

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



INFORME DE TESIS

**“ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE SECADO
SOBRE LA CINÉTICA DE DESHIDRATACIÓN
DE LAS HOJAS DE ROMERO (*Rosmarinus
officinalis L.*)”**

PARA OPTAR:

**TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
AGROINDUSTRIAL**

PRESENTADO POR:

Bachiller en Ingeniería Agroindustrial

Jessica Helen, Palomino Cahuana

TACNA – PERU

2016

DEDICATORIA

A Dios y a mis padres con mucho amor y
cariño les dedico todo mi esfuerzo y trabajo
puesto para la realización de esta tesis.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar a Dios, por darme la oportunidad de realizar esta tesis, y a todas aquellas personas que, de alguna forma colaboraron para su culminación. Mi sincero agradecimiento a mi familia por siempre brindarme su apoyo, a los ingenieros Raul Cartagena Cutipa, Danny Daniel Carhuaz Valdez y Lenin Ramos, quienes proporcionaron conocimientos invaluable y colaboraron con el desarrollo de esta tesis.

RESUMEN

El estudio de las condiciones de secado sobre la cinética de deshidratación de las hojas de romero (*Rosmarinus officinalis L.*) tuvo como objetivo determinar la cinética de deshidratación de las hojas de romero bajo diferentes condiciones de temperatura y velocidad de aire, así como determinar el tiempo de secado, se usaron hojas de romero con estadios previos a la floración con un 53,31% de humedad, las evaluaciones se realizaron en un secador de bandejas de aire forzado, constituido en la sección de secado por 5 bandejas de 31 x 42 cm, la carga por bandeja fue $120 \pm 0,01$ g y se evaluaron tres temperaturas (40, 65 y 90 °C) y tres velocidades de aire (0,5; 1,5 y 2,5 m/s) para un total de 9 tratamientos con cuatro repeticiones. Se obtuvieron gráficos de velocidad de secado en función del tiempo y humedad del producto. La curva de secado que mejor ajusta son de tipo polinomial, superior a 0,97 en la mayoría de los casos, la temperatura y velocidad de viento tienen efectos significativos sobre el tiempo de secado, así como sus interacciones ($p < 0,05$) entre ambos factores, el aumento de dichas variables significa la reducción del tiempo de secado, no obstante a temperaturas altas y velocidades de aire bajas el producto tiende a sufrir pardeamiento, observándose colores oscuros, este efecto particular fue más pronunciado a 90 °C y 0,5 m/s; obteniendo por medio de una prueba de ordenamiento cualitativo que las variables adecuadas son de 65 °C y 1,5 m/s de flujo de aire, se recomienda estudiar el comportamiento de los parámetros de calidad de las hojas deshidratadas de romero entre temperaturas de 40 y 65 °C y velocidades de aire entre 0,5 y 1,5 m/s para determinar con mayor exactitud las variables adecuadas para la deshidratación de hojas de romero.

ABSTRACT

The Study of Conditions under the kinetics of dehydration of rosemary leaves (*Rosmarinus officinalis L.*) had as objective to determine the kinetics of dehydration of the rosemary leaves under different conditions of temperature and air velocity, as well as to determine the time of drying, rosemary leaves with pre-flowering stages were used with 53,31 % of humidity, the evaluations were performed in a forced air tray dryer, constituted in the drying section by 5 trays measuring 31 x 42 cm trays, the load per tray was 120 ± 0.01 g and evaluated three temperatures (40, 65 and 90 °C) and three air velocities (0,5; 1,5 and 2,5 m/s) for a total of 9 treatments with four replicates. Drying speed graphs were obtained as a function of the time and humidity of the product. The drying curve that best adjusts are polynomial type, higher than 0,97 in most cases, temperature and wind speed have significant effects on drying time, as well as their interactions ($p < 0.05$) Between both factors, the increase of these variables means the reduction of drying time, however at high temperatures and low air velocities the product tends to brown, with dark colors being observed, this particular effect was more pronounced at 90 °C and 0,5 m/s; Obtaining by means of a qualitative classification test that the suitable variables are of 65 °C and 1,5 m/s of air flow, it is recommended to study the behavior of the parameters of quality of the dehydrated rosemary leaves between temperatures of 40 and 65 °C and air velocities between 0,5 and 1,5 m/s to determine more accurately the variables suitable for the dehydration of rosemary leaves.

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

CAPITULO I

PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.1 Planteamiento de problema.....	3
1.2 Formulación del problema.....	5
1.2.1 Problema general.....	5
1.2.2 Problemas específicos.....	5
1.3 Justificación e importancia.....	5
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1 Objetivo general.....	6
1.4.2 Objetivos específicos.....	6
1.5 Hipótesis.....	7
1.5.1 Hipótesis general.....	7
1.6 Variables.....	7
1.6.1 Identificación de las variables.....	7
1.6.2 Caracterización de las variables.....	7
A. Variables independientes.....	7
• Temperatura de secado.....	8
• Velocidad de aire de secado.....	8
B. Variables dependientes.....	8

• Tiempo de secado.....	8
• Humedad en equilibrio.....	8
• Color del producto deshidratado.....	9
1.6.3 Definición operacional.....	10
1.7 Limitaciones de la investigación.....	11
1.8 Descripción de las características.....	12
1.8.1 Tipo de estudio.....	12
1.8.2 Nivel de investigación.....	12

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO.....	13
2.1 Antecedentes de la investigación.....	13
2.2 Bases Teóricas	17
2.2.1 El secado como técnica de conservación.....	17
2.2.2 Secado durante el periodo de velocidad constante.....	18
2.2.3 Secado durante el periodo de velocidad decreciente.....	18
2.2.4 Efectos de la contracción en el secado.....	19
2.2.5 El romero.....	20
A. Descripción botánica.....	20
2.2.6 Características climáticas de la provincia de Candarave.....	23
2.2.7 Producción de romero en el distrito de Huanura.....	24
2.2.8 Composición química del Romero.....	25
2.2.9 Cosecha y post cosecha del romero.....	26
2.2.10 Post cosecha del romero.....	27

2.2.11 Secado del romero.....	27
2.2.12 La estadística en la Ingeniería.....	29
2.2.13 Análisis de la Varianza.....	29
CAPITULO III	
MARCO METODOLÓGICO.....	32
3.1 Materiales.....	32
3.2 Métodos.....	34
CAPITULO IV	
RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	36
CAPITULO V	
CONCLUSIONES.....	48
CAPITULO VI	
RECOMENDACIONES.....	50
CAPITULO VII	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
CAPITULO VIII	
ANEXOS.....	56
Anexo 1. Condiciones de temperatura y velocidad de aire sobre el tiempo de secado.....	56

Anexo 2. Figuras del proceso de secado, prueba de ordenamiento cualitativo e hidratación.....	57
Anexo 3. Formato de ficha de secado de romero.....	59
Anexo 4. Formato de ficha de hidratación de muestras secas.....	60
Anexo 5. Formato de prueba de ordenamiento.....	61
Anexo 6. Solubilidad de sales.....	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Definición operacional de las variables.....	10
Tabla 2: Requerimientos edafoclimáticos del romero.....	24
Tabla 3. Análisis de varianza para tiempo de secado.....	41
Tabla 4. Valores promedio de color por ordenamiento de hojas secas de romero.....	43
Tabla 5: Modelo de adsorción para ajuste de isoterma de humedad a 40 °C.	45
Tabla 6: Modelo de adsorción para ajuste de isoterma de humedad a 65 °C.	46
Tabla 7: Modelo de adsorción para ajuste de isoterma de humedad a 90 °C.	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Planta de romero (<i>Rosmarinus officinalis</i>)	21
Figura 2. Flores de romero (<i>Rosmarinus officinalis</i>).....	21
Figura 3: Distribución porcentual de la Superficie Cultivada, Distrito de Huanuara 2014.....	25
Figura 4. Esquema del secador de bandejas utilizado.....	33
Figura 5. Efecto de la temperatura de 40 °C y velocidades de aire 0.5, 1,5 y 2.5 m/s sobre el tiempo de secado.....	37
Figura 6. Efecto de la temperatura de 65 °C y velocidades de aire 0.5, 1,5 y 2.5 m/s sobre el tiempo de secado.....	38
Figura 7. Efecto de la temperatura de 90 °C y velocidades de aire 0.5, 1,5 y 2.5 m/s sobre el tiempo de secado.....	39
Figura 8. Efecto de la interacción de la temperatura y velocidad de aire sobre el tiempo de secado de hojas de romero.....	42
Figura 9. Puntuación promedio de color por ordenamiento de hojas secas de romero, según la temperatura y velocidad de aire de secado.....	44

INTRODUCCIÓN

El secado de alimentos es uno de los métodos de conservación de alimentos más empleados. Durante ella se elimina agua de alimentos disminuyendo su disponibilidad para participar de aquellos procesos de deterioro, lo que reduce la actividad de agua, y de esta manera la velocidad de deterioro del alimento (Ibarz & Barboza 2005), la remoción de humedad impide el crecimiento de bacterias y hongos que deterioran la calidad del alimento. Durante los procesos de secado por aire caliente, se observa normalmente dos periodos; un periodo de velocidad de secado constante, donde el secado ocurre como si se evaporara agua pura, y un periodo de velocidad de secado decreciente donde la eliminación de humedad es controlada por resistencias internas (Rivsi y Mittal, 1992; López et al. 1995) por lo tanto la razón más importante desde el punto de vista técnico por la que se secan las hierbas es su conservación, en el caso del romero cultivado en la zona de Huanuara, región Tacna, el secado se realiza con exposición directa al sol, lo que trae consigo defectos en el secado, contaminación y deterioro de propiedades físicas y químicas, en algunos casos no se logra deshidratar hasta la humedad requerida en el producto lo que podría traer problemas, en tal sentido Gonzáles, Cruz & Vega, 2013 afirman que la humedad del romero deshidratado debe variar entre el 8 % y el 11% para el producto entero envasado, así como la temperatura, la velocidad de secado, la humedad relativa que tiene influencia sobre el producto final obtenido, Según Strumillo & Kudra (1989), el proceso es fuertemente influenciado por la temperatura y la velocidad de la corriente del aire que circula alrededor del

producto. Aunque a veces, los datos de secado pueden expresarse en términos de velocidad de secado (Barbosa & Vega, 2000, p. 90). Sin embargo no existe información relevante que sea usada como fiable para ser replicada en procesos industriales. Por lo tanto esta investigación trata de establecer las condiciones adecuadas de secado de romero en secador de bandejas por aire forzado sobre el tiempo de deshidratación del romero.

CAPITULO I

PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

En nuestro siglo, los grandes avances científicos y tecnológicos permitieron desarrollar sustitutos artificiales a los productos naturales. Sin embargo, el nivel de deterioro del ambiente, a raíz de la contaminación, ha producido un vuelco de mentalidad, sobre todo en países desarrollados, donde en los últimos veinte años se ha verificado una tendencia de volver a los productos naturales, libres de contaminación, al uso de hierbas medicinales, plantas aromáticas o de esencias y plantas condimentarias (Gonzales, Cruz & Vega, 2013, p.1).

Según la Estadística agropecuaria de la Región Tacna, 2014, el romero no es el principal cultivo en el Distrito de Huanuara, ya que se encuentra dentro de “otros” cultivos de menor superficie cultivada, como se puede ver en la figura 3. El área total de superficie cultivada es de aproximadamente 801 hectáreas. Según la opinión de expertos, la producción de romero que existe en Huanuara se encuentra cultivada en los huertos personales de los pobladores como una hierba aromática con fines de comercialización, también dispersos en las laderas de los cerros, incluso hay pobladores que cultivan aproximadamente 1 topo

(0,33 hectáreas) con romero, para después comercializarla deshidratada, con un secado al natural.

Sin embargo, el secado al natural bajo condiciones inapropiadas, le brinda una baja calidad al producto final, como un color opaco, los aromas se pierden, reacciones de pardeamiento, presencia de hongos y mohos, además de pérdida de producto en el transcurso del secado por podredumbre. Los pobladores secan el romero basados en su experiencia con el secado del orégano, pero para mantener la calidad del producto es necesario que las condiciones de secado sean específicas para cada planta y según el destino de la misma.

Por lo tanto de continuar esta situación, los pobladores no obtendrán el poder de negociación suficiente para vender su producto a un mejor precio, y continuaran con las mermas de producción.

Una alternativa para mejorar la calidad del producto final es aplicando el secado con tecnología adecuada, por lo tanto, este proyecto de investigación establece parámetros para el proceso de secado respecto a temperatura y velocidad del aire, convirtiéndose en una opción para mejorar la calidad del romero respecto al tiempo de secado, el color y otros parámetros en el producto final.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

- A. ¿Cuál es el efecto de las condiciones de secado sobre la cinética de deshidratación de las hojas de romero (*Rosmarinus officinalis*)?

1.2.2 Problemas específicos

- A. ¿Cómo influye la temperatura y el flujo del aire sobre el tiempo de secado?
- B. ¿Cuál es la temperatura adecuada para la deshidratación de hojas de romero (*Rosmarinus officinalis*)?
- C. ¿Cuál es la velocidad de aire adecuada para la deshidratación de hojas de romero (*Rosmarinus officinalis*)?
- D. ¿Cuál es la isoterma de adsorción de humedad en el romero deshidratado?

1.3 Justificación e importancia

Con los parámetros adecuados de secado se puede realizar transferencia de tecnología a los pobladores de Huanuara. Se brindará mayor atención e importancia a las propiedades de las hierbas

aromáticas, el romero se puede utilizar como: condimento, aromatizante de comidas, para obtener su aceite esencial, estimulantes, tónicos medicinales, para perfumería y usos industriales.

Además, si la calidad del producto final aumenta, el poder de negociación de los pobladores también se eleva, generando mayores ingresos al productor.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- A. Determinación de los efectos de las condiciones de secado sobre la cinética de deshidratación de las hojas de Romero (*Rosmarinus officinalis*).

1.4.2 Objetivos específicos

- A. Determinar la influencia de la temperatura y el flujo del aire sobre el tiempo de secado.
- B. Determinación de la temperatura adecuada para la deshidratación de hojas de Romero (*Rosmarinus officinalis*).
- C. Determinación de la velocidad de aire adecuada para la deshidratación de hojas de Romero (*Rosmarinus officinalis*).

- D. Determinar las isotermas de adsorción de humedad en el romero deshidratado.

1.5 Hipótesis

1.5.1 Hipótesis general

- A. Las condiciones de secado presentan un efecto significativo sobre la deshidratación de las hojas de Romero (*Rosmarinus officinalis*)

1.6 Variables

1.6.1 Identificación de las variables

- Temperatura de secado.
- Velocidad de aire de secado.
- Tiempo de secado.
- Humedad en equilibrio.
- Color del producto deshidratado.

1.6.2 Caracterización de las variables

A. Variables independientes

- **Temperatura de secado.**

“La temperatura tiene la característica de medir el calor”
en este trabajo la temperatura se medirá en grados centígrados (°C).

- **Velocidad de aire de secado.**

Mide la distancia que recorre el aire en un tiempo determinado. En este trabajo la velocidad de aire se expresará en metros por segundo (m/s).

B. Variables dependientes

- **Tiempo de secado.**

Es el tiempo necesario para secar el romero bajo condiciones específicas de secado. En este trabajo el tiempo de secado se expresará en horas (h).

- **Humedad en equilibrio.**

La humedad de Equilibrio (X) es el límite al que puede llevarse el contenido de humedad de una sustancia por contacto con aire de humedad y temperatura determinadas (“Secado de sólidos”, p. 6).

- **Color del producto deshidratado.**

El color de un objeto no luminoso es la combinación de las longitudes de onda de la luz reflejada por su superficie (Claude, 2004, p. 24). Es el color que el romero tendrá después de ser sometido a diferentes condiciones de secado. En este trabajo el color se medirá en intensidad de color.

1.6.3 Definición operacional

Problema / Objetivo General	Problemas / Objetivos Específicos	Hipótesis	Variables	Definición	Indicadores	Instrumentos	Métodos
<p>Problema general: A. ¿Cuál es el efecto de las condiciones de secado sobre la cinética de deshidratación de las hojas de Romero (<i>Rosmarinus officinalis</i>) ?</p> <p>Objetivo general: A. Determinación de los efectos de las condiciones de secado sobre la cinética de deshidratación de las hojas de Romero (<i>Rosmarinus officinalis</i>).</p>	<p>Problemas específicos: A. ¿Cuál es la temperatura adecuada para la deshidratación de hojas de Romero (<i>Rosmarinus officinalis</i>) ? B. ¿Cuál es la velocidad de aire adecuada para la deshidratación de hojas de Romero (<i>Rosmarinus officinalis</i>) ?</p> <p>Objetivos Específicos: A. Determinación de la temperatura adecuada para la deshidratación de hojas de Romero (<i>Rosmarinus officinalis</i>). B. Determinación de la velocidad de aire adecuada para la deshidratación de hojas de Romero (<i>Rosmarinus officinalis</i>).</p>	<p>A. Las condiciones de secado presenta un efecto significativo sobre la deshidratación de las hojas de Romero (<i>Rosmarinus officinalis</i>).</p>	<p>Variables Independientes: - Temperatura (°C)</p>	- La temperatura tiene la característica de medir el calor.	(°C) - 40 (±1) - 65 (±1) - 90 (±1)	Termohigrómetro	Secador de Bandeja
			<p>- Velocidad de aire (m/s)</p>	- Mide la distancia que recorre el aire en un tiempo determinado.	(m/s) - 0,5 (±0.1) - 1,5 (±0.1) - 2,5 (±0.1)	Anenómetro	Secador de Bandeja
			<p>Variables Dependientes: - Tiempo de secado (h)</p>	- Es el tiempo necesario para secar el romero bajo las condiciones específicas de secado.	(h)	Temporizador	Medición con temporizador
			<p>- Humedad en equilibrio (%)</p>	- La humedad de Equilibrio (X) es el límite al que puede llevarse el contenido de humedad de una sustancia por contacto con aire de humedad y temperatura determinadas.	(%)	Termohigrómetro	Secador de Bandeja
			<p>- Color del producto deshidratado (Intensidad)</p>	- Es el color que el romero obtendrá después de ser sometido a diferentes condiciones de secado.	(Intensidad)	Prueba de Ordenamiento	Ficha de prueba de ordenamiento

Tabla 1: Definición operacional de las variables.

1.7 Limitaciones de la investigación

El secador de bandejas empleado, es un equipo que realiza el deshidratado de productos alimenticios, de humedades menores de 85 %, la capacidad es de 3,5 a 4,0 kg de materia prima, consta de un túnel por donde circula el aire forzado, está provisto de un ventilador centrífugo que genera un flujo de aire controlado, una batería de resistencias que provee de calor, y una báscula electrónica de cinco bandejas extraíbles; a ciertas distancias promedio se ubica en la entrada y salida de las bandejas los anemómetros y termohigrómetros para el control del flujo de aire y de humedad, para que se desarrolle un adecuado secado se tiene un panel de mando esencial para el control integral del equipo. La temperatura del aire caliente a la salida del túnel de secado se controla mediante una sonda termostática si su valor es elevado ($< 80\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Cove, 2015).

Como el aire de entrada es del medio ambiente, no se pudo controlar su temperatura ni humedad de entrada, solo se pudo programar la temperatura de las resistencias que harán variar la temperatura y humedad de salida. La velocidad de aire si se pudo controlar.

La investigación se realizó durante los meses de verano del año 2016, el horario de los análisis fueron durante las mañanas y tardes. La fuente de financiamiento fue propia.

1.8 Descripción de las características

1.8.1 Tipo de estudio

Investigación aplicada.

1.8.2 Nivel de investigación

Investigación explicativa.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

Pineda C., Chacón V. & Cordero G. (2009), investigaron el efecto de las condiciones de secado sobre la cinética de deshidratación de las hojas de morera (*Morus alba*), su objetivo fue determinar las cinéticas de deshidratación de la morera bajo diferentes condiciones de temperatura, velocidad y humedad del aire, entre junio y diciembre del 2006, en Costa Rica. Forraje de morera (*Morus alba*) de 75 días fue empleado como sustrato. Se evaluó la cinética de deshidratación en un secador convectivo de resistencias eléctricas de bandeja única con diámetro de 0,22 m y carga de 122 ± 1 g hasta una humedad del 5 %. La evaluación se realizó para tres temperaturas de secado (60 °C, 75 °C y 90 °C), dos velocidades de aire (1,0 y 2,5 m/s) y dos humedades del aire (12 g/kg aire seco y 45 g/kg aire seco), para un total de 12 tratamientos triplicados. Las curvas de secado correspondientes se estudiaron según el modelo de decaimiento exponencial de Newton. Se obtuvieron gráficos de velocidad de secado en función del tiempo y la humedad. Las cinéticas de deshidratación presentaron la curva típica del modelo de Newton, con altos coeficientes de correlación. Existió un efecto triple significativo ($p < 0,05$) entre la temperatura, la velocidad y la humedad

del aire sobre el tiempo de secado del sustrato; la variable más influyente fue la temperatura, seguida de la velocidad y por último la humedad del aire. El aumento de cualquiera de estas variables implicó una disminución del tiempo de secado. El efecto de la temperatura sobre éste fue más pronunciado a una velocidad del aire de 1 m/s. Dado el gran efecto de las condiciones de secado sobre los tiempos de deshidratación de la morera, resulta de interés que estudios futuros evalúen el efecto de las condiciones de secado sobre las variaciones nutricionales y del color del forraje.

Ocampo A. (Junio 2006), investigó el modelo cinético del secado de la pulpa de mango, y el propósito de su trabajo fue encontrar un modelo que permitiera predecir el tiempo de secado de la pulpa de mango (*Mangifera indica*) con diferentes condiciones de temperatura. Se construyó un secador de laboratorio en el que se llevaron a cabo pruebas de secado a temperaturas de 55 °C, 60 °C y 65 °C, con una velocidad de aire constante de 2,0 m/s y una humedad relativa controlada de 50 %. Se presenta un procedimiento sencillo que convierte el modelo de GAB en una ecuación polinomial de segundo orden. Igualmente, se muestra una manera simple aplicable a procesos similares de secado para establecer su cinética a partir de modelos simplificados de la ecuación clásica de Fick. Por medio de un desarrollo experimental se encontró que la desadsorción de la pulpa de mango se ajusta muy bien a la ecuación de GAB. El proceso cinético

del secado de la pulpa de mango puede ser modelado a partir del modelo de Crank (1975), simplificado al considerar solamente el primer término de la sumatoria, más los dos primeros términos del desarrollo en serie de los primeros términos restantes. La construcción de modelos como el propuesto es importante para predecir el tiempo de secado con temperaturas diferentes a las usadas en este trabajo.

Michalewicz J., Henriquez J. & Charamba J. (2011), investigaron el Secado de Cajuil (*anacardium occidentale l.*): Estudio Experimental y Modelado de la Cinética de Secado; determinaron experimentalmente la cinética de secado de muestras de cajuil (*anacardium occidentale l.*) en rebanadas de 4, 7 y 10 x 10 - 3 m de espesor. Se utilizó un secador de laboratorio tipo bandeja, en donde se impusieron las temperaturas y velocidades del aire para el secado dentro de los rangos 60 a 80 °C y 3 a 5 m/s, respectivamente. Se determinó el perfil de contenido de humedad en la muestra respecto al tiempo de secado. Se aplicaron once modelos matemáticos disponibles en la literatura para determinar el que correlacione los datos experimentales. De los resultados y de su análisis se estableció que el modelo de Page es el más adecuado por la simplicidad con que relaciona el contenido de humedad con las variables temperatura y velocidad del aire de secado.

Según Gonzales, Cruz & Vega, (2013), la razón más importante desde el punto de vista técnico por la que se secan las

hierbas es su conservación; por este método se promueve el mantenimiento de los componentes del vegetal fresco y se evita la proliferación de microorganismos. También existen aspectos comerciales, la deshidratación debe llevarse a cabo en las mejores condiciones para que las hierbas no pierdan nada del aspecto que deben presentar, para que cautiven y ejerzan la mayor atracción, así serán más apreciadas, más demandadas y, sobre todo, mejor pagadas. Pero la cantidad de agua a extraer no debe superar ciertos valores, la planta no debe comercializarse reseca y quebradiza, tal que al manipularla se convierta en polvo. En general, en el mercado existen valores establecidos y recomendaciones internacionales sobre el contenido adecuado de humedad para cada hierba o sus partes. En el caso del romero, varía entre el 8 % y el 11 % para el producto entero envasado. Desde el punto de vista técnico, es importante tener claro que es el aire el que absorbe el vapor de agua que se retira de la superficie de las plantas, por lo que no debe estar saturado, es decir, su humedad relativa debe ser lo más baja posible, ya sea en el caso de secar al aire libre a la sombra, o en secado mecánico en secadores. El aire circundante al producto se deberá renovar a medida que sea necesario en tanto el producto no haya llegado al nivel de secado deseado. Lo anterior se logra mediante la exposición del producto contra el viento o bien con ventiladores mecánicos. En forma general, en caso de secadores, la temperatura del horno no deberá superar los 40 °C - 45 °C, a fin de evitar la pérdida de propiedades de la hierba.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 El secado como técnica de conservación

Se desconoce cuándo se inició la conservación de alimentos por deshidratación, pero la Historia muestra que nuestros antepasados aprendieron como secar alimentos por ensayo y error. Las primeras noticias de secado se refieren a verduras y aparecieron en el siglo VXIII. Después de esto, el desarrollo de secado industrial estuvo estrechamente relacionado con los escenarios de guerra a lo largo del mundo entero (Barbosa & Vega, 2000, p. 1).

Los microorganismos que provocan la descomposición de los alimentos no pueden crecer y multiplicarse en ausencia de agua. Los microorganismos dejan de ser activos cuando el contenido de agua se reduce por debajo del 10 % en peso. Sin embargo es necesario reducir este contenido de humedad por debajo del 5 % en peso en los alimentos para preservar el sabor y su valor nutritivo. Además, muchas de las enzimas que causan los cambios químicos en alimentos y otros materiales biológicos no pueden funcionar sin agua. Los alimentos secos pueden almacenarse durante períodos bastante largos (“Secado de sólidos”, p. 1).

2.2.2 Secado durante el periodo de velocidad constante

Durante el primer periodo, la superficie del sólido está al principio muy mojada y sobre ella existe una película de agua continua. Esta capa de agua está siempre sin combinar y actúa como si el sólido no estuviera presente. La velocidad de evaporación con las condiciones establecidas para el proceso, es independiente del sólido y es esencialmente igual a la velocidad que tendría una superficie líquida pura. Sin embargo, las ondulaciones y hendiduras sobre la superficie del sólido ayudan a obtener una velocidad más alta que la que tendría una superficie completamente plana (“Secado de solidos por lotes curvas de velocidad de secado”, p. 4).

2.2.3 Secado durante el periodo de velocidad decreciente

La primera etapa del periodo de velocidad decreciente corresponde al contenido crítico de humedad libre, en este punto no hay suficiente agua en la superficie para mantener una película continua. La superficie ya no está totalmente mojada, y la porción mojada comienza a disminuir durante este periodo de velocidad decreciente, hasta que su superficie queda seca en su totalidad. La segunda etapa del periodo de velocidad decreciente empieza cuando la superficie está seca en su totalidad. El plano

de evaporación comienza a desplazarse con lentitud por debajo de la superficie. El calor para la evaporación se transfiere a través del sólido hasta la zona de vaporización. El agua vaporizada atraviesa el sólido para llegar hasta la corriente de aire (“Secado de solidos por lotes curvas de velocidad de secado”, p. 4).

2.2.4 Efectos de la contracción en el secado

Un factor que afecta con frecuencia a la velocidad de secado es la concentración del sólido al eliminarse la humedad. En muchos alimentos, si el secado se realiza a temperaturas muy altas, se forma en la superficie una capa de celdillas contraídas que se adhieren unas a otras formando un sello. Esto representa una barrera a la migración de la humedad, y se conoce con el nombre de *endurecimiento superficial*. Otro efecto de la contracción es la causa de que el material se deforme y cambie su estructura. Esto puede suceder, por ejemplo, en el secado de madera. Algunas veces, para disminuir estos efectos del secado, resulta aconsejable secar con aire húmedo. Así se disminuye la velocidad de secado de tal manera que los efectos de la contracción, evidenciados por deformación o endurecimiento de la superficie, se reducen notablemente (“Secado de solidos por lotes curvas de velocidad de secado”, p. 5).

2.2.5 El romero

Según Arango (2004), “El nombre científico *Rosmarinus* significa bálsamo marino. Lugar de origen: Cuenca del mediterráneo, probablemente nativo de Irán. (p. 283).

A. Descripción botánica

“La planta de romero (*Rosmarinus officinalis*) es un arbusto aromático de hoja perenne, perteneciente a la familia de las labiadas, que presenta un tallo leñoso y muy ramificado de entre 1 y 2 m de altura” (Gonzales, Cruz & Vega, 2013,p. 12).

En la figura 1 podemos ver que sus hojas son muy abundantes, largas y estrechas, crecen directamente sobre el tallo sin pedúnculo, con unas dimensiones de entre 1,5 y 3 cm de longitud por 2 ó 3 mm de anchura. Presentan un color verde oscuro por la cara y una tonalidad blanquecina por el envés. En las plantas más jóvenes se recubren de abundantes pelos que desaparecen al crecer. En la zona de unión de la hoja con el tallo nacen los ramilletes floríferos (Gonzales, Cruz & Vega, 2013,p. 12).



Figura 1. Planta de romero (*Rosmarinus officinalis*)

Fuente: Gonzales, Cruz & Vega, 2013.

Como se puede apreciar en la figura 2, las flores son de color azulado, violáceo o rosa y nacen en forma de ramilletes en la unión del tallo con la hoja, con un tamaño aproximado de 5 mm. El fruto mide 1 mm y aparece dentro del cáliz en forma de cuatro pequeñas nueces de color pardo (Gonzales, Cruz & Vega, 2013,p. 12).



Figura 2. Flores de romero (*Rosmarinus officinalis*)

Fuente: Propia, 2016.

Tienen la corola bilabiada de una sola pieza. El color es azul violeta pálido, rosa o blanco, con cáliz verde o algo rojizo, también bilabiado y acampanado. Son flores axilares, muy aromáticas y melíferas (contienen miel), se localizan en la cima de las ramas, tienen dos estambres encorvados soldados a la corola y con un pequeño diente. La floración se produce en primavera y otoño. Su hábitat son los espacios cubiertos de matorral mediterráneo, ubicándose en laderas soleadas y montañosas cerca del mar y protegido del viento. Se extiende por terrenos con sustratos calcáreos, asentándose entre pedregales o arenosos con gran permeabilidad, ya que necesita muy poca humedad para crecer. Sobrevive hasta los 1 500 m de altitud y soporta temperaturas mínimas de 10 °C bajo cero. Crece de forma natural acompañado de otras plantas aromáticas como tomillos. El fruto, encerrado en el fondo del cáliz, está formado por cuatro pequeñas nuececitas de color parduzco. Su reproducción se produce tanto manualmente mediante esquejes como de forma natural por semillas. El romero más frecuente de toda la franja mediterránea es el *Rosmarinus officinallis*, aunque existen otras variedades no tan abundantes. En el sureste peninsular se encuentra el *Rosmarinus eriocalix* que se diferencia por sus flores cubiertas de pelos y hojas más cortas, unas de

color verde y otras recubiertas de una densa pilosidad blanquecina, dando origen a la subespecie denominada *Rosmarinus tomentosus* (Gonzales, Cruz & Vega, 2013,p. 13-14).

2.2.6 Características climáticas de la provincia de Candarave

En la provincia de Candarave, la zonas poseen un clima frío moderado, con déficit permanente de agua, la temperatura media anual es de 10,5 °C. Las temperaturas máximas se registran en enero y diciembre y las mínimas en junio y julio. Las lluvias son estacionales, registrándose más del 90 % de estas durante los meses de diciembre a marzo. Durante los meses de mayo a julio la precipitación es nula. Esto condiciona el régimen irregular de los ríos. La humedad relativa promedio es de 55,15 %, existen dos temporadas: la húmeda entre enero a marzo y la seca de abril a diciembre. Los vientos tienen dirección predominante sur - sureste, su velocidad máxima es de 20 m/s que alcanzan en las estaciones de otoño e invierno (CLAS, 1961, p. 3).

Estas características climáticas de la provincia de Candarave, coinciden con los requerimientos edafoclimáticos del romero como se puede ver en la tabla 2, convirtiendo al distrito de Huanuara en una zona aceptable para su producción.

Parámetro	Numero
Temperatura mínima	6 °C
Temperatura máxima	26 °C
Temperatura óptima	19 °C a 25 °C pero se comporta mejor en frío
Ciclo vegetativo	Perenne
Clima	Templado cálido
Humedad Relativa	10 a 60 %
Suelo	Franco arenoso
pH	5 a 8
Radiación	Alta
Precipitaciones anuales	150 a 1000 mm
Altitud	0 hasta 2600 msnm

Tabla 2: Requerimientos edafoclimáticos del romero.

Fuente: Gonzales, Cruz & Vega, 2013.

2.2.7 Producción de romero en el distrito de Huanura

Según la Estadística agropecuaria de la Región Tacna, 2014, el romero no es el principal cultivo en el Distrito de Huanuara, ya que se encuentra dentro de “otros” cultivos de menor superficie cultivada, como se puede ver en la figura 3. El área total de superficie cultivada es de aproximadamente 801 hectáreas. Según la opinión de expertos, la producción de romero que existe en Huanuara se encuentra cultivada en los huertos personales de los pobladores como una hierba aromática con fines de comercialización, también dispersos en las laderas de los cerros, incluso hay pobladores que cultivan

aproximadamente 1 topo (0,33 hectáreas) con romero, para después comercializarla deshidratada, con un secado al natural.

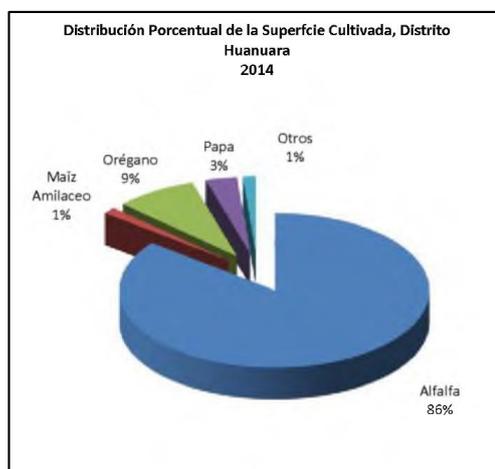


Figura 3: Distribución porcentual de la Superficie Cultivada, Distrito de Huanuara 2014.

Fuente: Estadística agropecuaria de la Región Tacna, 2014

2.2.8 Composición química del Romero

El romero contiene una esencia con derivados terpénicos a los que debe la mayor parte de sus virtudes medicinales, ácidos fenólicos con acción diurética y flavonoides con efectos antiespasmódicos (Gonzales, Cruz & Vega, 2013, p.17).

Según Romero (2004) “El romero <<*Rosmarinus officinalis* L.>> posee los siguientes constituyentes principales: el 1,8 cineol —que es un oxido, y dos cetonas (la borneona, llamada más comúnmente *alcanfor*, y la verbenona)—; esta composición

puede variar según el lugar geográfico de recolección, dependiendo de la temperatura y suelo”.

2.2.9 Cosecha y post cosecha del romero

Cosechar en el momento adecuado optimiza la calidad y el rendimiento, lo que conlleva a una mejor rentabilidad del cultivo, sin incrementar los costos de producción. Rendimientos: a partir del segundo año los rendimientos son de 18 toneladas por hectárea año, momento en el cual estabiliza la producción. El cultivo de romero tiene una vida útil de ocho años. Si el destino de la producción es para ser comercializada como hoja seca, el momento más adecuado para la cosecha es antes o a comienzos de floración, y la altura de corte del romero debe ser sobre los 15 cm (Gonzales, Cruz & Vega, 2013, p. 53-54).

La cosecha se realizará de los 8 a los 10 meses de trasplante; las ramas se cortan dependiendo del mercado, con una longitud de 18 a 22 cm. La cosecha se efectúa una o dos veces por semana dependiendo del mercado (Gonzales, Cruz & Vega, 2013, p. 60).

2.2.10 Post cosecha del romero

Una vez cosechado, el producto debe trasladarse rápidamente al cuarto frío, para disminuir las pérdidas por transpiración. La temperatura óptima de almacenamiento es de 4 °C, humedad relativa de 80 %; en estas condiciones su vida útil será de 10 a 12 días. Empaque: empacar en bolsas de polietileno perforadas con 500 g por bolsa, en la base se debe ubicar papel absorbente.

Dependiendo del mercado, el producto es empacado por libras, en 12 ramilletes de 42 g o en 24 ramilletes de 21 g. Las bolsas de libra se organizan en cajas de cartón corrugado “tipo tabaco” (104 cm x 49 cm x 22 cm), cada caja tiene capacidad de 12 a 14 libras de romero.

2.2.11 Secado del romero

La razón más importante desde el punto de vista técnico por la que se secan las hierbas es su conservación; por este método se promueve el mantenimiento de los componentes del vegetal fresco y se evita la proliferación de microorganismos. También existen aspectos comerciales, la deshidratación debe llevarse a cabo en las mejores condiciones para que las hierbas no pierdan nada del aspecto que deben presentar, para que cautiven y

ejerzan la mayor atracción, así serán más apreciadas, más demandadas y, sobre todo, mejor pagadas. Pero la cantidad de agua a extraer no debe superar ciertos valores, la planta no debe comercializarse reseca y quebradiza, tal que al manipularla se convierta en polvo. En general, en el mercado existen valores establecidos y recomendaciones internacionales sobre el contenido adecuado de humedad para cada hierba o sus partes. En el caso del romero, varía entre el 8 % y el 11 % para el producto entero envasado (Gonzales, Cruz & Vega, 2013, p. 55).

En cuanto a la calidad, en el caso del romero las normas mínimas y las exigencias de los clientes son similares a las del orégano, en cuanto a las normas ISO se presentan algunas diferencias que se detallan a continuación:

- Aroma característico similar al alcanfor y cineol.
- Sabor aromático, placentero y fresco, ligeramente amargo, rememorante a eucalipto y alcanfor. El total de materias extrañas no puede ser mayor a 1 % de la masa.
- La proporción de trozos de tallos no puede exceder un 3 %.
- La proporción de hojas café no puede ser mayor a un 10 %.

2.2.12 La estadística en la Ingeniería

Según Ross (2005), la estadística es el arte de aprender a partir de los datos. Está relacionada con la recopilación de datos, su descripción subsiguiente y su análisis, los que lleva a extraer conclusiones. En ocasiones un análisis estadístico comienza con un conjunto de datos, en otras situaciones, los datos no están disponibles, y la estadística se puede usar para diseñar un experimentos apropiado para generar dichos datos.

En esta tesis, se emplea la estadística para analizar los datos obtenidos en la investigación, teniendo como factores la temperatura y la velocidad de aire (variables independientes).

2.2.13 Análisis de la Varianza

Según Pliego (2011), el análisis de la varianza (también conocido por ANOVA) es una prueba estadística que consiste en comprobar si las diferentes modalidades (denominadas niveles) en las que se presenta una determinada variable en estudio (determinada factor) tienen efectos significativamente distintos entre ellos. Lo que se desea contrastar es si los diferentes niveles del factor considerado producen efectos que se pueden considerar iguales o, por el contrario, existen significativas diferencias en los efectos derivados de los diferentes niveles

analizados. Por tanto, el análisis de la varianza consiste en determinar si los efectos medios que producen los diferentes niveles se pueden considerar iguales. Es, en definitiva, un contraste de igualdad de medias donde se contrasta la hipótesis nula $H_0 : \alpha_1 = \alpha_2 = \dots \alpha_k$, siendo α_i el efecto medio que produce el i -ésimo nivel.

Para llevar a cabo dicho análisis se analiza la varianza de los datos disponibles en la tabla desde un doble punto de vista. Por un lado se calcula la varianza que hay DENTRO de cada nivel. Esta variabilidad en los datos se debe a características propias de los datos pero no a la diferencia entre los diferentes niveles ya que en este primer lado el análisis es dentro de cada nivel. En definitiva, esta variabilidad es puramente aleatoria, consecuencia de las diferentes características de los datos considerados. Por otro lado se analiza la variabilidad ENTRE los diferentes niveles. De existir una importante variabilidad entre estos niveles se considera que ésta es debida a los efectos diferenciadores que genera cada uno de los niveles. El análisis de la varianza consiste en realizar una comparación por medio de un estadístico entre ambas medidas de variabilidad y si la segunda (ENTRE grupos) es significativamente más alta que la primera (DENTRO de cada grupo) se podría afirmar que los

niveles han tenido efectos medios significativamente diferentes para los datos considerados (Pliego, 2011).

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Materiales

Se utilizó romero (*Rosmarinus officinalis L*) proveniente del distrito de Huanuara, localizada en la provincia de Candarave en la región Tacna, el muestreo se realizó de forma estratificada y aleatoria de las áreas de producción en estadios previos a la floración con un total de 9 kg, para el trabajo en laboratorio se usó 120 g por bandeja y se componen únicamente de hojas con una humedad de 53,31 %. El secador empleado consiste de cuatro partes, mostrados en la Figura 4, la primera sección genera el de flujo de aire y contiene un ventilador con control de velocidad, la segunda sección está compuesta de resistencias eléctricas que generan el calentamiento del aire de secado proveniente de la primera sección. La tercera parte es el tablero de mando donde se controla los parámetros. Finalmente, está la cabina donde se disponen 5 bandejas de secado conectado a una balanza de adquisición de datos, en general el sistema tiene puntos de medición temperatura de entrada y salida, humedad relativa de entrada y salida, así como anemómetros y ventana de inspección

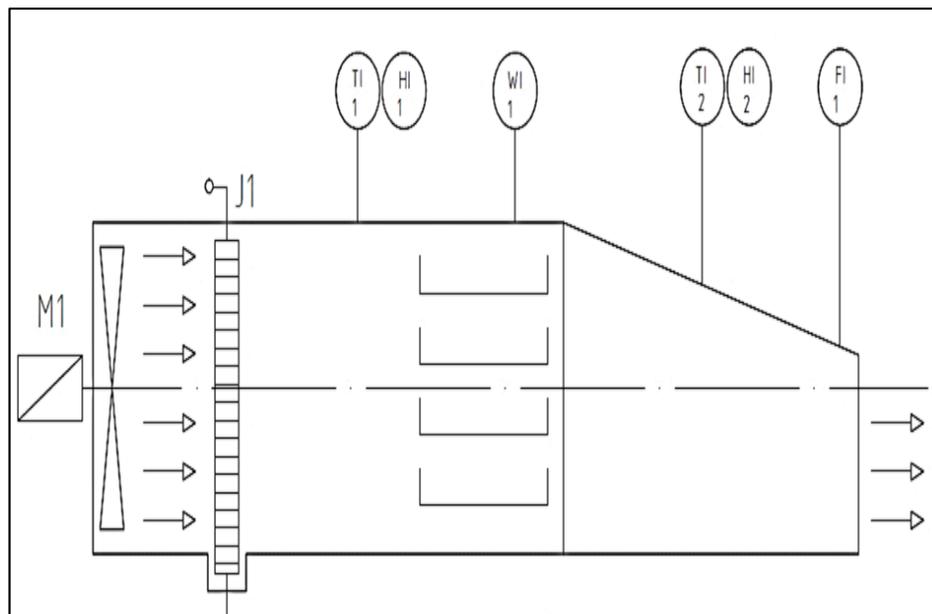


Figura 4. Esquema del secador de bandejas utilizado.

M1: Ventilador; J1: Resistencia; TI1: Temperatura de entrada; HI1: Humedad de entrada; TI2: Temperatura de salida; HI2: Humedad de salida; F1: Velocidad de viento.

Fuente: Cove, 2015.

El romero seco se envasó al vacío (25 g) en mangas de polietileno para su posterior evaluación de intensidad de color según la prueba de ordenamiento.

Para la hidratación de las hojas de romero seco, se emplearon 300 g de Cloruro de Magnesio ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), 300 g de Nitrito de Sodio (NaNO_2) y 200 g de Cloruro de Sodio (NaCl), las cuales se diluyeron con agua destilada a su máxima solubilidad y se colocaron en 3 desecadores. Las muestras (5 g) se ingresaron en platillos de aluminio. Se empleó una balanza electrónica de 200 g, $d=0,01$ g para el control de la masa de las muestras.

3.2 Métodos

Para el proceso de secado, las hojas de romero se disponen en 5 bandejas de 31 x 42 cm con un peso de 120 g, se realizaron 36 experimentos, variando las temperaturas del aire de secado en 40, 65 y 90 °C y las velocidades del aire en 0,5; 1,5 y 1,5 m/s. con un acomodo de diseño factorial de dos factores (temperatura y velocidad de aire) La determinación final del material durante el secado fue realizada por pérdida de la masa, registrando la variación de peso cada 60 minutos con una balanza acoplada al sistema de cabina. Este procedimiento fue repetido hasta que el material alcanzara un peso constante equivalente a la pérdida de peso cuando se determina la humedad del producto indicando de esta forma que había alcanzado la humedad de equilibrio. Los parámetros experimentales evaluados en el trabajo se analizaron mediante el ANOVA con un nivel de significación del 95 % ($p < 0.05$). El análisis de varianza se realizó con el paquete estadístico STATGRAPHICS centurión XVII.

Para la prueba de ordenamiento, las muestras de hojas secas de romero envasadas al vacío (9 muestras de 25 g), se disponen en una superficie blanca para su evaluación de intensidad de color, junto a una muestra patrón (hojas de romero fresca) y un formato de la prueba de ordenamiento, la valoración consistió en una escala de 1 a 9 puntos (1: colores más degradados, 9: colores más oscuros respecto a la muestra

patrón). Esta evaluación se repitió 15 veces. Los parámetros evaluados se analizaron con un gráfico de columnas.

En cuanto a la hidratación de las muestras secas, las isotermas de adsorción fueron determinadas 40, 65 y 90 °C, empleando el método gravimétrico recomendado por Ayala (2011), para ello se colocaron 5 gramos ($\pm 0,02$) de hojas deshidratadas de romero en placas de aluminio, las cuales fueron introducidas en recipientes cerrados herméticamente que contienen soluciones salinas saturadas. Se utilizaron tres soluciones salinas saturadas ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, NaNO_2 y NaCl) con actividades de agua que varían a diferentes temperaturas. Las muestras se pesaron periódicamente (cada 12 horas) hasta obtener peso constante con el propósito de asegurar el equilibrio de las muestras con las soluciones salinas. Las muestras fueron retiradas de los recipientes aproximadamente a las 2 semanas. El CHE (Coeficiente de Humedad en Equilibrio) se determinó por medio de un programa estadístico. Los experimentos de adsorción para cada temperatura se realizaron con tres replicas. Se determinó el modelo de ajuste para cada temperatura y su ecuación.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUCIONES

Los resultados obtenidos en las pruebas de secado de romero, con tres temperaturas y tres velocidades de viento se pueden apreciar en el anexo 1. Se podrá observar que al aumentar la temperatura y disminuir la velocidad de aire se reduce el tiempo de secado, esto ocurre por una combinación de dos factores, el primero un aumento en la temperatura de secado provoca un incremento en la temperatura del producto y en coeficiente de difusión del agua, consiguiendo que el tiempo de secado sea menor (Pineda & Cordero, 2009), estos resultados son similares a los obtenidos por Park & Reis (2002); Simal et al. (2005); Vega & lemus (2006) y Ocampo (2006) quienes trabajaron con otro tipo de frutas, hortalizas y cereales, así mismo si aumenta la temperatura, la humedad relativa también aumenta, por lo tanto el medio favorece la remoción de humedad (Bimbenet et al. 1985).

Esto ocurre por una combinación de dos factores, el primero un aumento en la temperatura de secado provoca un incremento en la temperatura del producto y en coeficiente de difusión del agua, el segundo porque al disminuir la velocidad de aire provoca un incremento en la temperatura del producto al disminuir la transferencia de calor del mismo; estos efectos de temperatura y velocidad de aire se pueden observar en la figura 5, 6 y 7.

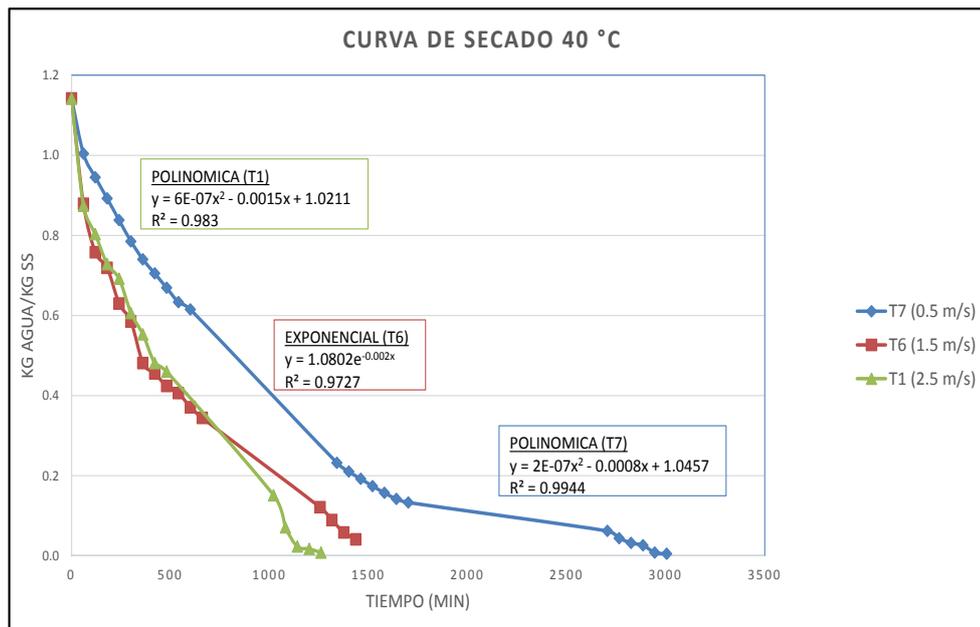


Figura 5. Efecto de la temperatura de 40 °C y velocidades de aire 0,5; 1,5 y 2,5 m/s sobre el tiempo de secado.

Fuente: Elaboración propia, 2016.

A una temperatura de 40 °C y velocidades de aire de 0,5 y 2,5 m/s la curva de secado que mejor ajusta son de tipo polinomial, con un coeficiente de determinación superior a 0,98 en ambos casos, sin embargo, a una velocidad de aire de 1,5 m/s la curva de secado que ajusta es exponencial, superior 0,97. Entonces, de acuerdo a la figura 5, la temperatura de 40 °C y las tres velocidades de aire tienen efectos significativos ($p < 0,05$) sobre el tiempo de secado, el aumento de la velocidad de aire significa la reducción del tiempo de secado. Este efecto es contrario a las temperaturas de trabajo de 65 °C y 90 °C, a continuación en la figura 6 se puede apreciar la curva de secado a 65 °C.

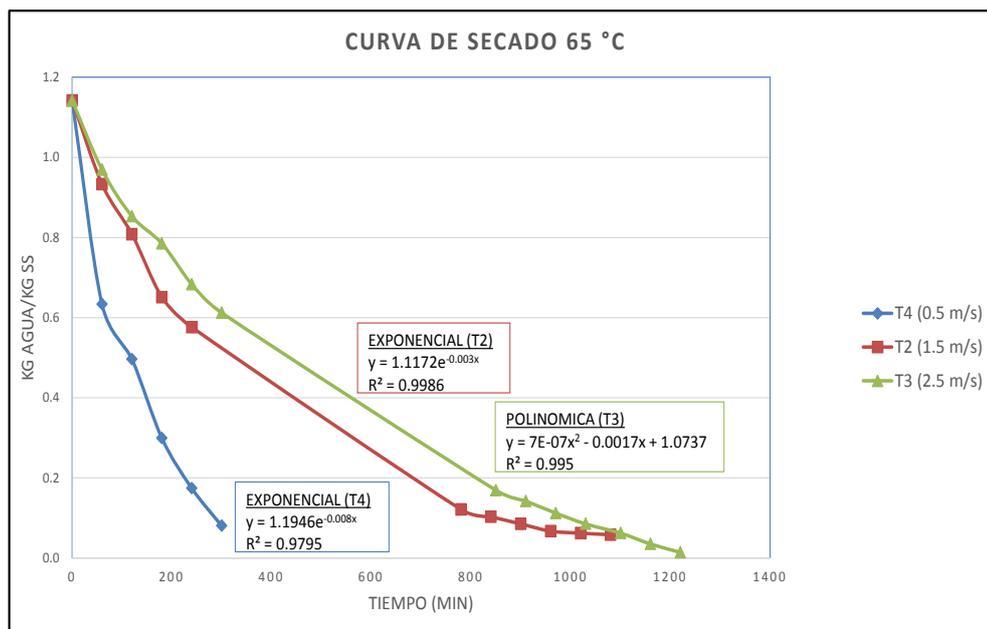


Figura 6. Efecto de la temperatura de 65 °C y velocidades de aire 0,5; 1,5 y 2,5 m/s sobre el tiempo de secado.

Fuente: Elaboración propia, 2016.

A una temperatura de 65 °C y velocidades de aire de 0,5 y 1,5 m/s la curva de secado que mejor ajusta son de tipo exponencial, con un coeficiente de determinación superior a 0,97 en ambos casos, sin embargo, a una velocidad de aire de 2,5 m/s la curva de secado que ajusta es polinomial, superior 0,99. Entonces, de acuerdo a la figura 6, la temperatura de 65 °C y las tres velocidades de aire tienen efectos significativos ($p < 0,05$) sobre el tiempo de secado, la disminución de la velocidad de aire significa la reducción del tiempo de secado. Este efecto es similar a una temperatura de trabajo de 90 °C, la cual se puede apreciar en la figura 7 que se presenta a continuación.

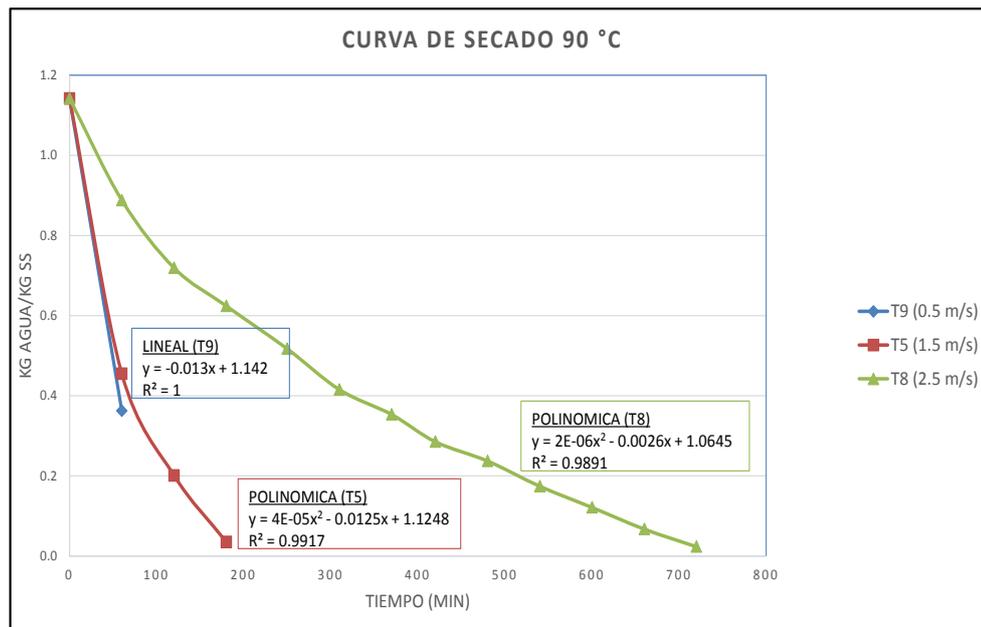


Figura 7. Efecto de la temperatura de 90 °C y velocidades de aire 0,5; 1,5 y 2,5 m/s sobre el tiempo de secado.

Fuente: Elaboración propia, 2016.

A una temperatura de 90 °C y velocidades de aire de 1,5 y 2,5 m/s la curva de secado que mejor ajusta son de tipo polinomial, con un coeficiente de determinación superior a 0,98 en ambos casos, sin embargo, a una velocidad de aire de 0,5 m/s la curva de secado que ajusta es lineal, igual a 1. Entonces, de acuerdo a la figura 7, la temperatura de 90 °C y las tres velocidades de aire tienen efectos significativos ($p < 0,05$) sobre el tiempo de secado, la disminución de la velocidad de aire significa la reducción del tiempo de secado.

En general, a temperaturas mayores y velocidades de aire menor se observa que la pendiente de la curva es más pronunciada, tal como se observa cuando se aplica temperaturas de 90 °C y velocidades de viento de 0,5 m/s; las curvas de deshidratación se ajustan mejor a modelos polinomiales (40 y 90 °C) con un coeficiente de determinación superior a 0,98 en ambos casos, seguido del modelo exponencial (65 °C) con un coeficiente de determinación superior a 0,97; sin embargo según Waeswsak et al. (2006) el modelo más comúnmente aplicado es el modelo de Newton que describe un decaimiento exponencial de la humedad en función del tiempo de secado, dicho modelo fue empleado entre otros para secado de culantro por Víquez (2001).

La cinética de deshidratación con esas características es explicada por Geankoplis (1998), quien afirma que materiales 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 vapor, lo que probablemente pasada la fase inicial súbita, se observa la disminución de la velocidad de secado debido al descenso de la difusividad del agua (McCabe (1991), citado por Pineda et al. 2009).

En la evaluación de la influencia de la temperatura y la velocidad de aire mostraron un efecto significativo ($p < 0,05$) sobre el tiempo

de secado, el aumento de la temperatura y la disminución de la velocidad de aire significa la reducción del tiempo de secado, de forma similar la interacción de dichos factores ($p < 0,05$) tal como se muestra en la tabla 3 y figura 8

Tabla 3. Análisis de varianza para tiempo de secado.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFECTOS PRINCIPALES					
A: Velocidad de aire	324565	2	162283	68.23	0.00
B: Temperatura	1.54E+07	2	7.72E+06	3244.06	0.00
INTERACCIONES					
AB	9.99E+06	4	2.50E+06	1050.32	0.00
RESIDUOS	64214	27	2378.29		
TOTAL (CORREGIDO)	2.58E+07	35			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual. Gl: Grados de libertad, Razón-F: Cociente de varianzas, Valor-P: Significación estadística.

Fuente: Elaboración propia, Statgraphic, 2016.

En la tabla ANOVA se puede observar que se ejecutó un análisis de varianza de dos factores (temperatura y velocidad de aire) para el Tiempo de secado. Se realizaron varias pruebas y gráficas para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre el Tiempo

de secado. Se escogió la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se midió eliminando los efectos de los demás factores. También se evaluó la significancia de las interacciones entre los factores. Las pruebas-F en la tabla ANOVA permiten identificar los factores significativos. Puesto que 3 valores-P son menores que 0,05; estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre el Tiempo de secado con un 95,0 % de nivel de confianza.

La tabla ANOVA indica que la temperatura (A) y la velocidad de aire (B) tienen un efecto significativo ($p < 0,05$) sobre el tiempo de secado, de forma similar la interacción de dichos factores (AB) ($p < 0,05$) como también se puede apreciar en la gráfica de interacciones de la figura 8.

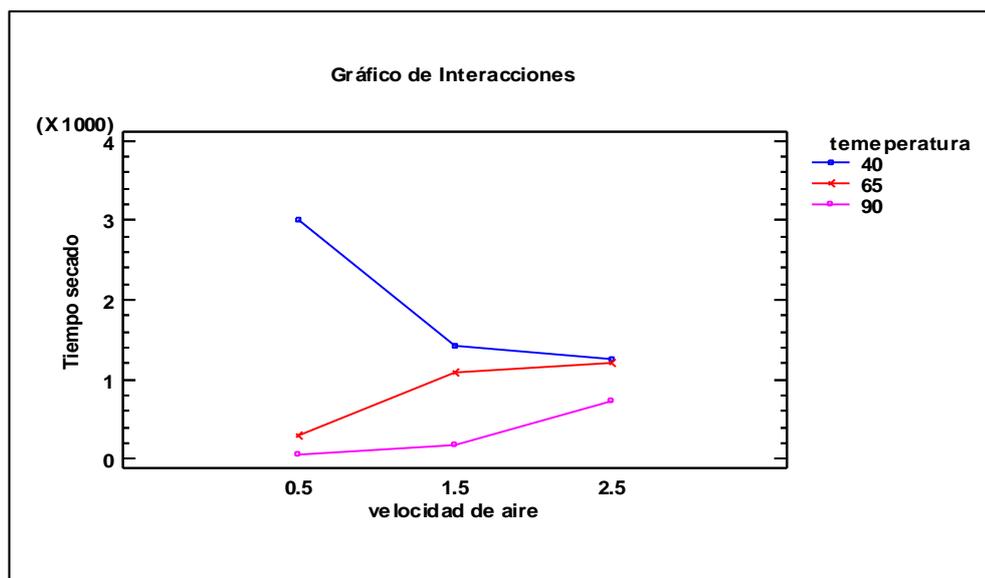


Figura 8. Efecto de la interacción de la temperatura y velocidad de aire sobre el tiempo de secado de hojas de romero.

Fuente: Elaboración propia, 2016.

Las temperaturas altas tienden a acelerar el tiempo de secado de hojas de romero, las velocidades de aire más bajas tienen un efecto similar, pero según la evaluación de intensidad de color de las hojas secas, se aprecia que a mayor temperatura y menos velocidad de aire las hojas obtienen menos puntuación, debido a un oscurecimiento de las mismas con respecto a la muestra patrón, como se puede apreciar en la tabla 4 y la figura 9.

Tabla 4. Valores promedio de color por ordenamiento de hojas secas de romero.

Temperatura (°C)	Velocidad de aire (m/s)	Puntuación*
40	0,5	5,00
40	1,5	3,73
40	2,5	9,00
65	0,5	3,40
65	1,5	6,73
65	2,5	6,80
90	0,5	1,00
90	1,5	2,00
90	2,5	7,67

(*) La valoración consiste en una escala de 1 a 9 puntos (1: colores más degradados, 9: colores más oscuros respecto a la muestra patrón).

Fuente: Elaboración propia, 2016.

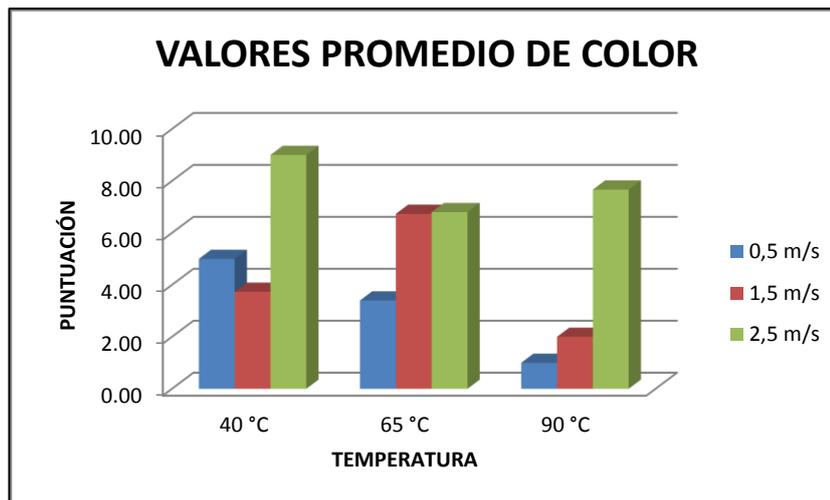


Figura 9. Puntuación promedio de color por ordenamiento de hojas secas de romero, según la temperatura y velocidad de aire de secado.

Fuente: Elaboración propia, 2016.

Se puede observar que velocidades de aire de 0,5 m/s tienen mejor efecto sobre el tiempo de secado para las tres temperaturas, pero las muestras secadas a menores velocidades de aire y mayores temperaturas (0,5 m/s y 90 °C), tuvieron un efecto negativo sobre el color del producto, resultando hojas deshidratadas con colores oscuros según se puede observar en la tabla 4 y figura 9, su explicación radicaría en que la clorofila sufre una degradación oxidativa formando compuestos pardos y oscuros, mientras las muestras sometidas a 65 °C perdieron color cambiando a tonos más claros, al respecto Schwartz et al. (1999), encontró que en kiwi deshidratado, la degradación de la clorofila fue directamente proporcional al aumento de temperatura, tal como se puede observar en la tabla 4, no obstante la puntuación otorgada para muestras deshidratadas a 65 °C y velocidad de aire

de 1,5 m/s en la prueba de ordenamiento cualitativo es la que mejor se aproxima a la muestra patrón (muestra fresca de romero). También se observó que ambos factores tienen efecto significativo sobre la degradación de color ($p < 0,05$), en pruebas de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes (LSD – Least Significant Difference), resulta mejor puntuadas las muestras secadas a 65 °C con un nivel de confianza de 95 %.

En cuanto a la hidratación de las muestras secas, las isothermas de adsorción fueron determinadas para 40, 65 y 90 °C, empleando el método gravimétrico recomendado por Ayala (2011), en la tabla 5, 6 y 7 se puede observar los modelos de adsorción empleados para el ajuste de las isothermas de humedad en hojas de romero deshidratado.

Tabla 5: Modelo de adsorción para ajuste de isoterma de humedad a 40 °C.

TEMPERATURA: 40 °C				
TRATAMIENTO	MODELOS	r	% RMS	ECUACION
1	HENDERSON	0.9656	1.54	$(1 - A_w) = \exp(-[B_2 * X^{B_1}])$
6	BET	0.9640	16.65	$A_w / [(1 - A_w) * X] = 1 / (X_m * C) + A_w(C - 1) / (X_m * C)$
7	HENDERSON	0.9695	0.32	$(1 - A_w) = \exp(-[B_2 * X^{B_1}])$

T1: 2,5 m/s; T6: 1,5 m/s; T7: 0,5 m/s.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo de adsorción para ajuste de isoterma de humedad a que mejor ajusta a 40 °C es el modelo de HENDERSON con 1,54 % RMS, del tratamiento 1 (2,5 m/s) y cuya ecuación es:

$$(1-A_w) = \exp(-[B_2 \cdot X^{B_1}])$$

Tabla 6: Modelo de adsorción para ajuste de isoterma de humedad a 65 °C.

TEMPERATURA: 65 °C

TRATAMIENTO	MODELOS	r	% RMS	ECUACION
2	BET	0.9558	18.35	$A_w / [(1-A_w) \cdot X] = 1 / (X_m \cdot C) + A_w(C-1) / (X_m \cdot C)$
3	HENDERSON	0.9654	1.23	$(1-A_w) = \exp(-[B_2 \cdot X^{B_1}])$
4	BET	0.9644	16.78	$A_w / [(1-A_w) \cdot X] = 1 / (X_m \cdot C) + A_w(C-1) / (X_m \cdot C)$

T2: 1,5 m/s; T3: 2,5 m/s; T4: 0,5 m/s.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo de adsorción para ajuste de isoterma de humedad que mejor ajusta a 65 °C es el modelo de HENDERSON con 1.23 % RMS, del tratamiento 3 (2,5 m/s) y cuya ecuación es:

$$(1-A_w) = \exp(-[B_2 \cdot X^{B_1}])$$

Tabla 7: Modelo de adsorción para ajuste de isoterma de humedad a 90 °C.

TEMPERATURA: 90 °C

TRATAMIENTO	MODELOS	r	% RMS	ECUACION
5	BET	0.9598	18.83	$A_w / [(1-A_w) \cdot X] = 1 / (X_m \cdot C) + A_w(C-1) / (X_m \cdot C)$
8	BET	0.9618	16.92	$A_w / [(1-A_w) \cdot X] = 1 / (X_m \cdot C) + A_w(C-1) / (X_m \cdot C)$
9	HENDERSON	0.9648	1.29	$(1-A_w) = \exp(-[B_2 \cdot X^{B_1}])$

T5: 1,5 m/s; T8: 2,5 m/s; T9: 0,5 m/s.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo de adsorción para ajuste de isoterma de humedad que mejor ajusta a 90 °C es el modelo de HENDERSON con 1,29 % RMS, del tratamiento 9 (0,5 m/s) y cuya ecuación es:

$$(1-A_w) = \exp(-[B_2 \cdot X^{B_1}])$$

En general el mejor modelo de adsorción empleado para el ajuste de isotermas de humedad, fue el modelo de HENDERSON, con el mejor ajuste a 1,29 % RMS (T9: 90 °C y 0,5 m/s) y el producto estabiliza a 0,573 de actividad de agua.

CAPITULO V

CONCLUSIONES

- 5.1 Las condiciones de secado (temperatura y velocidad de aire) presentan un efecto significativo ($p < 0,05$) sobre la deshidratación de las hojas de Romero (*Rosmarinus officinalis*), con un 95 % de nivel de confianza, es decir, al aumentar la temperatura y disminuir la velocidad de aire se reduce el tiempo de secado, de forma similar la interacción de dichos factores ($p < 0,05$).
- 5.2 A temperaturas mayores y velocidad de viento menor se observa que la pendiente de la curva es más pronunciada, tal como se observa a temperaturas de 90 °C y velocidades de aire de 0,5 m/s, las curvas se ajustan mejor a modelos polinomiales, superior a 0,98; seguido del modelo exponencial, superior a 0,97.
- 5.3 Las temperaturas altas tienen mejor efecto ($P < 0,05$) en el tiempo de secado, pero con velocidades de aire bajas (0,5 m/s y 90 °C) tienen efectos negativos en sobre el color del producto (colores oscuros), por lo tanto según la prueba de ordenamiento cualitativo, la temperatura adecuada para la deshidratación de hojas de romero es 65 °C.
- 5.4 Las velocidades de aire bajas tienen mejor efecto sobre el tiempo de secado, sin embargo, las muestras secadas a temperaturas altas

presentan oscurecimiento (0,5 m/s y 90 °C), por lo tanto, según la prueba de ordenamiento cualitativo, la velocidad de aire adecuada para la deshidratación de hojas de romero es 1,5 m/s con una temperatura de 65 °C.

- 5.5** En términos de estabilidad respecto a la actividad de agua, el producto se estabiliza a 0,573 de actividad de agua bajo un tratamiento de 90 °C y 0,5 m/s de flujo de aire.

CAPITULO VI

RECOMENDACIONES

- 6.1 Estudiar el comportamiento de los parámetros de calidad de las hojas deshidratadas de romero entre temperaturas de 40 y 65 °C y velocidades de aire entre 0,5 y 1,5 para determinar con mayor exactitud las variables adecuadas para la deshidratación de hojas de romero.
- 6.2 Deshidratar hojas de romero a 65 °C con un flujo de aire de 1,5 m/s, las cuales son variables adecuadas según el presente trabajo de investigación.
- 6.3 Estudiar otras características organolépticas del romero, con variables similares al presente trabajo, para definir su efecto frente a derivados del romero, como por ejemplo el aceite de romero.
- 6.4 Evaluar algunos tratamientos post-cosecha para las hojas de romero antes del secado por bandejas y facilitar el proceso tecnológico.
- 6.5 Realizar una evaluación económica para conocer la viabilidad financiera de montar una planta productora de hojas de romero deshidratado por medio del secador de bandejas.

CAPITULO VII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arango, M. (2004). *Plantas medicinales: botánica de interés médico*.

Recuperado de:

[https://books.google.com.pe/books?id=fefaqvwHHoYC&pg=PA283&](https://books.google.com.pe/books?id=fefaqvwHHoYC&pg=PA283&dq=ROMERO+Rosmarinus+officinalis&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjw7quz_cLJAhWMWh4KHWl4Av0Q6AEIGjAA#v=onepage&q&f=true)

[dq=ROMERO+Rosmarinus+officinalis&hl=es-](https://books.google.com.pe/books?id=fefaqvwHHoYC&pg=PA283&dq=ROMERO+Rosmarinus+officinalis&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjw7quz_cLJAhWMWh4KHWl4Av0Q6AEIGjAA#v=onepage&q&f=true)

[419&sa=X&ved=0ahUKEwjw7quz_cLJAhWMWh4KHWl4Av0Q6A](https://books.google.com.pe/books?id=fefaqvwHHoYC&pg=PA283&dq=ROMERO+Rosmarinus+officinalis&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjw7quz_cLJAhWMWh4KHWl4Av0Q6AEIGjAA#v=onepage&q&f=true)

[EIGjAA#v=onepage&q&f=true](https://books.google.com.pe/books?id=fefaqvwHHoYC&pg=PA283&dq=ROMERO+Rosmarinus+officinalis&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjw7quz_cLJAhWMWh4KHWl4Av0Q6AEIGjAA#v=onepage&q&f=true)

Ayala A. (2011). *Estimacion de la isothermas de adsorción y el calor isotérmico en harina de yuca*. Escuela de Ingeniería de alimentos, Universidad del Valle. Cali, Colombia.

Barbosa C. & Vega M. (2000). *Deshidratación de alimentos*. Zaragoza, España. ACRIBIA, SA.

Bimbenet, J., Daudin, J. & Wolff E. (1985). *Cinética de aire de secado de partículas biológicas*. En proceeding Fourth International Drying Symposium, Kyoto. Washington, Dc. 178-185 p.

CLAS C.S. (1961). *Candarave*. Perú.

Claude R. (2004). *Reología y análisis de la textura de los alimentos*. Zaragoza, España. ACRIBIA S.A.

COVA. (2015). *Manual de operación: Secador de bandejas (edición noviembre 2105)*. Perú.

Dirección de Estadística agraria, Dirección Regional Agricultura, Región Tacna. (2014). *Región Tacna: Estadística agropecuaria 2014 (enero – setiembre)*. Tacna, Peru.

Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Privada de Tacna. *Guía de práctica: Secado de sólidos*. Tacna, Perú.

Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Privada de Tacna. *Guía de práctica: Secado de sólidos por lotes curvas de velocidad de secado*. Tacna, Perú.

Geankoplis, c. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. Tercera edición. Cecs, México, D.F. 1008 p.

González M., Cruz F. & Vega M. (2013). *Guía técnica del cultivo de romero (Rosmarinus officinalis)*. México. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

- Green, A. (2007). *El libro de las especias: Hierbas aromáticas y especias*. España. Robinbook.
- Ibarz A. & Barboza-Canovas G. (2005). *Las operaciones de ingeniería de alimentos*. Edicion Mundi Prensa. España.
- López P., Virseda P. & Abril J. (1995). *Modelización de la cinética de secado de patata cortada en láminas*. En *Alimentaria, certificación de la calidad*. Navarra, España.
- Michalewicz J., Henriquez J. & Charamba J. (2011). *Secado de Cajuil (anacardium occidentale l.): Estudio Experimental y Modelado de la Cinética de Secado*. *Información tecnológica*, 22 (6), 63-74.
- Ocampo A. (Junio 2006). *Modelo cinético del secado de la pulpa de mango*. *Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia)*, 5, 119-128 p.
- Park, Z., Vohnikova & Reis F. (2002). *Evaluación de parámetros de secado e isotermas de desorción en hojas de menta (Mentha crispa L.)*. En *Journal of Food Engineering*: 51, 193-199 p.

- Pineda C., Chacón V. & Cordero G. (2009). *Efecto de las condiciones de secado sobre la cinética de deshidratación de las hojas de morera (Morus alba)*. *Agronomía Mesoamericana*, 20(2), 275-283 p.
- Pliego, F. (2011). *Diccionario de Estadística Económica y Empresarial*, Volumen 9. Editorial de economía, 2011. Cristo, 3 – 28015. Madrid, España. 10 p.
- Romero, M. (2004). *Plantas aromáticas: Tratado de aromaterapia científica. Primera edición*. Buenos Aires. Kier. Argentina.
- Ross, S. (2005). *Introducción a la estadística. Segunda edición*. Editorial Reverté S.A. 08029 Barcelona, España. 3 p.
- Rivsi S. & Mittal G. (1992). *Métodos experimentales en ingeniería de alimentos*. Van Nostrand. Reinhol, Nueva York, Estados Unidos.
- Simal, S., Femenia, A., Garau, M. C., & Rosselló, C. (2005). *Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit*. *Journal of Food Engineering*, 66(3), 323-328 p.
- Strumillo,C., & Kudra, T. (1989). *Drying: Principles, Applications and Design*, 1ª ed., v.3, Gordon and Breach Sciences Publishers, London.

Schwartz, M.; Hugo, N.K.; Ana Maria M.A. (1999). *Efecto de la temperatura de concentración de pulpa de kiwi sobre el color, clorofila y ácido ascórbico*. Órgano Oficial de la Sociedad Latinoamericana de Nutrición, 49 p.

Vega, A. A., & Lemus, R. A. (2006). *Modelado de la cinética de secado de la papaya chilena (Vasconcellea pubescens)*. Información tecnológica, 17(3), 23-31 p.

Viquez, JF. (2001). *Determinación de las condiciones adecuadas para el secado de culantro (Coriandrum sativum L.) con aire caliente*. Tesis Lic. Tecnología de Alimentos. Escuela de Tecnología de Alimentos, Universidad de Costa Rica. San José. 94 p.

CAPITULO VIII

ANEXOS

Anexo 1. Condiciones de temperatura y velocidad de aire sobre el tiempo de secado.

Nº muestra	Bloque	Temperatura °C	Velocidad de aire m/s	Tiempo (min)
1	1	40	0,5	3042,36
2	2	40	0,5	2935,61
3	3	40	0,5	3042,36
4	4	40	0,5	2988,99
5	1	40	1,5	1476,84
6	2	40	1,5	1501,46
7	3	40	1,5	1476,84
8	4	40	1,5	1279,93
9	1	40	2,5	1159,65
10	2	40	2,5	1315,75
11	3	40	2,5	1315,75
12	4	40	2,5	1248,85
13	1	65	0,5	267,77
14	2	65	0,5	292,56
15	3	65	0,5	292,56
16	4	65	0,5	347,11
17	1	65	1,5	1092,75
18	2	65	1,5	1056,32
19	3	65	1,5	1074,54
20	4	65	1,5	1092,75
21	1	65	2,5	1245,77
22	2	65	2,5	1181,34
23	3	65	2,5	1224,30
24	4	65	2,5	1224,30
25	1	90	0,5	56,62
26	2	90	0,5	60,55
27	3	90	0,5	60,55
28	4	90	0,5	62,12
29	1	90	1,5	167,59
30	2	90	1,5	173,79
31	3	90	1,5	183,10
32	4	90	1,5	195,92
33	1	90	2,5	728,80
34	2	90	2,5	728,80
35	3	90	2,5	728,80
36	4	90	2,5	691,10

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2. Figuras del proceso de secado, prueba de ordenamiento cualitativo e hidratación.



Recepción y deshojado de romero fresco (a).



Introducción de bandeja a secador de bandejas (b).



Tablero de control del secador de bandejas (c).



Muestras deshidratadas, prueba de ordenamiento cualitativo (d).



Hidratación de muestras secas (e)

Anexo 3. Formato de ficha de secado de romero

SECADO DE ROMERO

TRATAMIENTO Nº ____ VARIABLES: TEMPERATURA : 40 °C
 VELOCIDAD DE AIRE : 2,5 m/s

MUESTREO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FECHA										
HORA										
Humedad Entrada (%)										
Humedad Salida (%)										
Temperatura Entrada (°C)										
Temperatura Salida (°C)										
Velocidad de Aire (m/s)										
T1 - M1										
Peso Subtotal (g)										
Peso Muestra (g)										
Peso Subtotal (g)										
T1 - M2										
Peso Muestra (g)										
Peso Subtotal (g)										
T1 - M3										
Peso Muestra (g)										
Peso Subtotal (g)										
T1 - M4										
Peso Muestra (g)										
Peso Subtotal (g)										
Peso promedio total										
<i>Pérdida Peso promedio total</i>										

Fuente: Elaboración propia, 2016.

Anexo 4. Formato de ficha de hidratación de muestras secas.

HIDRATACION PARA DETERMINACION DE AW					
TRATAMIENTO N° 7 (T7)		VARIABLES:		TEMPERATURA : 40 °C	
				VELOCIDAD DE AIRE : 0,5 m/s	
N° PESADO	FECHA	HORA	TIPO DE SAL		
			Cloruro de Magnesio Mg Cl ₂ 6H ₂ O	Nitrito de Sodio NaNO ₂	Cloruro de Sodio NaCl
Peso platillo de aluminio :					
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					
30					
31					
32					
33					
34					
35					
36					
37					
38					
39					
40					

Anexo 6. Solubilidad de sales

SOLUBILIDAD DE SALES		
SALES	SOLUBILIDAD APROXIMADA EN AGUA CALIENTE (g/100 ml)	HUMEDAD RELATIVA (%) A 20 °c
LiBr (Bromuro de Litio)	240	7
LiCl H ₂ O (Cloruro de Litio)	100	11
KC ₂ H ₃ O ₂ (Acetato de potasio)	500	22
MgCl ₂ 6H ₂ O (Cloruro de magnesio)	300	33
KCO ₃ (Carbonato de potasio)	150	43
Na ₂ Br 2H ₂ O (Bromuro de sodio)	120	58
NaNO ₂ (Nitrito de sodio)	150	65
NaCl (Cloruro de sodio)	40	75
KCl (Cloruro de potasio)	50	85
BaCl (Cloruro de bario)	50	90
K ₃ SO ₄ (Sulfato de potasio)	20	97

Fuente: Laboratorio de Química – UPT, 2016.