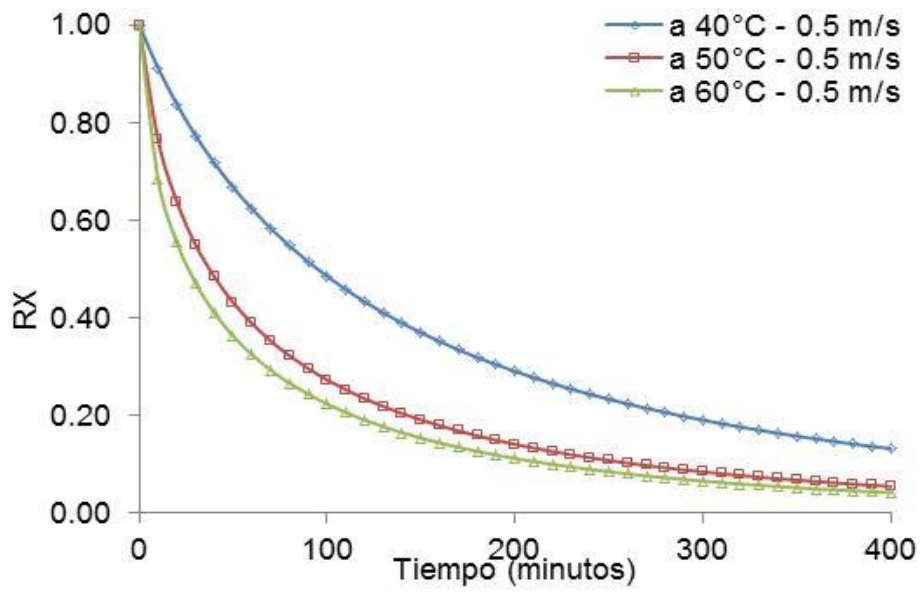


Figura 23: Modelado de las curvas de secado - Modelo Thompson a 0.5 m/s

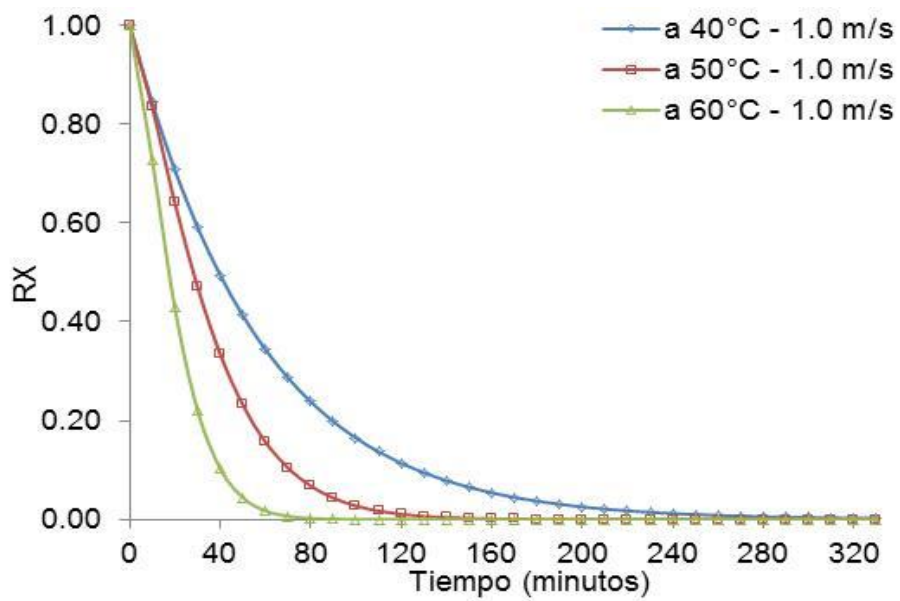


Figura 24: Modelado de las curvas de secado - Modelo Page a 1.0 m/s

3.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS CURVAS DE VELOCIDAD

A partir de la ecuación (18) con $A= 0.01 \text{ m}^2$ y $X_s = 22.6\%$, se muestran las curvas de velocidad en la Figuras (25) y (26).

En la Figura (25) se muestra las curvas de velocidad para las hojas de punamuña a 40°C , 50°C y 60°C a la velocidad de aire de 0.5 m/s , al principio las hojas 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 20) y que esta disminuye conforme se incrementa la temperatura, este mismo hecho sucede para la velocidad de aire de secado a 1.0 m/s (Figura 26) asimismo en ambas figuras se pueden apreciar que para alcanzar la velocidad de secado constante se requiere más tiempo a menor temperatura, así a 40°C y 1.0m/s se logra luego de los 30 minutos de iniciado el secado, a 50°C y 1.0 m/s a los 20 minutos y a 60°C y 1.0m/s a los 10 minutos.

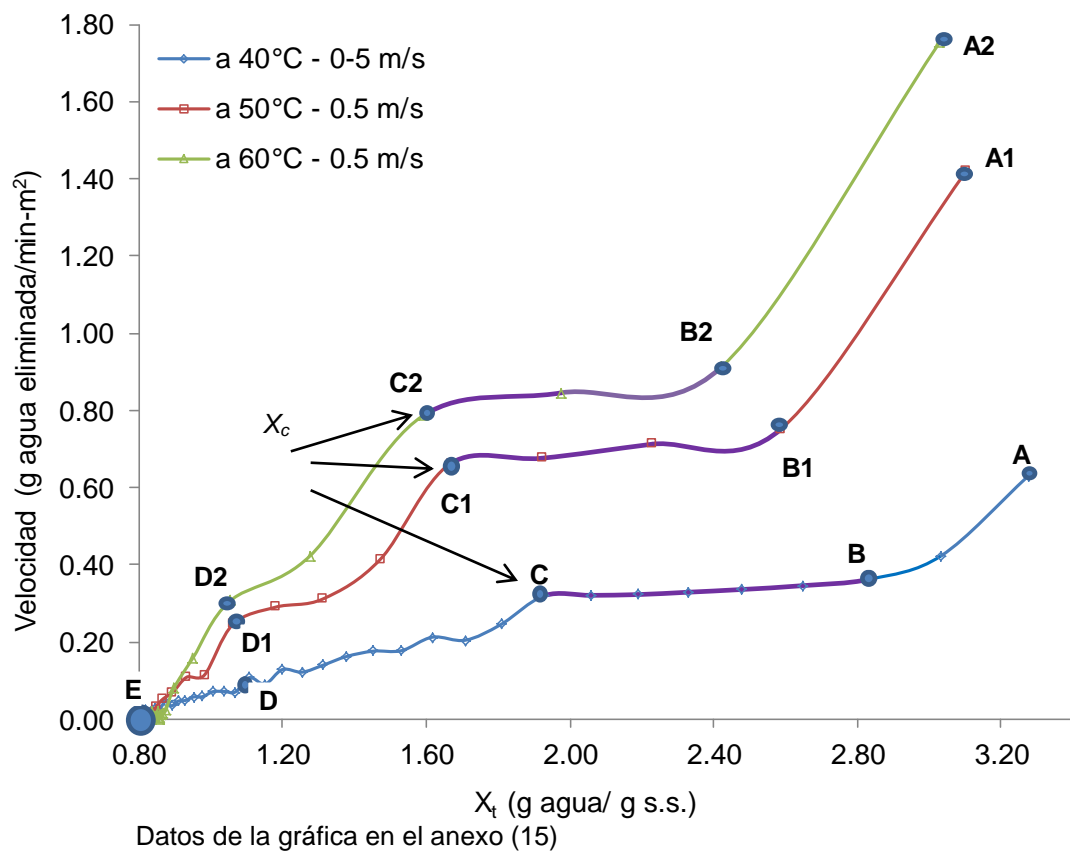


Figura 25: Curvas de velocidad a 0.5 m/s de aire

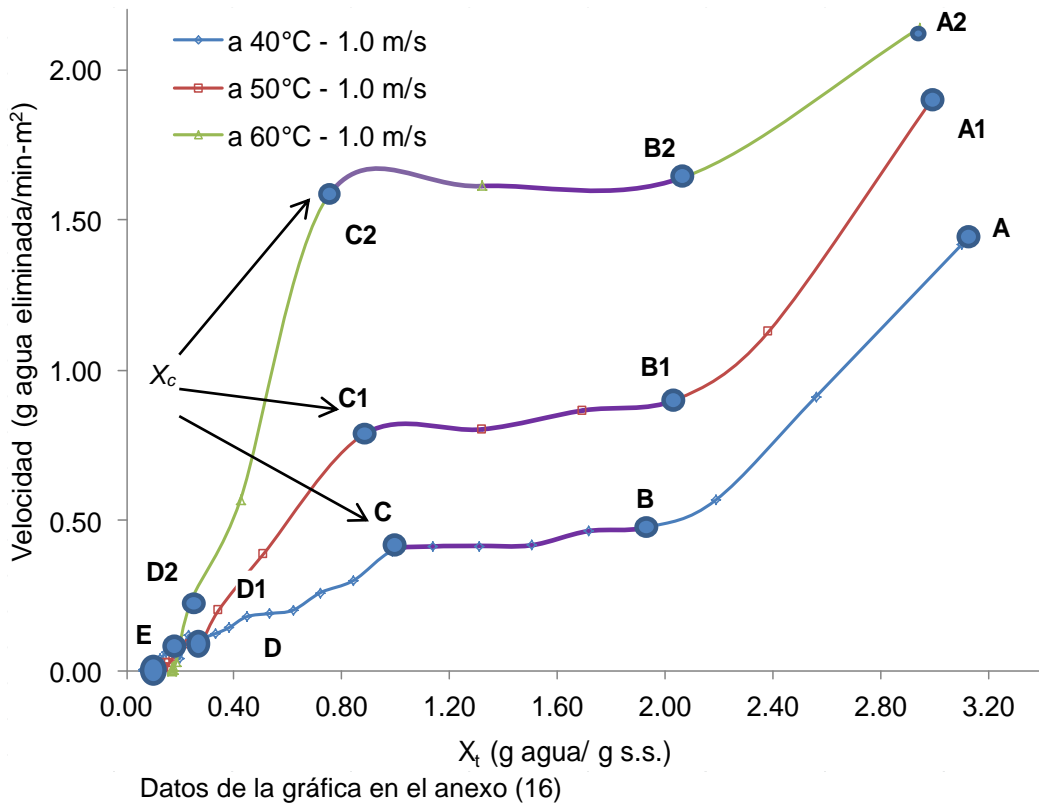


Figura 26: Curvas de velocidad a 1.0 m/s de aire

Las curvas de velocidad de secado, que se caracterizan por una ausencia de los periodos de estabilización y velocidad constante, y un comportamiento muy variable en la zona de velocidad decreciente que domina el proceso de deshidratación experimental, al igual que en el secado de otros materiales, como refiere Geankoplis (1998). Esta alta variabilidad implica aumentos y disminuciones abruptas de la velocidad de secado, atribuibles a la escasa transferencia de calor y masa en algunos lapsos durante el secado, debido a las forma aplanada de las hojas de punamuña, a pesar de las fluctuaciones, las curvas de velocidad de secado en función del tiempo mostraron claramente un decaimiento exponencial, similares resultados obtuvieron Pineda et al., (2009).

Por otra parte, la humedad de equilibrio (X_c) tiene una relación inversa con la temperatura, es decir a menor temperatura mayor será la humedad de equilibrio, tal como se muestra en la Tabla (20) asimismo que a menor temperatura se requiere mayor tiempo para alcanzar X_c y también requiere mayor tiempo de secado a velocidad constante, mientras que la velocidad de secado inicial es mayor a medida que aumenta la temperatura.

Tabla 20: Características de las curvas de velocidad

T (°C)	V (m/s)	Humedad de equilibrio X_c (g agua/g s.s.)	Tiempo en alcanzar X_c (min)	Tiempo en alcanzar la velocidad constante (min)	Tiempo de permanencia en velocidad constante (min)	Velocidad máxima de secado (a agua eliminada/min-m ²)
40	0.5	1.9291	80	20	60	0.6307
50	0.5	1.6682	40	10	30	1.4194
60	0.5	1.5897	30	10	20	1.7535
40	1.0	0.9876	80	30	50	1.4183
50	1.0	0.8887	50	20	30	1.9053
60	1.0	0.7565	30	10	20	2.1378

CONCLUSIONES

Se evaluó deshidratar las hojas de punamuña en un secador de bandejas a las temperaturas de 40°C, 50°C y 60°C a las velocidades de aire de 0.5m/s y 1.0m/s, con humedades relativas iniciales de 60%.

Se determinó curvas de secado para las hojas de punamuña a 40°C, 50°C y 60°C a las velocidades de secado 0.5m/s y 1.0m/s, estas presentan una relación inversa con la temperatura y la velocidad del aire de secado, siendo que la velocidad de aire y la temperatura tienen efecto significativo inverso ($p\text{-value} < 0.05$) sobre la humedad final del producto y el tiempo de secado, así como el efecto combinado de estas, asimismo en la caracterización de las curvas de secado el incremento de la temperatura aumenta el periodo de velocidad constante pero disminuye el periodo de velocidad decreciente.

Se encontró que el modelo de secado que mejor se ajustó para las temperaturas de 40°C, 50°C y 60°C a 0.5m/s fue el de Thompson presentando valores $R^2 > 0.94$ y $\%E < 22.77$ y la tendencia de la curva para ambas velocidades de aire, mientras que para las mismas temperaturas y velocidad de aire a 1.0m/s fue el de Page ($R^2 > 0.985$ y $\%E < 11.85$).

Se caracterizó las curvas de velocidad de secado y estas muestran relación directa con la temperatura, asimismo la humedad crítica (X_c) tiene una relación inversa con la temperatura, por otra parte a menor temperatura se requiere mayor tiempo para alcanzar X_c , y requiere mayor tiempo de secado a velocidad constante, mientras que la velocidad de secado inicial es mayor a medida que aumenta la temperatura.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar el estudio del secado de las hojas de punamuña sobre el color, y desarrollar la evaluación de las características sensoriales de las hojas en infusión.

Se recomienda evaluar la influencia de la temperatura de secado en el contenido de aceites esenciales en las hojas de punamuña.

Se recomienda realizar estudios de secado de hojas de hierbas nativas de la zona como la Urcumuña, Matico, Salvia y otros.

Se recomienda realizar un estudio del secado de la punamuña a través de un secador con un controlador neumático de masa automático.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akpinar, E. K.; Bicer, Y. (2005). *Modelling of the drying of eggplants in thin-layers*. International Journal of Food Science and Technology, v.40, p.1-9.
- Alkire, Bh.; Tucker, Ao; Maciarello MJ (1994). *Tipo, Minthostachys mollis (lamiaceae): an Ecuadorian mint. Econ Bot.*
- Alvarado, J.; Aguilera, J.M. (2001). *Métodos para Medir las Propiedades Físicas en la Industria de los Alimentos*. Editorial Acribia, S.A.
- Arends, K.M.; Gutiérrez, M.V. (2008). *Características de secado y modelado matemático para el bagazo de caña de azúcar tratado y no tratado en una planta piloto PDA*. Tesis de grado. Facultad de Ing. Química. Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo Edo. Zulia. Venezuela.
- Argyropoulos, D.; Rainer, A.; Kohler, R.; Muller, J. (2012). Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of leaves and stems of lemon balm (*Melissa o_cinalis* L.) established by dynamic vapor sorption. Rev. Food Science and Technology V47 N° 2
- Arslan, D.; Ozcan, M. M. (2008). Evaluation of drying methods with respect to drying kinetics, mineral content and colour characteristics of rosemary leaves. Energy Conversion and Management, v.49.
- Babalís, S. J.; Papanicolaou, E.; Kyriakis, N.; Belessiotis, V. G. (2005) Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). Journal of Food Engineering. Article in press.
- Badui, S. (1982). *Química de los Alimentos. Alhambra Mexicana*. Editorial, S.A. de C.V p. 29.
- Barbosa, C. (1997). *Manual de Laboratorio de Ingeniería en Alimentos*. Editorial Acribia, S.A. Zaragoza, España. p. 71-88
- Bimbenet, JJ.; Daudin, JD.; Wolff, E. (1985) Air drying kinetics of biological particles. Proceeding Fourth International Drying Symposium, Kyoto. Washington.

- Brennan, J. G. (2008). *Manual del Procesado de los alimentos*. Edit. ACRIBIA. España
- Brennan, J.G.; Cowell, N.D.; Butters, J.R.; Lilly, A.E.V. (2006). *Las operaciones de la ingeniería de los alimentos*. Ed. Acribia S.A.
- Biembengut, M.; Hein, N.; (1995). *Modelo, Modelación y modelaje: Metodos de enseñanza-aprendizaje de matemáticas*. Departamento de matemática – CCEN, Universidad Regional De Blumenau – Brazil.
- Cáceres, B. N. (2002). *Simulação e Otimização de um Secador Industrial de Túnel para Frutas*. Tesis de doctorado. Faculdade de Engenharia de Alimentos - UNICAMP, Campinas, São Paulo, Brasil.
- 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.
- Chen, C.S.; Johnson, W.H. (1969). *Kienetics of moisture movement in hygroscopic materials. I. Theoretical consideration of drying phenomena*. Trans. ASAE. 12: 109113.
- Corrêa, P.C.; Resende, O.; Martinazzo, A.P.; Goneli, A.L.D.; Botelho, F.M. (2007). *Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (phaseolus vulgaris l.) em camadas delgadas*. Engenharia Agrícola, v.27, p.501507.
- 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.
- De Michelis, A.; Pirone, B.N.; Vulliod, M.B. Ochoa, M.R.; Kessler A.G.; Márquez, C.A. (2008). *Cambios de volumen, área superficial y factor de forma de Heywood durante la deshidratación de cerezas (Prunus avium)*. Ciencia y tecnología de Alimentos V28.
- Della, P. (2010). *Secado de alimentos por métodos combinados: deshidratación osmótica y secado por microondas aire caliente*. Tesis de maestria en

Tecnología de alimentos. Univ. Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina.

Demir, V.; Gunhan, T.; Yagcioglu A. K.; Degirmencioglu, A. (2004). *Mathematical modelling and the determination of some quality parameters of air-dried bay leaves*. Biosystems Engineering, v.88.

Díaz, F. (2009). *Estudio del proceso de secado en una columna de charolas*. Tesis de maestría en Ciencias. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Departamento de Ingeniería Mecánica. Cuernavaca, Morelos, México.

Doymaz, I. (2010). *Drying of thyme (Thymus vulgaris L.) and selection of a suitable thin-layer drying model*. Journal of Food Processing and Preservation, v.1.

Doymaz, I.; Tugrul, N.; Pala, M. (2006). *Drying Characteristics Of Dill And Parsley Leaves*. Journal of Food Engineering

Fellows, P. (2000). *Food Processing Technology - Principles and Practice*. 2da edic.

Fennema, O. (2000). *Química de los alimentos*. 2º Edición. Editorial ACRIBIA – España.

Fennema, O.; Karel, M.; Lund, D. (1975). *Principles of food science - Physical principles of food preservation – part II*. Edit. Marcel Dekker INC. – New York – USA.

Fito, P.; Andrés, A.; Albors, A.; Barat, J. (1998). *Deshidratación de productos agrícolas: secado por aire caliente*. Servicio de Publicaciones, Universidad Politécnica de Valencia.

Flores, Y. C. (2008). *Cinética del tostado de café utilizando un horno de microondas*. Tesis de grado. Insituto Politécnico Nacional, México.

Foust A.; Wender L.; Clump C.; Maus L.; Andersen B. (1970). *Principios de Operaciones Unitarias*, 4ª. Reimpresión, Continental, S.A. México.

Fuentes, A. (1996). *Predicción de la Actividad de Agua en Harinas Precocidas de Quinchoncho (Cajanus cajan L. mil sp) y Habas (Canavalia ensiformis) y Sus Mezclas*. Trabajo De Grado Maestría. Udo Venezuela.

- García, F. (2014). *Evaluación de los efectos del proceso de secado sobre la calidad de la Stevia (Stevia rebaudiana Bertoni) y la Hierbabuena (Mentha spicata)*. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Universidad Nacional de Colombia
- García, M.; Rugel, J.; Rodríguez, E.; Vargas, E. (2010). Aprovechamiento de cilantro (*Coriandrum sativum*) y perejil (*Petroselinum crispum*) Aplicando procesos combinados de deshidratación. Resultados de investigación. V 3. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- García, S.V.; Schmalko, M.E.; Tanzariello, A. (2007). *Isotermas de adsorción y cinética de secado de ciertas hortalizas y aromáticas cultivadas en Misiones – Argentina*. Rev. RIA, INTA, Argentina.
- Geankoplis, C. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. 3 ed. Ceca, México, D.F.
- Ghodake, H.M.; Goswami, T.K.; Chakraverty, A. (2007). *Moisture sorption isotherms, heat of sorption and vaporization of withered leaves, black and green tea*. En: Journal of Food Engineering V78 N° 3.
- Giri, S. K.; Prasad, S. (2007). *Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms*. Journal of Food Engineering, 78, pp. 512–521.
- Gutiérrez, H.; de la Vara, R. (2004). *Análisis y Diseño de Experimentos*. Edit. McGrawHill. México.
- Gutiérrez, H.; de la Vara, R. (2010). *Análisis y Diseño de Experimentos*. Edit. McGrawHill. Mexico.
- Hammond, B.; Fernández, ID.; Villegas, LF; Vaisberg, J. A. (1998). *Survey of traditional medicinal plants from the Callejón de Huaylas, Department of Ancash, Perú*. J Ethnopharmacol; 61(1): 1730.
- Heldman, D.; Lund D. (2007). *Handbook of Food Engineering*. 2da edic. Editorial. CRC Press. Florida – EE. UU.
- Henderson, S. M. (1974). *Progress in developing the thin layer drying equation*. Transactions of ASAE.v.17, p.1167-1172.

- Henderson, S. M.; Pabis, S. (1961). *Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficient*. Journal of Agriculture Engineering Research, v.6, p.169-174.
- Hermida, J.R. (2000). *Fundamentos de Ingeniería de Procesos Agroalimentarios*. Edit. Mundi- Prensa. España.
- Jayaraman, K.S.; Das Gupta, D.K. (1992). Dehydration of fruit and vegetables recent developments in principles and techniques. *Drying Technol.* 10 (1):1-50
- Jun, S.; Irudayaraj, J. (2009). *Food processing operations modeling. Desing and analysis*. Edit. CRC Press. Boca Ratón, New York.
- Karathanos, V. T. (1999). Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, v.39, p.337344.
- Kassem, A. S. (1998). *Comparative studies on thin layer drying models for wheat*. In: International Congress on Agricultural Engineering, 13, 1998, Rabat. Anais. Rabat: ANAFID, v.6, p.2-6.
- Keey, R.B. (1972). *Principios y prácticas de secado*. New York: Pregoman Press.
- Kiranoudis, C.; T. Tsami, E.; Maroulis, Z. B. (1997). *Microwave vacuum drying kinetics of some fruits*. *Drying Technology*. 15(10), pp. 2421-2440.
- Krokida, M. K.; Karanthanos, V. T.; Maroulis, Z. B.; Marinos-Kouris, D. (2003). *Drying kinetics of some vegetables*. *Journal of Food Engineering*, 59(4), 391-403.
- Labuza, T. P. (1984). *Moisture sorption – Practical aspects of isotherm measurement and use*. Ed. American Association of Cereal Chemists. Minnesota.
- Labuza, T. P.; Kaanane A.; Chen J. (1985). *Effect of temperature on the moisture sorption isotherm and water activity shift of two dehydrated food*. *Journal Food Science*, v. 50, No 2, p. 385-391.
- Lewis, W. K. (1921). *The rate of drying of solids materials*. *The Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v.13,p. 427-432.

- López B. J.; Rodríguez R. J.; Álvarez C. M.; Jarquin E. L.; Zuñiga G. M. (2003). *Cinética de Secado y Caracterización Físico-Químico de Tomates Deshidratados Tipo Roma en Respuesta a la Temperatura y al Flujo del Aire*. Premio Nacional en Ciencias y Tecnología de Alimentos. www.pncta.com.mx/pages/pncta_investigaciones_03h.asp?page=03e17.
- Madigan, G. (2003). *Brock: Biología De Los Microorganismos*. 10ª Edición. Ed. Pearson-Prentice-Hall, Madrid. p. 1-20
- Martínez, N.; Andrés, A.; Chiralt, A.; Fito, P. (1998). *Termodinámica y Cinética de Sistemas Alimento Entorno*. Servicio De Publicaciones, Universidad Politécnica De Valencia. Ref. 98.4034. p.170-198
- McCabe, L. W. C.; Smith, J.; Harriot P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. Editorial Mc Graw Hill. Séptima Edición. México.
- Midilli, A.; Kucuk, H.; Vapar, Z. (2002). *A new model for single-layer drying*. *Drying Technology*, v.20, n.7, p.1503-1513.
- Moreira, P.; Murr, F. (2004). Mass transfer kinetics of osmosis dehydration of cherry tomato. *Journal of Food Engineering*, 61, 292-295.
- Ojeda M. (2004). *Avances en la domesticación de la (Minthostachys mollis (Kunth.) Griseb.) Proyecto frutihortícola – Tecnologías para el desarrollo sustentable regional*. Edic. INTA – Boletín N° 9 I.S.S.N. - Argentina.
- Olivas, R.; Molina, F.J.; Pérez, A.; Ortega, E. (1999). *Development of mathematical model for drying of jalapeño peppers in batch process*. Conference in Annual Meeting of American Institute of Chemical Engineers, New York, U.S.A.
- Overhults, D. D.; White, G. M.; Hamilton, M. E.; Ross, I. J. (1973). *Drying soybeans with heated air*. *Transactions of the ASAE*, v.16, p.195-200.
- Page, G. E. (1949). *Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers*. Indiana: Universidade de Purdue. Dissertação Mestrado
- Panyawong, S.; Devahastin, S. (2007). Determination of deformation of a food product undergoing different dry methods and conditions via evolution of a shape factor. *Journal of Food Engineering* V78.

- Pineda, M.L.; Chacón, A.; Cordero, G. (2009). *Efecto de las condiciones de secado sobre la cinética de deshidratación de las hojas de morera (Morus alba)*. Rev. Agronomía Mesoamericana 20(2). Costa Rica.
- Ramírez, D. (2012). *Determinación de isotermas de sorción en harina de maíz a tres temperaturas y su ajuste a modelos matemáticos*. Tesis que para obtener el grado de maestro en ciencias en alimentos, México D.F.
- Ramos, A.; Sánchez, P.; Ferrer, J.A.; Barquín, J.; Linares, P. (2010). *Modelos matemáticos de optimización*. Univ. Pontificia Comillas Madrid.
- Resende O.; Correa C. P.; Gonell, L. D.; Ribeiro, M. D. (2006). *Isotermas e Calor Isostérico de Sorção do Feijão*. Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas, 2006. SP- Brasil.
- Rojas, R.; Bustamante, B.; Bauer, J.; Fernández, I.; Albán, J.; Lock, O. (2003). *Antimicrobial activity of selected Peruvian medicinal plants*. J Ethnopharmacol. 88(2-3): 199-204.
- Salaverry O. (2005). *La complejidad de lo simple: plantas medicinales y sociedad moderna*. Rev Peru Med Exp Salud Publica., 22(4): 245-46.
- Saravacos, G.; Tsiourvas, D.; Tsami. (1986). *Effect of temperature on the water adsorption isotherms of sultana raisins*. Journal of food science, vol 51 N° 02.
- Scenna, G. (1999). *Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos*. Edit. UTN. Argentina.
- Shafiur, R. (2003). *Manual de Conservación de los Alimentos*. Editorial ACRIBIA – España.
- Sharaf-Eldeen, Y.I.; Hamdy, M.Y.; Blaisdell, J.L. (1979). *Falling rate drying of fully exposed biological materials. A review of mathematical models*. American Soc. of Agric. Eng. Paper No. 79-6522
- Sharaf-Elden, Y. I.; Blaisdell, J. L.; Hamdy, M. Y.A. (1980). *A model for ear corn drying*. Transactions of the ASAE, v.5, p.1261-1265.
- Silva, A. S.; Almeida, F. de A. C.; Lima, E. E.; Silva, F. L. H.; Gomes, J. P. (2008). *Cinéticas de secado de hoja y tallo de cilantro (Coriandrum sativum)*. Rev.

Sociedad Mexicana de Nutrición y Tecnología de los Alimentos, Ciencia y Tecnología Alimentaria

- Singh, RP; Heldman, DR. (1993). *Introducción a la Ingeniería de los Alimentos*. Acribia, Zaragoza.
- Tarifa, E., (2000). *Optimización y Simulación de Procesos - Métodos Numéricos* - Universidad Nacional de Jujuy. Argentina
- Thompson, T. L.; Peart, R. M.; Foster, G. H. (1968). *Mathematical simulation of corn drying – A new model*. Transactions of ASAE, v.11, p.582-586.
- Tóth, J. (2001). *Adsorption. Theory, Modeling, and Analysis*. Edit. Marcel Dekker, Inc. New York.
- Trujillo, F. J.; Yeow, P. Ch.; Pham, Q. T. (2003). *Moisture sorption isotherm of fresh lean beef and external beef fat*. Journal of Food Engineering, 60(4), 357–366.
- Vázquez, G.; Chenlo, F. (1997). *Grape drying in a pilot plant with a heat pump*. *Drying Technology*, 15(3 y 4), pp. 899–920.
- Vega, L.; Lemus, M. (2005). *Modelado de la Cinética de Secado de la Papaya Chilena (Vasconcellea pubescens)*. Rev. Información Tecnológica-Vol. 16 N°6
- Wang, C. Y.; Singh, R. P. (1978). *Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying*. Transactions of ASAE, v.78, p.6505.
- Zug, J. (2002). *Fisicoquímica Especial. Isotherma de Sorción de tres etapas y modelos de sorción restringida*. Fac. Ing. UBA. Argentina.

ANEXO

ANEXO 01: Pruebas de Múltiple Rangos para la humedad final

Método: 95.0 porcentaje LSD

	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
T4	5	0.01438	X
T5	5	0.0279	X
T6	5	0.03808	X
T1	5	0.1829	X
T2	5	0.18464	XX
T3	5	0.18836	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
T1 - T2		-0.00174	0.00533936
T1 - T3	*	-0.00546	0.00533936
T1 - T4	*	0.16852	0.00533936
T1 - T5	*	0.155	0.00533936
T1 - T6	*	0.14482	0.00533936
T2 - T3		-0.00372	0.00533936
T2 - T4	*	0.17026	0.00533936
T2 - T5	*	0.15674	0.00533936
T2 - T6	*	0.14656	0.00533936
T3 - T4	*	0.17398	0.00533936
T3 - T5	*	0.16046	0.00533936
T3 - T6	*	0.15028	0.00533936
T4 - T5	*	-0.01352	0.00533936
T4 - T6	*	-0.0237	0.00533936
T5 - T6	*	-0.01018	0.00533936

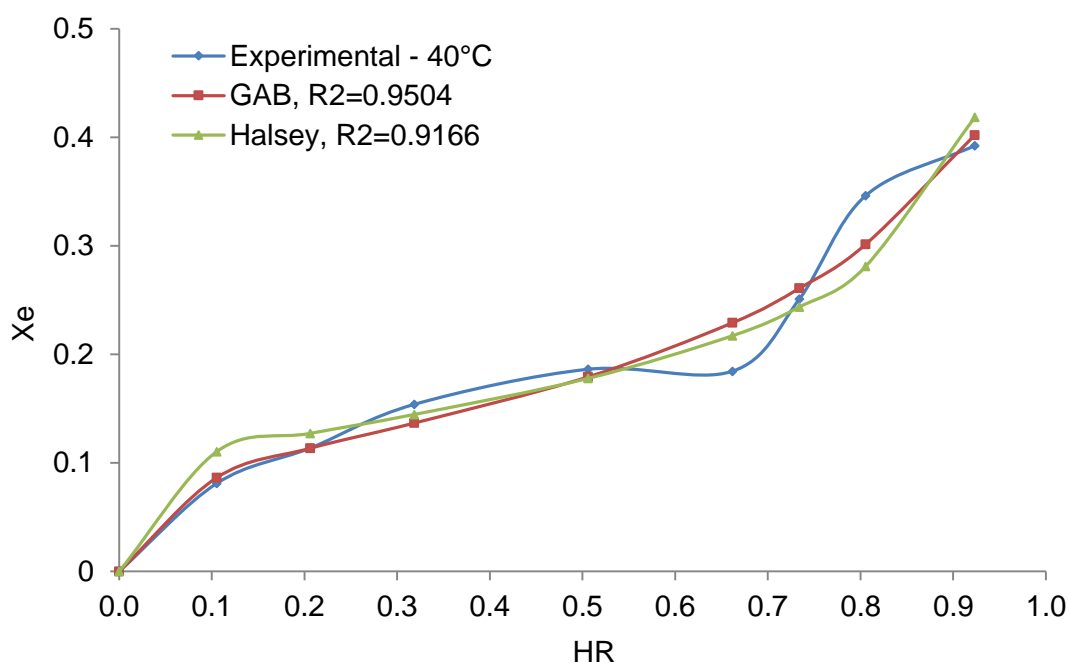
* indica una diferencia significativa.

ANEXO 02: Datos experimentales para el cálculo de Xe

A 40°C

Sal	R	16/01/2015	17/01/2015	18/01/2015	19/01/2015	20/01/2015
LiCl	1	0.4163	0.4062	0.3971	0.3929	0.3928
	2	0.3009	0.2945	0.2885	0.2881	0.2880
CH ₃ COOK	1	0.3119	0.3058	0.3049	0.3051	0.3051
	2	0.3280	0.3220	0.3212	0.3213	0.3213
MgCl	1	0.4551	0.4573	0.4586	0.4588	0.4588
	2	0.2773	0.2781	0.2822	0.2829	0.2830
Mg(NO ₃) ₂	1	0.4162	0.4321	0.4348	0.4349	0.4350
	2	0.2701	0.2801	0.2809	0.2809	0.2810
KI	1	0.4145	0.4253	0.4295	0.4311	0.4313
	2	0.3735	0.3845	0.3857	0.3890	0.3891
NaCl	1	---	---	---	---	---
	2	0.2286	0.2370	0.2481	0.2512	0.2514
KCl	1	0.3488	0.4076	0.4211	0.4169	0.4170
	2	0.3580	0.4172	0.4193	0.4193	0.4193
BaCl ₂	1	0.4850	0.5717	0.5883	0.5939	0.5940
	2	0.3818	0.4541	0.4671	0.4669	0.4670

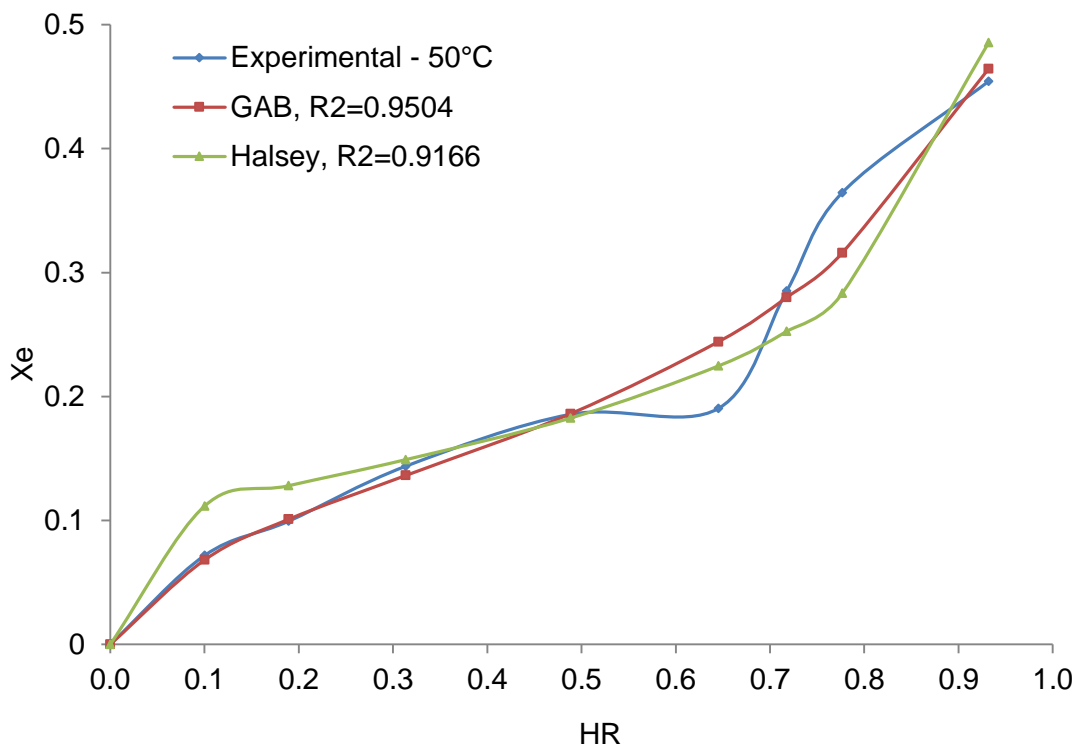
Isotermas de adsorción a 40°C



A 50°C

Sal	R	20/01/2015	21/01/2015	22/01/2015	23/01/2015	24/01/2015
LiCl	1	0.2455	0.2386	0.2318	0.2312	0.2312
	2	0.3131	0.3040	0.2955	0.2952	0.2951
CH ₃ COOK	1	0.3137	0.3064	0.3058	0.3047	0.3037
	2	0.2346	0.2288	0.2283	0.2277	0.2263
MgCl	1	0.3386	0.3390	0.3397	0.3399	0.3400
	2	0.3193	0.3209	0.3212	0.3213	0.3214
Mg(NO ₃) ₂	1	0.3869	0.4004	0.4130	0.3975	0.4023
	2	0.3996	0.4162	0.4225	0.4128	0.4174
KI	1	0.2229	0.2313	0.2326	0.2330	0.2331
	2	0.3569	0.3679	0.3731	0.3735	0.3736
NaCl	1	0.3406	0.3574	0.3658	0.3661	0.3662
	2	0.2014	0.2183	0.2231	0.2275	0.2275
KCl	1	0.3574	0.3940	0.4206	0.4290	0.4293
	2	0.3803	0.4313	0.4519	0.4554	0.4555
BaCl ₂	1	0.3055	0.3658	0.3850	0.3860	0.3861
	2	0.3837	0.4560	0.4889	0.4728	0.4961

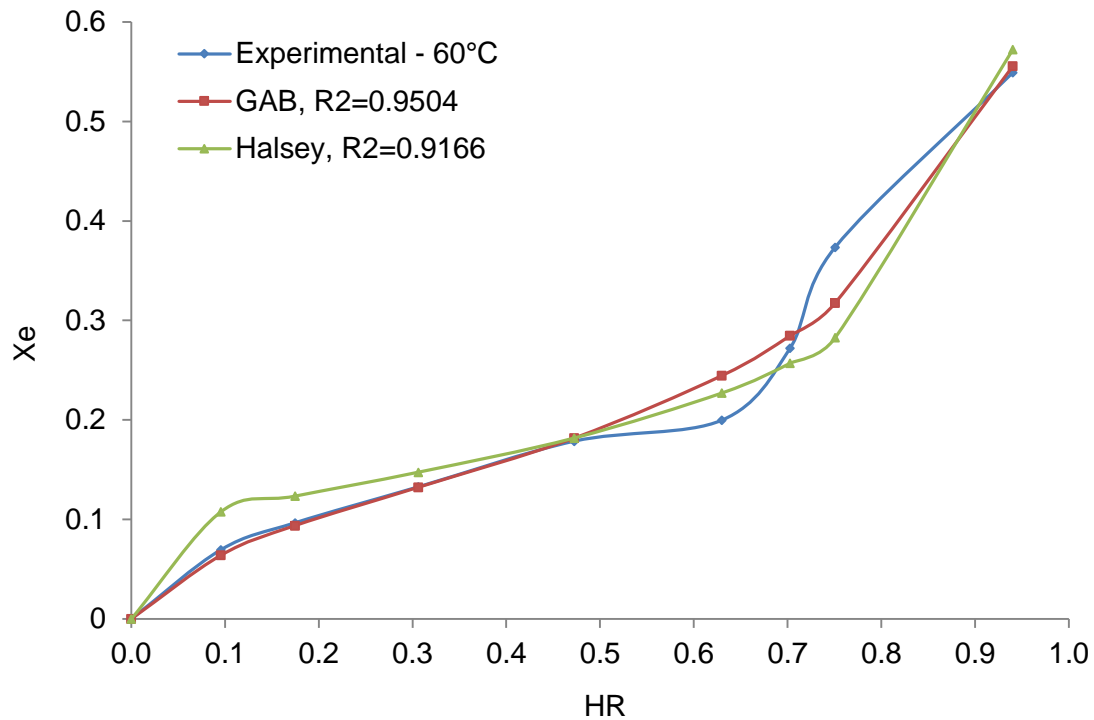
Isotermas de adsorción a 50°C



A 60°C

Sal	R	27/01/2015	28/01/2015	29/01/2015	30/01/2015	31/01/2015
LiCl	1	0.2551	0.2428	0.2402	0.2398	0.2397
	2	0.3227	0.3068	0.3045	0.3037	0.3036
CH ₃ COOK	1	0.2930	0.2826	0.2822	0.2819	0.2818
	2	0.2781	0.2713	0.2699	0.2688	0.2687
MgCl	1	0.2759	0.2751	0.2749	0.2748	0.2748
	2	0.3318	0.3308	0.3305	0.3303	0.3303
Mg(NO ₃) ₂	1	0.2372	0.2443	0.2453	0.2455	0.2456
	2	0.3206	0.3289	0.3318	0.3324	0.3324
KI	1	0.3319	0.3456	0.3477	0.3495	0.3497
	2	0.3442	0.3553	0.3596	0.3633	0.3634
NaCl	1	0.3812	0.4006	0.4161	0.4227	0.4229
	2	0.2055	0.2207	0.2290	0.2298	0.2298
KCl	1	0.3391	0.3884	0.4023	0.4106	0.4113
	2	0.3124	0.3616	0.3722	0.3754	0.3755
BaCl ₂	1	0.2828	0.3742	0.3826	0.3842	0.3843
	2	0.2266	0.2995	0.3073	0.3081	0.3092

Isotermas de adsorción a 60°C



ANEXO 03: Datos reportados para el modelamiento a 40°C y 0.5m/s

Model is: $V2=a*Exp(-k*V1)$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .045857344

Proportion of variance accounted for: .976174296 R = .988015332

Model is: $V2=b+a*Exp(-k*V1)$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .000612013

Proportion of variance accounted for: .999682022 R = .999840998

Model is: $V2=(a*Exp(-k*V1))+((1-a)*Exp(-k*a*V1))$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .067411268

Proportion of variance accounted for: .964975709 R = .982331771

Model is: $V2=(a*Exp(-k*V1))+((1-a)*Exp(-k*b*V1))$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .067411268

Proportion of variance accounted for: .964975709 R = .982331771

Model is: $V2=(a*Exp(-k0*V1))+b*Exp(-k1*V1)$
Dependent variable: RXexp Independent variables: 1
Loss function: (OBS-PRED)**2
Final value: .038818326
Proportion of variance accounted for: .979831497 R = .989864383

Model is: $V2=(a*Exp(-k*V1))+b*Exp(-k0*V1))+c*exp(-k1*V1)$
Dependent variable: RXexp Independent variables: 1
Loss function: (OBS-PRED)**2
Final value: .000200066
Proportion of variance accounted for: .999896053 R = .999948025

Model is: $V2=(Exp(-k*V1))$
Dependent variable: RXexp Independent variables: 1
Loss function: (OBS-PRED)**2
Final value: .067411268
Proportion of variance accounted for: .964975709 R = .982331771

Model is: $V2=(Exp(-k*(V1^n)))$
Dependent variable: RXexp Independent variables: 1
Loss function: (OBS-PRED)**2
Final value: .015328290
Proportion of variance accounted for: .992036012 R = .996010046

Model is: $V2=Exp(-k*V1)^n$
Dependent variable: RXexp Independent variables: 1
Loss function: (OBS-PRED)**2
Final value: .067411268
Proportion of variance accounted for: .964975709 R = .982331771

Model is: $V2=(a*Exp(-k*(V1^n)))+b*v1$
Dependent variable: RXexp Independent variables: 1
Loss function: (OBS-PRED)**2
Final value: .000172684
Proportion of variance accounted for: .999910280 R = .999955139

Model is: $V2=Exp((-a-(((a^2)+4*b*V1)^0.5)))/(2*b)$
Dependent variable: RXexp Independent variables: 1
Loss function: (OBS-PRED)**2
Final value: .007806326
Proportion of variance accounted for: .995944134 R = .997970007

Model is: $V2=1+a*V1+b*V1^2$
Dependent variable: RXexp Independent variables: 1
Loss function: (OBS-PRED)**2
Final value: .039205848
Proportion of variance accounted for: .979630156 R = .989762677

ANEXO 04: Pruebas de Múltiple Rangos para los modelos a 40°C y 0.5 m/s

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Modelos		Casos	Media	Grupos Homogéneos
A	Exponencial simple con 2 parámetros	37	0.392105	X
E	Exponencial simple con 3 parámetros	37	0.393073	X
H	Exponencial doble con 2 parámetros	37	0.394746	X
K	Exponencial doble con 3 parámetros	37	0.396014	X
C	Exponencial doble con 4 parámetros	37	0.396402	X
G	Exponencial triple con 6 parámetros	37	0.396402	X
I	Lewis (primer orden)	37	0.396402	X
D	Page	37	0.396421	X
B	Page modificado	37	0.397478	X
F	Midilli	37	0.397482	X
J	Thompson	37	0.397488	X
L	Wang y Singh	37	0.405825	X

ANEXO 05: Datos reportados para el modelamiento a 50°C y 0.5m/s

Model is: $V2=a*Exp(-k*V1)$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .122485711

Proportion of variance accounted for: .894264228 R = .945655449

Model is: $V2=b+a*Exp(-k*V1)$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .001632778

Proportion of variance accounted for: .998590505 R = .999295004

Model is: $V2=(a*Exp(-k*V1))+((1-a)*Exp(-k*a*V1))$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .089857120

Proportion of variance accounted for: .922430855 R = .960432639

Model is: $V2=(a*Exp(-k*V1))+((1-a)*Exp(-k*b*V1))$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .000796841

Proportion of variance accounted for: .999312127 R = .999656004

Model is: $V2=(a*Exp(-k0*V1))+b*Exp(-k1*V1)$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .000723701

Proportion of variance accounted for: .999375265 R = .999687584

Model is: $V2=(a*Exp(-k*V1))+b*Exp(-k0*V1))+c*exp(-k1*V1)$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .000723701

Proportion of variance accounted for: .999375265 R = .999687584

Model is: $V2=(Exp(-k*V1))$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .164774218

Proportion of variance accounted for: .857758681 R = .926152623

Model is: $V2=(\text{Exp}(-k*(V1^n)))$
Dependent variable: RXexp Independent variables: 1
Loss function: (OBS-PRED)**2
Final value: .039085590
Proportion of variance accounted for: .966259370 R = .982984929

Model is: $V2=\text{Exp}(-k*V1)^n$
Dependent variable: RXexp Independent variables: 1
Loss function: (OBS-PRED)**2
Final value: .164774218
Proportion of variance accounted for: .857758681 R = .926152623

Model is: $V2=(a*\text{Exp}(-k*(V1^n)))+b*v1$
Dependent variable: RXexp Independent variables: 1
Loss function: (OBS-PRED)**2
Final value: .000817392
Proportion of variance accounted for: .999294387 R = .999647131

Model is: $V2=\text{Exp}(((a-(((a^2)+4*b*V1)^{0.5}))/2*b))$
Dependent variable: RXexp Independent variables: 1
Loss function: (OBS-PRED)**2
Final value: .029960230
Proportion of variance accounted for: .974136836 R = .986983706

Model is: $V2=1+a*V1+b*V1^2$
Dependent variable: RXexp Independent variables: 1
Loss function: (OBS-PRED)**2
Final value: .125496879
Proportion of variance accounted for: .891664838 R = .944280063

ANEXO 06: Pruebas de Múltiple Rangos para los modelos a 50°C y 0.5 m/s

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Modelos		Casos	Media	Grupos Homogéneos
A	Exponencial simple con 2 parámetros	37	0.312852	X
E	Exponencial simple con 3 parámetros	37	0.313229	X
H	Exponencial doble con 2 parámetros	37	0.313229	X
K	Exponencial doble con 3 parámetros	37	0.316355	X
C	Exponencial doble con 4 parámetros	37	0.319993	X
G	Exponencial triple con 6 parámetros	37	0.324143	X
I	Lewis (primer orden)	37	0.32874	X
D	Page	37	0.328808	X
B	Page modificado	37	0.328812	X
F	Midilli	37	0.328813	X
J	Thompson	37	0.329235	X
L	Wang y Singh	37	0.347456	X

ANEXO 07: Datos reportados para el modelamiento a 60°C y 0.5m/s

Model is: $V2=a*Exp(-k*V1)$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: (OBS-PRED)**2

Final value: .190046668

Proportion of variance accounted for: .807797853 R = .898775753

Model is: $V2=(a*Exp(-k*V1))+b$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: (OBS-PRED)**2

Final value: .006717744

Proportion of variance accounted for: .993206064 R = .996597243

Model is: $V2=(a*Exp(-k*V1))+((1-a)*Exp(-k*a*V1))$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: (OBS-PRED)**2

Final value: .153674323

Proportion of variance accounted for: .844582728 R = .919011821

Model is: $V2=(a*Exp(-k*V1))+((1-a)*Exp(-k*b*V1))$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: (OBS-PRED)**2

Final value: .004926248

Proportion of variance accounted for: .995017879 R = .997505829

Model is: $V2=(a*Exp(-k0*V1))+b*Exp(-k1*V1)$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: (OBS-PRED)**2

Final value: .004778122

Proportion of variance accounted for: .995167686 R = .997580917

Model is: $V2=(a*Exp(-k*V1))+b*Exp(-k0*V1))+c*exp(-k1*V1)$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: (OBS-PRED)**2

Final value: .002615121

Proportion of variance accounted for: .997355218 R = .998676734

Model is: $V2=(Exp(-k*V1))$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: (OBS-PRED)**2

Final value: .234159844

Proportion of variance accounted for: .763184353 R = .873604232

Model is: $V2=(Exp(-k*(V1^n)))$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: (OBS-PRED)**2

Final value: .067692065

Proportion of variance accounted for: .931540183 R = .965163293

Model is: $V2 = \text{Exp}(-k \cdot V1)^n$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(\text{OBS} - \text{PRED})^{**2}$

Final value: .164774218

Proportion of variance accounted for: .857758681 R = .926152623

Model is: $V2 = (a \cdot \text{Exp}(-k \cdot (V1^n))) + b \cdot v1$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(\text{OBS} - \text{PRED})^{**2}$

Final value: .007199803

Proportion of variance accounted for: .992718538 R = .996352617

Model is: $V2 = \text{Exp}(\frac{-a - ((a^2) + 4 \cdot b \cdot V1)^{0.5}}{2 \cdot b})$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(\text{OBS} - \text{PRED})^{**2}$

Final value: .061714636

Proportion of variance accounted for: .937585406 R = .968289939

Model is: $V2 = 1 + a \cdot V1 + b \cdot V1^2$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(\text{OBS} - \text{PRED})^{**2}$

Final value: .205228203

Proportion of variance accounted for: .792444132 R = .890193312

ANEXO 08: Pruebas de Múltiple Rangos para los modelos a 60°C y 0.5 m/s

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Modelos		Casos	Media	Grupos Homogéneos
A	Exponencial simple con 2 parámetros	21	0.27999	X
E	Exponencial simple con 3 parámetros	21	0.27999	X
H	Exponencial doble con 2 parámetros	21	0.285827	X
K	Exponencial doble con 3 parámetros	21	0.292439	X
C	Exponencial doble con 4 parámetros	21	0.303727	X
G	Exponencial triple con 6 parámetros	21	0.304453	X
I	Lewis (primer orden)	21	0.309174	X
D	Page	21	0.30921	X
B	Page modificado	21	0.309835	X
F	Midilli	21	0.309852	X
J	Thompson	21	0.309865	X
L	Wang y Singh	21	0.33396	X

ANEXO 09: Datos reportados para el modelamiento a 40°C y 1.0 m/s

Model is: $V2=a*Exp(-k*V1)$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .014192240

Proportion of variance accounted for: .993817299 R = .996903856

Model is: $V2=b+a*Exp(-k*V1)$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .009177206

Proportion of variance accounted for: .996002046 R = .997999021

Model is: $V2=(a*Exp(-k*V1))+((1-a)*Exp(-k*a*V1))$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .013970350

Proportion of variance accounted for: .993913963 R = .996952337

Model is: $V2=(a*Exp(-k*V1))+((1-a)*Exp(-k*b*V1))$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .012708799

Proportion of variance accounted for: .994463545 R = .997227930

Model is: $V2=(a*Exp(-k0*V1))+b*Exp(-k1*V1)$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .014192242

Proportion of variance accounted for: .993817298 R = .996903856

Model is: $V2=(a*Exp(-k*V1))+b*Exp(-k0*V1))+c*exp(-k1*V1)$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .014192426

Proportion of variance accounted for: .993817218 R = .996903816

Model is: $V2=(Exp(-k*V1))$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .014422105

Proportion of variance accounted for: .993717160 R = .996853630

Model is: $V2=Exp(-k*(V1^n))$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .014004835

Proportion of variance accounted for: .993898940 R = .996944803

Model is: $V2 = \text{Exp}(-k \cdot V1^n)$
Dependent variable: RXexp Independent variables: 1
Loss function: (OBS-PRED)**2
Final value: .014422105
Proportion of variance accounted for: .993717160 R = .996853630

Model is: $V2 = (a \cdot \text{Exp}(-k \cdot (V1^n))) + b \cdot v1$
Dependent variable: RXexp Independent variables: 1
Loss function: (OBS-PRED)**2
Final value: .010177541
Proportion of variance accounted for: .995566261 R = .997780668

Model is: $V2 = \text{Exp}(\frac{-a - ((a^2 + 4 \cdot b \cdot V1)^{0.5})}{2 \cdot b})$
Dependent variable: RXexp Independent variables: 1
Loss function: (OBS-PRED)**2
Final value: .010428160
Proportion of variance accounted for: .995457081 R = .997725955

Model is: $V2 = 1 + a \cdot V1 + b \cdot V1^2$
Dependent variable: RXexp Independent variables: 1
Loss function: (OBS-PRED)**2
Final value: .244770874
Proportion of variance accounted for: .893368124 R = .945181529

ANEXO 10: Pruebas de Múltiple Rangos para los modelos a 40°C y 1.0 m/s

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Modelos		Casos	Media	Grupos Homogéneos
J	Thompson	34	0.176835	X
K	Exponencial doble con 3 parámetros	34	0.177507	X
H	Exponencial doble con 2 parámetros	34	0.178652	X
A	Exponencial simple con 2 parámetros	34	0.178842	X
B	Page modificado	34	0.178847	X
F	Midilli	34	0.178891	X
G	Exponencial triple con 6 parámetros	34	0.179129	X
I	Lewis (primer orden)	34	0.179129	X
D	Page	34	0.179129	X
E	Exponencial simple con 3 parámetros	34	0.17917	X
C	Exponencial doble con 4 parámetros	34	0.179171	X
L	Wang y Singh	34	0.194891	X

ANEXO 11: Datos reportados para el modelamiento a 50°C y 1.0 m/s

Model is: $V2=a*Exp(-k*V1)$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .047801873

Proportion of variance accounted for: .974356505 R = .987094983

Model is: $V2=b+a*Exp(-k*V1)$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .040607233

Proportion of variance accounted for: .978216096 R = .989048076

Model is: $V2=(a*Exp(-k*V1))+((1-a)*Exp(-k*a*V1))$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .049877723

Proportion of variance accounted for: .973242907 R = .986530743

Model is: $V2=(a*Exp(-k*V1))+((1-a)*Exp(-k*b*V1))$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .029033814

Proportion of variance accounted for: .984424701 R = .992181788

Model is: $V2=(a*Exp(-k0*V1))+b*Exp(-k1*V1)$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .047801873

Proportion of variance accounted for: .974356505 R = .987094983

Model is: $V2=(a*Exp(-k*V1))+b*Exp(-k0*V1))+c*exp(-k1*V1)$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .047801877

Proportion of variance accounted for: .974356503 R = .987094982

Model is: $V2=(Exp(-k*V1))$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .049742865

Proportion of variance accounted for: .973315253 R = .986567409

Model is: $V2=Exp(-k*(V1^n))$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .028530042

Proportion of variance accounted for: .984694951 R = .992317969

Model is: $V2 = \text{Exp}(-k \cdot V1)^n$
Dependent variable: RXexp Independent variables: 1
Loss function: (OBS-PRED)**2
Final value: .049742865
Proportion of variance accounted for: .973315253 R = .986567409

Model is: $V2 = (a \cdot \text{Exp}(-k \cdot (V1^n))) + b \cdot v1$
Dependent variable: RXexp Independent variables: 1
Loss function: (OBS-PRED)**2
Final value: .024921007
Proportion of variance accounted for: .986631032 R = .993293024

Model is: $V2 = \text{Exp}(\frac{-a - ((a^2) + 4 \cdot b \cdot V1)^{0.5}}{2 \cdot b})$
Dependent variable: RXexp Independent variables: 1
Loss function: (OBS-PRED)**2
Final value: .039267672
Proportion of variance accounted for: .978934709 R = .989411294

Model is: $V2 = 1 + a \cdot V1 + b \cdot V1^2$
Dependent variable: RXexp Independent variables: 1
Loss function: (OBS-PRED)**2
Final value: .235228797
Proportion of variance accounted for: .873810625 R = .934778383

ANEXO 12: Pruebas de Múltiple Rangos para los modelos a 50°C y 1.0 m/s

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Modelos		Casos	Media	Grupos Homogéneos
J	Thompson	24	0.161893	X
H	Exponencial doble con 2 parámetros	24	0.164915	X
D	Page	24	0.165553	X
G	Exponencial triple con 6 parámetros	24	0.167494	X
I	Lewis (primer orden)	24	0.167494	X
C	Exponencial doble con 4 parámetros	24	0.167591	X
K	Exponencial doble con 3 parámetros	24	0.168712	X
B	Page modificado	24	0.169083	X
E	Exponencial simple con 3 parámetros	24	0.169086	X
F	Midilli	24	0.169087	X
A	Exponencial simple con 2 parámetros	24	0.169087	X
L	Wang y Singh	24	0.179392	X

ANEXO 13: Datos reportados para el modelamiento a 60°C y 1.0 m/s

Model is: $V2=a*Exp(-k*V1)$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: (OBS-PRED)**2

Final value: .021651833

Model is: $V2=(a*Exp(-k*V1))+b$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: (OBS-PRED)**2

Final value: .016234948

Proportion of variance accounted for: .987313741 R = .993636624

Model is: $V2=(a*Exp(-k*V1))+((1-a)*Exp(-k*a*V1))$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: (OBS-PRED)**2

Final value: .024313317

Proportion of variance accounted for: .981001169 R = .990455031

Model is: $V2=(a*Exp(-k*V1))+((1-a)*Exp(-k*b*V1))$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: (OBS-PRED)**2

Final value: .003376825

Proportion of variance accounted for: .997361293 R = .998679775

Model is: $V2=(a*Exp(-k0*V1))+b*Exp(-k1*V1)$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: (OBS-PRED)**2

Final value: .021651833

Proportion of variance accounted for: .983080896 R = .991504360

Model is: $V2=(a*Exp(-k*V1))+b*Exp(-k0*V1))+c*exp(-k1*V1)$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: (OBS-PRED)**2

Final value: .021651833

Proportion of variance accounted for: .983080896 R = .991504360

Model is: $V2=(Exp(-k*V1))$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: (OBS-PRED)**2

Final value: .024210568

Proportion of variance accounted for: .981081458 R = .990495562

Model is: $V2=Exp(-k*(V1^n))$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: (OBS-PRED)**2

Final value: .002200657

Proportion of variance accounted for: .998280370 R = .999139815

Model is: $V2 = \text{Exp}(-k \cdot V1)^n$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(\text{OBS} - \text{PRED})^{**2}$

Final value: .024210568

Proportion of variance accounted for: .981081458 R = .990495562

Model is: $V2 = (a \cdot \text{Exp}(-k \cdot (V1^n))) + b \cdot v1$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(\text{OBS} - \text{PRED})^{**2}$

Final value: .002016817

Proportion of variance accounted for: .998424026 R = .999211702

Model is: $V2 = \text{Exp}(\frac{-a - ((a^2) + 4 \cdot b \cdot V1)^{0.5}}{2 \cdot b})$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(\text{OBS} - \text{PRED})^{**2}$

Final value: .042598562

Proportion of variance accounted for: .966712773 R = .983215527

Model is: $V2 = 1 + a \cdot V1 + b \cdot V1^2$

Dependent variable: RXexp Independent variables: 1

Loss function: $(\text{OBS} - \text{PRED})^{**2}$

Final value: .075677280

Proportion of variance accounted for: .940864511 R = .969981707

ANEXO 14: Pruebas de Múltiple Rangos para los modelos a 60°C y 1.0 m/s

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Modelos		Casos	Media	Grupos Homogéneos
K	Exponencial doble con 3 parámetros	13	0.170422	X
J	Thompson	13	0.195805	X
H	Exponencial doble con 2 parámetros	13	0.196536	X
D	Page	13	0.197958	X
G	Exponencial triple con 6 parámetros	13	0.202401	X
I	Lewis (primer orden)	13	0.202401	X
C	Exponencial doble con 4 parámetros	13	0.202445	X
F	Midilli	13	0.205922	X
A	Exponencial simple con 2 parámetros	13	0.205922	X
E	Exponencial simple con 3 parámetros	13	0.205922	X
B	Page modificad	13	0.205923	X
L	Wang y Singh	13	0.20678	X

ANEXO 15: Datos para la curva de velocidad a 0.5 m/s

A 40°C – 0.5 m/s					
t (min)	Xt (b.s.)	Xprom	dX	dt	V (g agua/min-m2)
0	3.4163				
10	3.1378	3.2771	0.2785	10	0.6307
20	2.9312	3.0345	0.2066	10	0.4235
30	2.7399	2.8355	0.1913	10	0.3625
40	2.5552	2.6475	0.1846	10	0.3456
50	2.3989	2.4771	0.1563	10	0.3356
60	2.2592	2.3290	0.1397	10	0.3286
70	2.1207	2.1899	0.1385	10	0.3225
80	1.9958	2.0582	0.1249	10	0.3205
90	1.8624	1.9291	0.1334	10	0.3198
100	1.7541	1.8082	0.1083	10	0.2452
110	1.6639	1.7090	0.0902	10	0.2042
120	1.5702	1.6170	0.0937	10	0.2121
130	1.4920	1.5311	0.0782	10	0.1771
140	1.4143	1.4532	0.0777	10	0.1759
150	1.3427	1.3785	0.0716	10	0.1621
160	1.2812	1.3120	0.0615	10	0.1393
170	1.2276	1.2544	0.0536	10	0.1214
180	1.1710	1.1993	0.0566	10	0.1282
190	1.1311	1.1510	0.0399	10	0.0904
200	1.0838	1.1074	0.0473	10	0.1071
210	1.0528	1.0683	0.0309	10	0.0700
220	1.0213	1.0371	0.0315	10	0.0714
230	0.9901	1.0057	0.0312	10	0.0707
240	0.9645	0.9773	0.0256	10	0.0580
250	0.9393	0.9519	0.0252	10	0.0570
260	0.9181	0.9287	0.0212	10	0.0480
270	0.8978	0.9080	0.0203	10	0.0459
280	0.8829	0.8904	0.0150	10	0.0339
290	0.8629	0.8729	0.0199	10	0.0451
300	0.8520	0.8574	0.0110	10	0.0249
310	0.8400	0.8460	0.0120	10	0.0271
320	0.8303	0.8352	0.0097	10	0.0219
330	0.8230	0.8267	0.0074	10	0.0167
340	0.8129	0.8179	0.0101	10	0.0228
350	0.8097	0.8113	0.0032	10	0.0073
360	0.8077	0.8087	0.0019	10	0.0044

a 50°C - 0.5 m/s					
t (min)	Xt (b.s.)	Xprom	dX	dt	V agua/min-m2) ^{(g}
0	3.4163				
10	2.7894	3.1029	0.6269	10	1.4194
20	2.3884	2.5889	0.4010	10	0.7526
30	2.0706	2.2295	0.3178	10	0.7125
40	1.7721	1.9214	0.2985	10	0.6760
50	1.5642	1.6682	0.2079	10	0.6625
60	1.3811	1.4727	0.1831	10	0.4146
70	1.2437	1.3124	0.1374	10	0.3112
80	1.1157	1.1797	0.1280	10	0.2897
90	1.0073	1.0615	0.1084	10	0.2454
100	0.9570	0.9822	0.0503	10	0.1139
110	0.9091	0.9331	0.0479	10	0.1085
120	0.8786	0.8938	0.0306	10	0.0692
130	0.8555	0.8671	0.0230	10	0.0521
140	0.8408	0.8482	0.0147	10	0.0333
150	0.8339	0.8374	0.0069	10	0.0157
160	0.8298	0.8318	0.0041	10	0.0094
170	0.8259	0.8278	0.0039	10	0.0089
180	0.8241	0.8250	0.0018	10	0.0040
190	0.8184	0.8212	0.0057	10	0.0129
200	0.8177	0.8180	0.0007	10	0.0015
210	0.8160	0.8169	0.0017	10	0.0038
220	0.8154	0.8157	0.0006	10	0.0013
230	0.8155	0.8155	0.0001	10	0.0002

a 60°C - 0.5 m/s					
t (min)	Xt (b.s.)	Xprom	dX	dt	V agua/min-m2) ^{(g}
0	3.4163				
10	2.6419	3.0291	0.7744	10	1.7535
20	2.2043	2.4231	0.4376	10	0.9136
30	1.7472	1.9758	0.4571	10	0.8456
40	1.4322	1.5897	0.3151	10	0.7856
50	1.1209	1.2765	0.3112	10	0.4231
60	0.9858	1.0534	0.1351	10	0.3058
70	0.9156	0.9507	0.0703	10	0.1591
80	0.8798	0.8977	0.0358	10	0.0810
90	0.8697	0.8747	0.0101	10	0.0230
100	0.8638	0.8667	0.0059	10	0.0133
110	0.8592	0.8615	0.0046	10	0.0104
120	0.8591	0.8592	0.0001	10	0.0002
130	0.8576	0.8583	0.0015	10	0.0035
140	0.8564	0.8570	0.0012	10	0.0027
150	0.8552	0.8558	0.0011	10	0.0026
160	0.8467	0.8510	0.0085	10	0.0192
170	0.8438	0.8453	0.0030	10	0.0067
180	0.8425	0.8431	0.0013	10	0.0029
190	0.8400	0.8412	0.0025	10	0.0057

200 0.8318 0.8359 0.0082 10 0.0185

ANEXO 16: Datos para la curva de velocidad a 0.5 m/s

a 40°C - 1.0 m/s					
t (min)	Xt (b.s.)	Xprom	dX	dt	V (g agua/min-m ²)
0	3.4163				
10	2.7899	3.1031	0.6264	10	1.4184
20	2.3345	2.5622	0.4554	10	0.9125
30	2.0416	2.1881	0.2930	10	0.5666
40	1.8310	1.9363	0.2105	10	0.4767
50	1.5966	1.7138	0.2345	10	0.4635
60	1.4126	1.5046	0.1840	10	0.4166
70	1.2076	1.3101	0.2050	10	0.4145
80	1.0640	1.1358	0.1436	10	0.4125
90	0.9111	0.9876	0.1529	10	0.3985
100	0.7786	0.8448	0.1326	10	0.3002
110	0.6641	0.7213	0.1145	10	0.2592
120	0.5754	0.6198	0.0887	10	0.2008
130	0.4917	0.5336	0.0837	10	0.1895
140	0.4020	0.4469	0.0897	10	0.1789
150	0.3601	0.3811	0.0419	10	0.1425
160	0.3057	0.3329	0.0545	10	0.1233
170	0.2573	0.2815	0.0484	10	0.1096
180	0.2056	0.2315	0.0516	10	0.1169
190	0.1881	0.1969	0.0175	10	0.0397
200	0.1600	0.1741	0.0281	10	0.0636
210	0.1346	0.1473	0.0254	10	0.0576
220	0.1174	0.1260	0.0171	10	0.0388
230	0.1075	0.1125	0.0099	10	0.0225
240	0.1003	0.1039	0.0072	10	0.0164
250	0.0893	0.0948	0.0109	10	0.0248
260	0.0841	0.0867	0.0052	10	0.0118
270	0.0767	0.0804	0.0075	10	0.0169
280	0.0722	0.0745	0.0044	10	0.0100
290	0.0699	0.0711	0.0024	10	0.0054
300	0.0674	0.0686	0.0025	10	0.0056
310	0.0650	0.0662	0.0023	10	0.0053
320	0.0636	0.0643	0.0015	10	0.0034
330	0.0635	0.0635	0.0000	10	0.0001

a 50°C - 1.0 m/s					
t (min)	Xt (b.s.)	Xprom	dX	dt	V (g agua/min- m2)
0	3.4163				
10	2.5748	2.9956	0.8415	10	1.9054
20	2.1916	2.3832	0.3833	10	1.1256
30	1.8969	2.0442	0.2947	10	0.9026
40	1.4932	1.6950	0.4037	10	0.8652
50	1.1517	1.3224	0.3415	10	0.8025
60	0.6259	0.8888	0.5258	10	0.7896
70	0.3881	0.5070	0.2377	10	0.3856
80	0.2990	0.3435	0.0892	10	0.2019
90	0.2570	0.2780	0.0419	10	0.0949
100	0.2186	0.2378	0.0384	10	0.0870
110	0.1825	0.2006	0.0361	10	0.0818
120	0.1632	0.1729	0.0193	10	0.0436
130	0.1531	0.1582	0.0101	10	0.0229
140	0.1436	0.1484	0.0096	10	0.0216
150	0.1390	0.1413	0.0045	10	0.0103
160	0.1364	0.1377	0.0026	10	0.0060
170	0.1331	0.1348	0.0033	10	0.0074
180	0.1295	0.1313	0.0036	10	0.0082
190	0.1297	0.1296	0.0002	10	0.0005
200	0.1291	0.1294	0.0006	10	0.0013
210	0.1250	0.1271	0.0041	10	0.0094
220	0.1239	0.1244	0.0011	10	0.0026
230	0.1232	0.1235	0.0007	10	0.0015

a 60°C - 1.0 m/s					
t (min)	Xt (b.s.)	Xprom	dX	dt	V (g agua/min- m2)
0	3.4163				
10	2.4722	2.9442	0.9441	10	2.1378
20	1.6713	2.0718	0.8008	10	1.6425
30	0.9655	1.3184	0.7058	10	1.6123
40	0.5475	0.7565	0.4180	10	1.5888
50	0.2973	0.4224	0.2502	10	0.5665
60	0.1912	0.2442	0.1061	10	0.2404
70	0.1781	0.1846	0.0131	10	0.0296
80	0.1731	0.1756	0.0050	10	0.0113
90	0.1718	0.1725	0.0013	10	0.0028
100	0.1699	0.1709	0.0019	10	0.0043
110	0.1673	0.1686	0.0026	10	0.0060
120	0.1682	0.1678	0.0000	10	0.0000

Anexo 17, Sustancias químicas y sus ecuaciones para obtener a_W a la temperatura deseada (en Kelvin)

Nomenclatura	Sustancia química	Ecuación de regresión	Pureza	Fuente
Cloruro de Litio	LiCl	$\ln a_W = (500.95/T) - 3.85; R^2 = 0.998$	99.14%	Labuza <i>et al.</i> , 1985
Acetato de Potasio	KC ₂ H ₃ O ₂	$\ln a_W = (961.39/T) - 4.33; R^2 = 0.98$	99.0%	Labuza <i>et al.</i> , 1985
Cloruro de Magnesio	MgCl	$a_W = 0.365 - 2.532 \times 10^{-3}T + 5.071 \times 10^{-5}T^2 - 4.166 \times 10^{-7}T^3; R^2 = 0.963$	99.9%	Labuza <i>et al.</i> , 1985
Nitrato de Magnesio	Mg(NO ₃) ₂	$\ln a_W = (356.60/T) - 1.82; R^2 = 0.99$	99.8%	Labuza <i>et al.</i> , 1985
Yoduro de Potasio	KI	$\ln a_W = (255.90/T) - 1.23; R^2 = 1.00$	99.5%	Labuza <i>et al.</i> , 1985
Cloruro de Sodio	NaCl	$\ln a_W = (228.92/T) - 1.04; R^2 = 0.96$	100.0%	Labuza <i>et al.</i> , 1985
Cloruro de Potasio	KCl	$\ln a_W = (367.58/T) - 1.39; R^2 = 0.97$	100.0%	Labuza <i>et al.</i> , 1985
Cloruro de Bario	BaCl ₂	$a_W = 0.908 - 4.011 \times 10^{-4}T + 2.786 \times 10^{-5}T^2 - 2.037 \times 10^{-7}T^3; R^2 = 0.997$	99.0%	Gabas, 1998

ANEXO 18:

Muestras de hojas
de punamuña para
su posterior
deshojado o
despapillado



FOTO N° 01. Muestra de la punamuña

Selección y deshojado
de las hojas de la
punamuña para realizar
el proceso de la cinética
de secado.



FOTO N° 02. Despapillado o deshojado manual de las hojas de la punamuña.

Hojas de la punamuña colocadas en las bandejas de acero inoxidable de una dimensión de 10cmx10cm de diámetro.

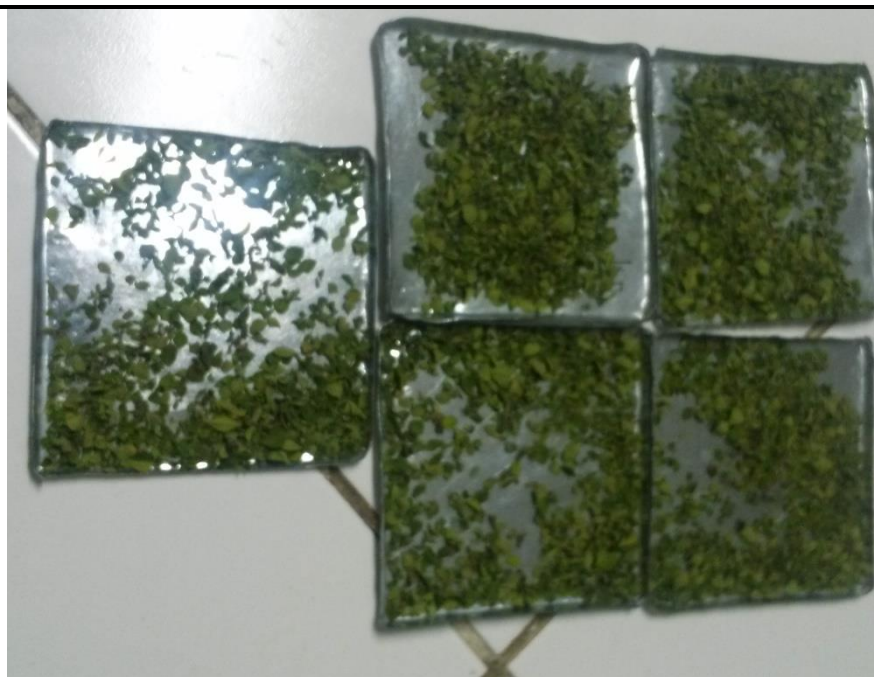


FOTO N° 3. Muestras para realizar el proceso de secado.

Determinando la velocidad de aire y humedad relativa con el instrumento “anemómetro” de la estufa en el laboratorio de Química



FOTO N° 4. Midiendo la velocidad de aire y humedad relativa.

Se observa hojas de punamuña en bandeja de acero inoxidable donde se realiza el pesaje para controlar los pesos correspondientes de las muestras

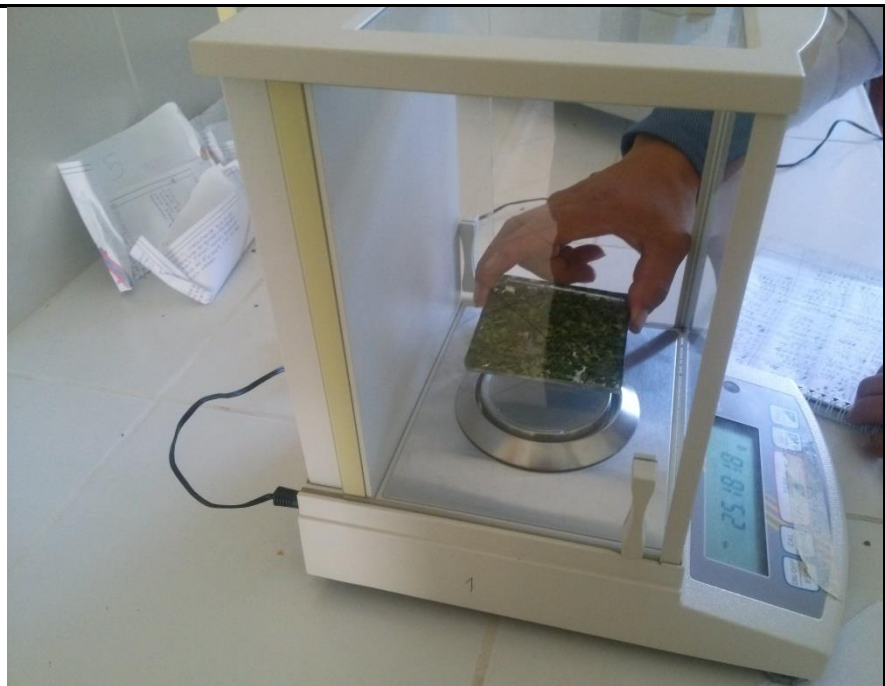


FOTO N° 05. Pesaje de las muestrasde cada 10 minutos en la balanza.

Fotografía donde se observa hojas de punamuña deshidratada a 40°C

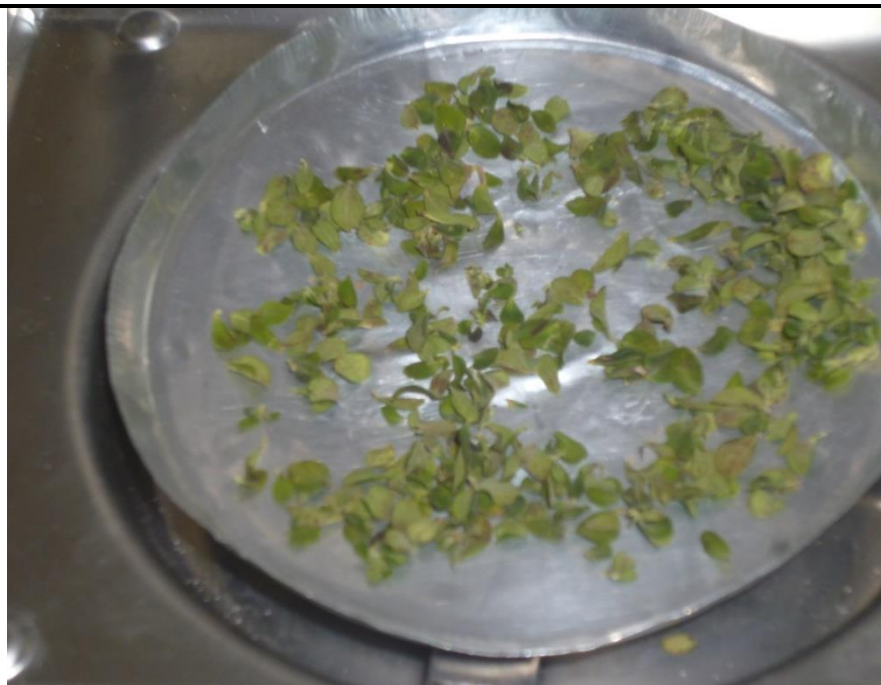


FOTO N° 06. Hojas de punamuña deshidratada

Fotografía donde se observa hojas de punamuña deshidratada a 50°C



FOTO N° 07. Hojas de punamuña deshidratada

Fotografía donde se observa hojas de punamuña deshidratada a 60°C



FOTO N° 08. Hojas de punamuña deshidratada