

Efecto de la temperatura y velocidad del aire sobre la humedad final de tomillo (*Thymus vulgaris*)

Effect of temperature and air speed on the final humidity of thyme (*Thymus vulgaris*)

Efeito da temperatura e velocidade do ar na umidade final de tomilo (*Thymus vulgaris*)

CARLOS OSVALDO VELÁSQUEZ-SANTOS¹, JULIÁN ALBERTO URIBE-GÓMEZ²

RESUMEN

El tomillo (Thymus vulgaris) es una planta utilizada en medicina tradicional. Sus propiedades, se deben a su aceite esencial. Es importante destacar que el timol, el aceite esencial y la hoja seca, están catalogados por la FDA de los EEUU como aditivos alimentarios aptos para el consumo humano. El artículo muestra los resultados para el proceso de secado del tomillo, cuyo objetivo principal es establecer la incidencia de la temperatura y velocidad del aire sobre el contenido de humedad final, eligiendo el rango óptimo de secado. Se utilizaron dos métodos para determinar la densidad del tomillo, el primero fue por desplazamiento en probeta, el segundo por destilación azeotrópica, encontrándose que el mas recomendado es este último. Se determinó por el segundo método la humedad en base húmeda, la cual fue del 80%. Por otro lado, mediante un diseño experimental por superficie de respuesta, se encontró que

Recibido para evaluación: 15 de Julio de 2018.

Aprobado para publicación: 7 de Diciembre de 2018.

- 1 Instituto Tecnológico Metropolitano, Facultad de Ingenierías. Magister en Gestión Energética Industrial. Medellín, Colombia.
- 2 Instituto Tecnológico Metropolitano, Facultad de ciencias económicas y administrativas. Magister en Gestión Tecnológica. Medellín, Colombia.

Correspondencia: julianuribe@itm.edu.co

la temperatura se presenta como el factor más significativo sobre la humedad final del tomillo con valor $p=0,0124$ con un nivel de significancia del 90%. A las condiciones de temperatura halladas se observa que el mejor caudal se ajusta a la región entre 2050 - 2100 rpm, que corresponden con la mejor región de temperaturas de 52- 53°C.

ABSTRACT

Thyme (*Thymus vulgaris*) is a plant used in folk medicine. Its properties, are due to its essential oil. It is important to note that thymol, essential oil and dried leaf are classified by the US FDA as food suitable for human consumption. The article shows the results for the drying process of the thyme, whose main objective is to establish the incidence of the temperature and air speed on the final humidity, choosing the optimum drying range. Two methods were used to determine the density of thyme, the first was by displacement in a test tube, the second by azeotropic distillation, finding that the most recommended is the latter one. The wet method was determined by the second method, which was 80%. On the other hand, by means of an experimental design by response surface, it was found that temperature is the most significant factor on the final moisture of thyme with p -value = 0,0124 with a level of significance of 90%. To the temperature conditions found, it is observed that the best flow rate is adjusted to the region between 2050 - 2100 rpm, which corresponds to the best temperature region of 52-53°C.

RESUMO

Tomilho (*Thymus vulgaris*) é uma planta utilizada na medicina popular. Suas propriedades, são devido ao seu óleo essencial. É importante notar que o timol, o óleo essencial e as folhas secas são classificados pela US FDA como alimento adequado para consumo humano. O artigo mostra os resultados para o processo de secagem do tomilho, cujo objetivo principal é estabelecer a incidência da temperatura e da velocidade do ar na umidade final, escolhendo a faixa ótima de secagem. Dois métodos foram usados para determinar a densidade do tomilho, o primeiro foi por deslocamento em um tubo de ensaio, o segundo por destilação azeotrópica, descobrindo que o mais recomendado é o último. O método úmido foi determinado pelo segundo método, que foi de 80%. Por outro lado, por meio de um planejamento experimental por superfície de resposta, verificou-se que a temperatura é o fator mais significativo na umidade final do tomilho com Valor- p = 0,0124 com um nível de significância de 90%. Às condições de temperatura encontradas, observa-se que a melhor vazão é ajustada para a região entre 2050 - 2100 rpm, o que corresponde à melhor região de temperatura de 52-53°C.

PALABRAS CLAVE:

Deshidratado, Caudal, Superficie de Respuesta, Especia.

KEYWORDS:

Dehydrated, Caudal, Response Surface, Spice.

PALAVRAS-CHAVE:

Desidratado, Caudal, Superfície de Resposta, Especiaria.

INTRODUCCIÓN

El tomillo es una planta aromática ampliamente utilizada como digestiva y medicinal durante mucho tiempo. Comúnmente utilizada en cocina tradicional mediterránea, también es útil para infusiones, y tratamientos de artritis, reumatismo e infecciones de pecho [1]. Es una planta con gran aceptación, originaria en la península ibérica y del norte de África, donde se comercializan sus derivados como lo son extractos, aceites y hojas [2]. Al igual que otras plantas aromáticas como la albahaca, el romero y el orégano, el tomillo es una especie muy comercializada, donde el 75% de las exportaciones van dirigidas a mercados ubicados en Estados Unidos, Inglaterra y Canadá, principalmente para fines culinarios. En Colombia existen aproximadamente 400 especies de plantas aromáticas y medicinales, con un crecimiento proyectado del 8% en la producción nacional. [3]

La deshidratación ha sido un método primario para la preservación de los alimentos a largo plazo, hasta que en épocas recientes se desarrollaron métodos de congelación, principalmente la deshidratación como proceso ha consistido en exponer el alimento al sol debajo de un lienzo plástico sobre un área cementada durante 4 días, volteando el material para garantizar un secado armonizado y evitar su fermentación [4], esto se ha llevado a cabo para la preservación de los granos, sin embargo, la práctica se ha extendido a otros tipos de alimentos [5]. El proceso de deshidratación ha permitido crear productos atractivos para el mercado tanto de consumo humano como animal, en el cual el producto obtenido conserva sus propiedades naturales lo que lo hace atractivo para el consumidor y en especial el impacto sobre su salud [6].

La deshidratación y sus métodos se han llevado a cabo para preservar la vida útil del producto, impactando principalmente en las etapas finales de la cadena de suministros de alimentos como almacenamiento, procesamiento, distribución y consumo, por lo tanto, las operaciones de deshidratado facilitan la preservación y el manejo de los alimentos, reduce el transporte y los costos de almacenamiento a través de la reducción de la densidad del material alimenticio [7].

Muchos estudios se han llevado a cabo para evaluar el efecto de los tratamientos de secado y deshidratación sobre plantas aromáticas [8], sin embargo, este artículo se centra en aplicar el proceso de deshidratación y el estudio de los efectos de 2 fuentes de variación de un secador para plantas medicinales [9], el cual permite procesar

productos como el tomillo, el orégano, la menta piperita, la albahaca, el estragón y otras plantas aromáticas y de condimento. En la mayoría de los casos, la deshidratación involucra la aplicación de diferentes condiciones de temperatura, la cual, si no es correctamente aplicada puede causar un daño irreversible [10] a la materia prima alimenticia y por lo tanto pérdidas económicas.

El secador ha sido modificado, implementándole un variador de velocidad marca General Electric Modelo AF 300 Mini para 2 kW de potencia y un Motor trifásico marca Baldor de 0,5 Hp (Caballos de fuerza), el cual posibilita variar la velocidad del motor, en este caso las revoluciones por minuto (RPM), esta adición permite regular el caudal de secado del ventilador, esto con el fin de encontrar el rango del caudal óptimo de secado y la temperatura. Con la reducción de la cantidad de agua disponible, hasta niveles seguros para almacenamiento se reducirá la actividad del agua y la velocidad de las reacciones químicas en el producto, así como el desarrollo de microorganismos. El alto contenido en agua en las células y tejidos de las plantas, en torno al 60-80%, hacen que el secado tenga una importancia fundamental para evitar la fermentación o degradación de los principios activos [11], así como también prevenir el crecimiento de bacterias, hongos e insectos que requieren de agua para iniciar su actividad metabólica [5].

La hipótesis principal a probar es como la temperatura y el caudal afectan de manera estadísticamente significativa la humedad final del tomillo. Existen referentes teóricos que indican de manera cualitativa que el tiempo de secado depende del flujo del aire, la temperatura y la humedad relativa del aire, es decir, de las condiciones de operación del proceso de secado [8]. Cuanto mayor es la temperatura y mayor flujo de aire, más rápido es el secado [12]. La temperatura de secado es determinada por la sensibilidad de los principios activos de la planta, por lo tanto, para cada especie, existe una temperatura ideal de secado. Las principales ventajas de realizar el secado son: la facilidad de conservación del producto hasta la estabilidad de los componentes aromáticos a temperatura ambiente durante un largo tiempo, la protección contra la degradación oxidativa y enzimática, reducir el peso y tamaño, no tener que refrigerarlo durante el transporte y almacenamiento y la disponibilidad del producto durante todas las épocas del año [13]. Finalmente, objetivo principal de este trabajo de investigación es establecer la incidencia de la temperatura y velocidad del aire sobre el contenido de humedad final, eligiendo el rango óptimo de secado.

MÉTODO

Determinación de la densidad del tomillo

Para determinar la densidad del tomillo, se utilizaron dos procedimientos, el primero consiste en determinar la densidad por desplazamiento en probeta de 100 mL de un objeto como es el tomillo que está previamente pesado en balanza electrónica marca OHAUS de 0,001 g de precisión, con la lectura del desplazamiento y el peso del tomillo, se calcula la densidad.

El segundo procedimiento para determinar la densidad del tomillo se basa en realizar una destilación azeotrópica, la cual consiste en colocar la muestra de tomillo en un volumen de benceno, luego se procede a destilar, el producto obtenido de la destilación se lee mediante un balón o probeta adecuados y con este volumen se calcula la densidad del tomillo.

Determinación del porcentaje de humedad en base húmeda del tomillo

Para determinar el porcentaje de humedad de la muestra se utilizó el método gravimétrico indirecto por desecación con estufa, que consiste en determinar la humedad en base húmeda de la muestra por calentamiento a 105°C.

Se pesó una muestra de tomillo en una balanza analítica marca OHAUS, con una resolución de 0,001 g, el peso fue de 30,55 g, se calentó la muestra por 4 horas a 105°C, hasta que diera peso constante, el cual fue de 5,6028 g, con este valor y el del peso inicial de la muestra se calculó el porcentaje de humedad de la muestra el cual fue del 81,66% de humedad en base húmeda.

El método de destilación azeotrópica, se basa en la destilación simultánea con un líquido inmiscible en proporciones constantes. es el más adecuado para especias como el tomillo, Para el caso en particular, la asociación americana de comercio de especias, en sus métodos oficiales analíticos recomienda el uso del Benceno en lugar del tolueno.

Siguiendo el procedimiento se tomó una cantidad de 100 mL de benceno cuyo punto de ebullición es de 80°C, se vertió en la muestra de 30,55 g, luego se realizó el proceso de destilación, y se recolectó el volumen de líquido destilado. Se calculó la humedad en base húmeda del tomillo, la cual fue del 80%.

Realización pruebas de secado

Para realizar las pruebas de secado, se dispuso de suficiente material a deshidratar como es el tomillo, luego se procedió a pesar la bandeja de secado vacía y luego con el tomillo, luego se colocaron las bandejas de secado dentro de la cámara de secado y se procedió al deshidratado del tomillo, para ello se seleccionaron intervalos de tiempo de 1 hora, para ir pesando cada hora las tres bandejas de secado. Se anotó cada hora el peso, la temperatura ambiente, la humedad relativa y el flujo de gas consumido por el prototipo. Con estos datos se realizaron las tablas y las curvas de secado en el programa de Excel, dando como resultado las curvas de deshidratado del tomillo.

Aplicación del modelo estadístico

Para probar la hipótesis propuesta en la introducción de este artículo, se hará uso del diseño experimental factorial y el análisis pro metodología de superficie de respuesta (MSR), para validar la significancia y los efectos de la velocidad y la temperatura sobre la humedad, para eso se tabularon los datos en una hoja electrónica de Microsoft Excel© y el análisis de datos se llevó a cabo mediante el paquete estadístico Statgraphics Centurion v15.1 (Statpoint, USA).

El cuadro 1 presenta el número de muestras requeridas para llevar a cabo el diseño experimental, donde el test estadístico a utilizar será ANOVA de efectos fijos con interacción, donde se requiere calcular el tamaño de la muestra dada una probabilidad de error α , para esto se utiliza el software G*Power Universidad Dusseldorf, Alemania [14].

Cuadro 1. Muestras requeridas para el diseño experimental. [15]

A priori: Tamaño de muestra requerida		
Entradas:	Tamaño del efecto	0,25
	α probabilidad de error	0,1
	Power (1- β err prob)	0,9
	Numerador df	1
	Número de grupos	2
Salidas:	Parámetro de no centralidad λ	8,68
	F crítico	2,74
	Denominador df	137
	Tamaño de muestra total	139
	Power real	0,901

Muestras experimentales

En Colombia, en la región de Antioquia, las muestras experimentales de Tomillo fueron suministradas por la Asociación de Productores de Plantas Aromáticas del Municipio de Cocorná (APAMCA), lugar en el cual fueron proporcionadas 285 muestras para la experimentación.

Metodología de Superficie de Respuesta (MSR)

La Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) o *Response Surface Methodology (RSM)* es una colección de técnicas matemáticas y estadísticas útiles para el desarrollo, mejoramiento y optimización de procesos. Es también importante en aplicaciones para el diseño, desarrollo y formulación de nuevos productos, así como también el mejoramiento de los ya existentes. Las aplicaciones más conocidas de las técnicas de RSM están en el área industrial, particularmente en situaciones donde muchas variables pueden influenciar un resultado cualitativo o cuantitativo llamado "respuesta". Las variables de entrada son conocidas como "variables independientes" y están bajo el control del técnico o investigador. La técnica se desarrolla en cuatro etapas:

1. Los factores críticos que son importantes en el estudio o proceso son identificados.
2. Se ha establecido un área o nivel de aplicación de los factores involucrados.
3. Son efectuados diseños experimentales específicos.
4. Los resultados de los diseños son analizados por RSM e interpretados.

Por lo tanto, la RSM permite:

- Mapeo de una superficie dentro de la región explorada.
- Escoger las condiciones de operación para obtener una respuesta específica.
- Buscar las condiciones óptimas, o por lo menos, las mejores condiciones en la región de interés [16-18].

Diseño Central Compuesto Rotable (DCCR)

El diseño DCCR fue propuesto por Box y Wilson (1951) como una alternativa al diseño factorial 3^k , básicamente consiste de un núcleo factorial 2^k , cuyos niveles de los

factores se codifican con +1 y -1, así como niveles que pueden variar de acuerdo al número de factores a evaluar y garantiza además, una propiedad estadística de rotabilidad. El diseño de experimentos planteado en este estudio es un diseño DCCR o factorial completo. Este diseño experimental fue esencial para realizar los ensayos, ya que permitió obtener información confiable para extraer conclusiones. La evaluación de la influencia de las variables fue realizada con un diseño de experimentos factorial completo, según se observa en el cuadro 2.

Se realizaron experimentos de secado siguiendo el diseño factorial completo con dos niveles en dos variables independientes (temperatura del aire y caudal, es decir, variable indirecta de la velocidad del aire en el lecho o ducto del secador), según se observa en el cuadro 3.

Cuadro 2. Diseño experimental factorial completo 2^2 para secado de tomillo.

Ensayo	Q*	T*	Q*	T*
	(rpm)	(°C)	(rpm)	(°C)
1	-α	0	1517,16	45
2	1	1	2000	50
3	0	-α	1800	37,93
4	0	0	1800	45
5	0	+α	1800	52,07
6	+α	0	2082,84	45
7	-1	1	1600	50
8	1	-1	2000	40
9	0	0	1800	45
10	-1	-1	1600	40

Nota: Las letras T* indica Temperatura y Q* indica Caudal.

Cuadro 3. Variables independientes y niveles utilizados en el diseño experimental factorial completo.

VI	Niveles				
	-α**	-1	0	1	+α**
T	37,93	40	45	50	52,07
Q*	1517,16	1600	1800	2000	2082,84

*Para cada rpm se calculó su respectivo valor de velocidad del aire en m/s.

**El nivel $\pm\alpha$ se calculó como: $\pm\sqrt[n]{(n * \ln 2)}$

Donde n es el número de variables o factores independientes. En este estudio el valor es de $\pm 1,41$.

Nota: La sigla VI indica variable independiente.

T=Temperatura nominal del aire (°C)

Q*=Caudal (rpm)

La determinación de los niveles de cada variable independiente fue realizada de acuerdo con las posibles condiciones del proceso, las cuales son limitadas por los equipos. El caudal del aire depende de la velocidad del motor, cuyo límite máximo es 3600 rpm.

Luego de efectuar la primera secuencia de secado de tomillo en función de los factores implicados (humedad y caudal) se procede a plantear un segundo diseño de experimentos factorial completo de tipo DCCR con el fin de observar una mejora en las condiciones de operación para el secado, en función de la humedad final del producto. La segunda secuencia o etapa de secado propuesta, se plantea al observar los elevados tiempos de secado requeridos en las condiciones que alcanzaron los valores más bajos de humedad final y según lo planteado en la norma técnica NTC 4423 [20] se indica que valores de humedad del 12% son recomendables para la comercialización de tomillo deshidratado. Por tal motivo, los experimentos siguientes son planeados bajo una estructura de un diseño DCCR, con el objeto de hallar la combinación de factores independientes, que permiten alcanzar una humedad final del 12% teniendo en cuenta menores tiempos de operación, puesto que mayores tiempos implican un gasto energético proporcional y por ende un incremento en el costo final del producto deshidratado.

El cuadro 4 presenta la segunda secuencia de experimentos planeados para el secado de tomillo en función de la temperatura y el caudal. En esta secuencia se plantea un nuevo rango de temperaturas a mayores caudales.

El cuadro 5 presenta el segundo diseño de experimentos planteado ubicando los códigos de experimentación y los respectivos niveles de los factores de estudio.

Cuadro 4. Variables independientes y niveles utilizados en el diseño experimental factorial completo.

VI	Niveles				
	-α**	-1	0	1	+α**
T	44,93	47	52	57	59,07
Q*	1817,16	1900	2100	2300	2382,84

*Para cada rpm se calculó su respectivo valor de velocidad del aire en m/s.

**El nivel ±α se calculó como: $\pm\sqrt[n]{(n \cdot \ln 2)}$

Donde n es el número de variables o factores independientes. En este estudio el valor es de ±1,41.

Nota: La sigla VI indica variable independiente.

T= Temperatura nominal del aire (°C)

Q*= Caudal (rpm)

Después de la realización de los experimentos, se obtuvieron los modelos de regresión y la tabla de Análisis de Varianza (ANOVA). A través de la tabla ANOVA, se puede verificar cuál de los modelos presentaba una mejor predicción de los resultados. A partir del modelo obtenido, se visualizó gráficamente mediante superficie de respuesta, la interacción entre las variables independientes y la dependencia de la variable de respuesta (humedad) con las variables independientes, dentro de los límites preestablecidos para el secado.

RESULTADOS

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de la variable de respuesta Humedad en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, un efecto tiene un valor-P menor que 0,1, indicando que es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 90,0%.

Se toma un valor de significancia estadística del 90% siguiendo lo propuesto por Rodrigues & Lemma (2005) donde indican que al utilizar diseños factoriales completos en el tratamiento de procesos industriales en los cuales incluyen operaciones unitarias con una amplia variación implícita, es factible asumir errores del 10% evitando con ello caer en el descarte o supresión de factores con significancia a una mayor escala.

Cuadro 5. Diseño experimental factorial completo 2² para secado de tomillo (segunda secuencia).

Ensayo	T*	Q*	T*	Q*
	(C)	(rpm)	(C)	(rpm)
1	-1	1	47	2300
2	1	-α	52	1817,16
3	+α	0	59,07	2100
4	- α	0	44,93	2100
5	-1	-1	47	1900
6	0	+α	52	2382,84
7	0	0	52	2100
8	1	-1	57	1900
9	0	0	52	2100
10	1	1	57	2300

Nota: Las letras T* indica Temperatura y Q* indica Caudal.

El cuadro 6 presenta el Análisis de Varianza (ANOVA) para la primera secuencia de diseños factoriales completos desarrollada en este estudio. En ella se observa que la temperatura posee un efecto significativo sobre la variable de respuesta humedad ($p=0,0124$).

Las figuras 1 y 2 presentan la superficie y el contorno de la respuesta para la primera secuencia de secado de

Cuadro 6. Análisis de Varianza para Humedad de tomillo.

Fuente	SS	GI	MS	Razón-F	Valor-P
Q	0,111	1	0,111	0,02	0,893
T	102,66	1	102,666	18,74	0,0124
QQ	0,560	1	0,5600	0,1	0,765
TQ	1,575	1	1,575	0,29	0,620
TT	8,239	1	8,239	1,5	0,287
Error total	21,91	4	5,479		
Total (corr.)	134,794	9			

Nota: Las letras de la fuente de variación indican Q: caudal y T: Temperatura.

Figura 1. Superficie de respuesta para humedad en función de la temperatura y el caudal en el secado de tomillo.

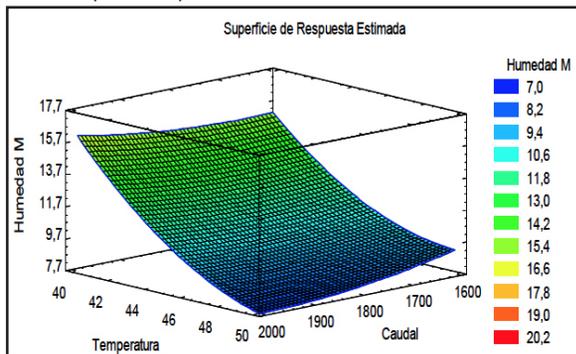
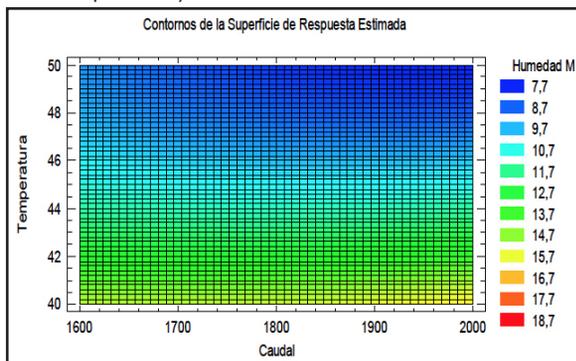


Figura 2. Contorno de la respuesta para humedad en función de la temperatura y el caudal en el secado de tomillo.



tomillo y la evaluación del efecto que la temperatura y el caudal (velocidad del aire) tienen sobre la humedad final. Los resultados indican que el mayor efecto es aportado por la temperatura del aire, aportando los menores valores de humedad entre 44 y 50°C sin dependencia del caudal, sin embargo, al evaluar los tiempos de secado para este rango de condiciones se encuentra que para obtener humedades inferiores al 10% se emplean tiempos de operación que alcanzan las 16 horas en función de bajas temperaturas y bajos caudales.

La figura 3 presenta el gráfico de probabilidad normal para la variable respuesta humedad en función de los factores o variables independientes (temperatura y caudal), en esta figura se observa que la variable independiente temperatura se aleja de forma significativa de la recta normal corroborando con ello el efecto significativo expresado anteriormente en la tabla ANOVA.

La figura 4 presenta el análisis de residuos para la humedad en función de la temperatura del aire y del caudal (velocidad del aire). Allí se observa que los datos colectados no presentan ningún rasgo de tendencia

Figura 3. Gráfico de probabilidad normal para la humedad en función de la temperatura y el caudal en el secado de tomillo.

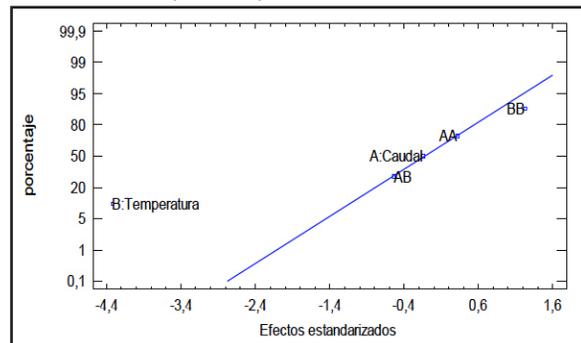
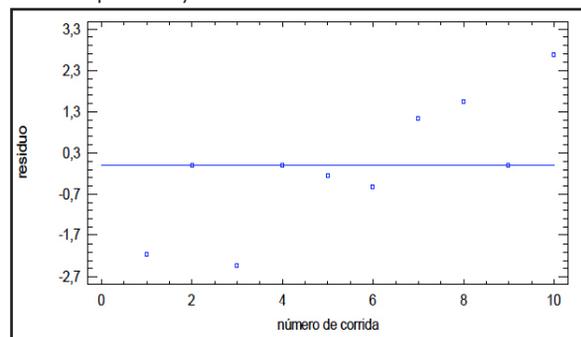


Figura 4. Gráfico de residuos para la humedad en función de la temperatura y el caudal en el secado de tomillo.



con lo cual aportan al cumplimiento del supuesto de independencia, esto se debe a que la distribución de los errores es homogénea y se debe a una aleatorización previa de los ensayos.

La ecuación 1 presenta el modelo de regresión obtenido, el cual presenta un coeficiente R² de 83,74%, con lo cual, se indica que es propicio la presentación de superficies y contornos de la respuesta, ya que el modelo explica en un porcentaje mayor al 70% la variabilidad del fenómeno aquí analizado. En la ecuación 1 se observa que existe un efecto lineal decreciente causado por los factores temperatura y caudal, sin embargo, se logra apreciar que la temperatura tiene un efecto de 4,42 veces sobre el caudal. Es decir, por cada cambio en el caudal la temperatura cambiará en 4,42 puntos. Los efectos cuadráticos no son significativos.

$$H = 129,91 - 0,004Q - 4,42T + Q^2 - 0,0005QT + 0,054T^2 \quad (\text{Ec.1})$$

Donde H: humedad; T: Temperatura y Q: Caudal.

El cuadro 7 presenta el análisis de varianza ANOVA para la variable humedad en la segunda secuencia de secados. Esta tabla presenta a la variable independiente temperatura como la más estadísticamente significativa (valor p=0,0638) a un nivel de significancia del 90% siguiendo lo propuesto por Rodrigues & Lemma (2005) para procesos industriales.

La figura 5 presenta el gráfico de Pareto estandarizado para la variable de respuesta humedad del tomillo en función de los factores experimentales temperatura del aire y caudal. En esta figura se observa como la temperatura es el factor más significativo sobre la

Cuadro 7. Análisis de Varianza para Humedad.

Fuente	SS	GI	MS	Razón-F	Valor-P
T	19,129	1	19,129	6,46	0,0638
Q	5,086	1	5,086	1,72	0,26
TT	2,550	1	2,550	0,86	0,405
TQ	11,492	1	11,492	3,88	0,120
QQ	5,792	1	5,792	1,96	0,234
Error total	11,837	4	2,959		
Total (corr.)	61,80	9			

Nota: Las letras de la fuente de variación indican Q: caudal y T: Temperatura.

humedad del tomillo, corroborando con ello lo planteado en la tabla ANOVA.

Las figuras 6 y 7 presentan la superficie y el contorno de la respuesta para la variable de respuesta humedad final del tomillo en función de los factores temperatura del aire y caudal. En ambas figuras se denota como las combinaciones de los factores revelan la

Figura 5. Gráfico de Pareto para humedad en función de la temperatura del aire y el caudal.

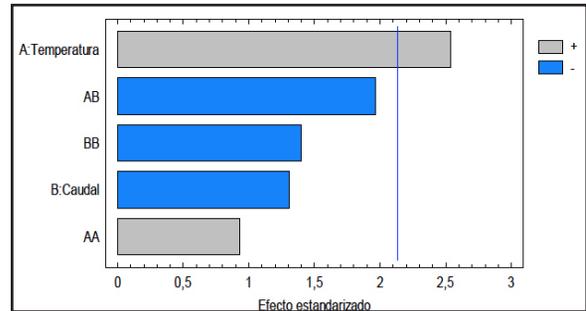


Figura 6. Superficie de respuesta para secado de tomillo en función de la temperatura del aire y del caudal.

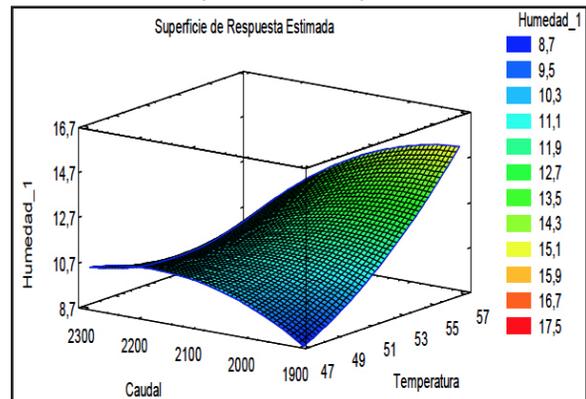
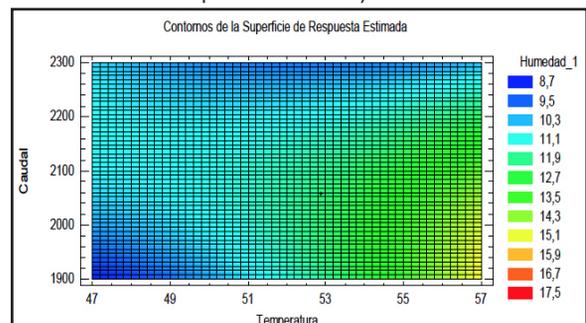


Figura 7. Contorno de la Respuesta para humedad del tomillo en función de la temperatura del aire y el caudal.



mejor condición para el secado del tomillo siguiendo lo establecido por la norma NTC 4423 [20].

La figura 8 hace referencia al mejor punto de experimentación o condición óptima de operación para obtener tomillo deshidratado a un 12% de humedad según lo expresado en la NTC 4423, el contorno aquí presentado se encuentra distribuido por regiones que resultan de las combinaciones experimentales establecidas y que permiten observar de una forma mucho más clara la mejor condición de experimentación. Bajo esta condición óptima, Zhao *et al.* (2016) afirman que ningún microorganismo puede sobrevivir cuando la cantidad de agua se encuentra debajo de 0,6, y el crecimiento de la mayoría de bacterias y hongos cuando la cantidad de agua está debajo de 0,85, así 0,6 se espera que sea el umbral para un alimento seguro y 0,12 para el cumplimiento de la norma técnica Colombiana.

La figura 9 presenta el gráfico de residuos versus el orden de corrida, en esta figura se observa que no

Figura 8. Contorno de la respuesta para la humedad del tomillo en función de la temperatura del aire y el caudal con regiones diferenciadas.

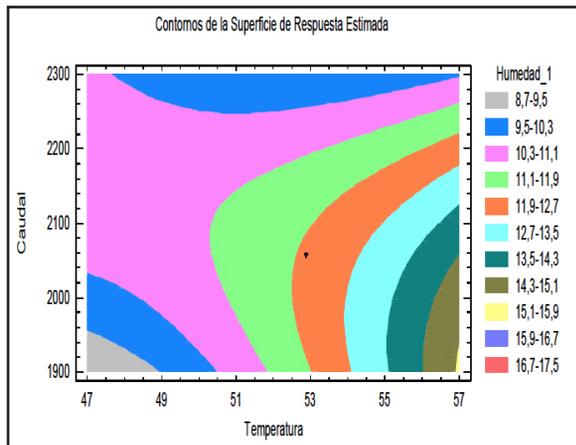
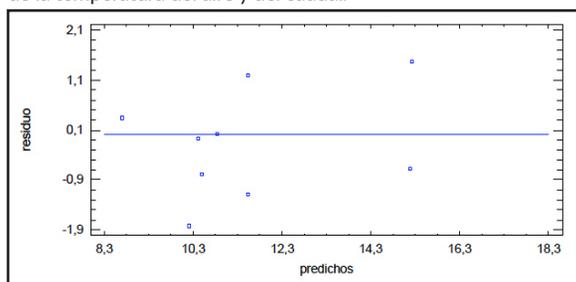


Figura 9. Gráfico de residuos para humedad del tomillo en función de la temperatura del aire y del caudal.



existe tendencia en los errores, con lo cual se puede asegurar que se cumple con el supuesto de independencia y homogeneidad en varianza, estos resultados indican que las experimentaciones fueron sometidas a un ejercicio de aleatorización.

La ecuación 2 presenta el modelo de regresión obtenido a partir de la segunda secuencia de secado, se observa que el efecto de la temperatura y el caudal crecen linealmente con un efecto aditivo de 0,56 veces, es decir, el efecto de la temperatura aumenta en 0,56 puntos por cada aumento en el caudal.

El coeficiente de regresión obtenido fue de 80,84%, indicando que gran parte de la variabilidad del fenómeno estudiado es explicado por el modelo obtenido. Este modelo puede emplearse para posteriores estudios que impliquen el secado de tomillo en las condiciones planteadas.

Siguiendo lo planteado por Rodrigues y Lemma (2005) para la aceptación de modelos de regresión con R^2 con valores mayores o iguales al 70%, se observa que en este estudio los coeficientes obtenidos están por encima del valor mínimo planteado y soportan su análisis en las respectivas superficies y contornos antes presentados y elucidados.

$$H = -224,591 + 0,762T + 0,202Q + 0,03T^2 - 0,002TQ - 0,00003Q^2 \quad (\text{Ec.2})$$

Donde H: humedad; T: Temperatura y Q: Caudal.

CONCLUSIONES

La temperatura se presenta como el factor más significativo sobre la humedad final del tomillo deshidratado con valor $p=0,0124$ con un nivel de significancia del 90%. A las condiciones de temperatura halladas se observa que el mejor caudal se ajusta a la región entre 2050 - 2100 rpm, que corresponden con la mejor región de temperaturas de 52-53°C.

Las condiciones más bajas en términos de temperatura de secado permiten obtener un producto con menor humedad final (8-12%) [19,22], sin embargo, los tiempos requeridos para alcanzar estas humedades superan las 16 horas, lo que los hace inviables

en términos de escalamiento industrial por el alto costo energético que implican.

Los resultados obtenidos en este estudio donde se evalúa el efecto de la temperatura del aire y el caudal sobre la humedad final del tomillo deshidratado indican que se puede obtener un producto que cumple los estándares de calidad exigidos en la normatividad, razones que permiten que pueda ser comercializado o introducido en la cadena de valor de especias y condimentos de la industria de alimentos.

El tomillo deshidratado en las condiciones óptimas alcanza una humedad final del 12% cumpliendo lo establecido en la norma técnica NTC 4423 y siguiendo un planteamiento experimental basado en un DCCR con factores y niveles establecidos para un secador de fabricación nacional.

REFERENCIAS

- [1] ALARCÓN, R. *et al.* Medicinal and local food plants in the south of Alava (Basque Country, Spain). *Journal of Ethnopharmacology*, 176, 2015, p. 207–224, doi.org/10.1016/j.jep.2015.10.022
- [2] STAHL-BISKUP, E. and VENSKUTONIS, R.P. En: *Handbook of herbs and spices. Thyme*. 2 ed. New York (USA): Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, 2012, p. 499–525.
- [3] COLOMBIA. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. Estadísticas agrícolas [online]. 2017. Disponible en: <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx>. 2017 [consulta 03102017].
- [4] GOMES, T.R. *et al.* Dehydrated cashew apple meal in the feeding of growing rabbits. *Semina: Ciências Agrárias*, 39(2), 2018, p. 757-770.
- [5] BRADFORD, K.J. *et al.* The dry chain: Reducing postharvest losses and improving food safety in humid climates. *Trends in Food Science and Technology*, 71(2), 2018, p. 84–93.
- [6] CIURZYŃSKA, A., KOWALSKA, H., CZAJKOWSKA, K. and LENART, A. Osmotic dehydration in production of sustainable and healthy food. *Trends in Food Science and Technology*, 50, 2016, p. 186–192.
- [7] SALIM, N.S., KURIAN, J.K., GARIEPY, Y. and RAGHAVAN, V. Application and the Techno-Economical Aspects of Integrated Microwave Drying Systems for Development of Dehydrated Food Products. *Japan Journal of Food Engineering*, 17(2), 2016, p. 7–10.
- [8] RODRIGUEZ, J., MELO, E.C., MULET, A. and BON, J. Optimization of the antioxidant capacity of thyme (*Thymus vulgaris* L.) extracts: Management of the convective drying process assisted by power ultrasound. *Journal of Food Engineering*, 119(4), 2013, p. 793–799, DOI.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.07.016
- [9] VELASQUEZ, C. Development of a technology for drying oregano type export using propane gas as fuel [MSc. Thesis Energy Management]. Medellín (Colombia): Metropolitan Technological Institute, Faculty Engineering, 2012, 128 p.
- [10] MORAIS, R.M.S.C. *et al.* Functional Dehydrated Foods for Health Preservation. *Journal of Food Quality*, 1, 2018, p. 1-29, DOI: 10.1155/2018/1739636.
- [11] REIS, M.S., MARIOT, A. and STEENBOCK, W. En: *Farmacognosia: da planta ao medicamento. Diversidade e domesticação de plantas medicinais*. 5 ed. Porto Alegre (Brasil): UFRGS, 2003, p. 43–74.
- [12] BROOKER, D.B., BAKER-ARKEMA, F.W. and HALL, C.W. *Drying and storage of grains and oilseeds*. New York (USA): Springer US, 1992.
- [13] DOYMAZ, I. Drying of thyme (*Thymus vulgaris* L.) and selection of a suitable thin-layer drying model. *Journal of Food Processing and Preservation*, 1, 2010, p. 1–8, DOI.org/10.1111/j.1745-4549.2010.00488.x
- [14] ERDFELDER, E., FAUL, F., BUCHNER, A. and LANG, A.G. Statistical power analyses using G*Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods*, 41(4), 2009, p. 1149–1160, DOI.org/10.3758/BRM.41.4.1149
- [15] FAUL, F., ERDFELDER, E., LANG, A.G. and BUCHNER, A.G. Power: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, 39(2), 2007, p. 175–191, DOI.org/10.3758/BF03193146
- [16] BARROS, B., SPACINO, I. e BRUNS, R. *Como fazer experimentos - Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria*. 3 ed. Campinas (Brasil): Unicamp, 2001, 480 p.
- [17] MYERS, R., MONTGOMERY, D. and ANDERSON-COOK, C.M. *Response Surface Methodology: Process and product optimization using designed experiment*. 4 ed. New Jersey (USA): Wiley-Interscience Publication, 2016, 856 p.

- [18] RODRIGUES, M. e LEMMA, A. Planejamento de experimentos e otimização de processos. 1 ed. Campinas (Brasil): Casa do Pão, 2005, 325 p.
- [19] BOX, G.E.P. and WILSON, K.B. On the experimental attainment of optimal conditions. Journal of the Royal Statistical Society, series B, 13(1), 1951, p. 1-45,
- [20] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS (ICONTEC). Industria Alimentaria, Especies y Condimentos (No. NTC 4423). Bogotá (Colombia): 1998.
- [21] ZHAO, X. *et al.* Drying temperature affect the quality of dehydrated mint. Huangshan (China): Proceedings 2015 7th International Conference on Information Technology in Medicine and Education. (ITME), 2016, p. 456-459.
- [22] DA ROCHA, R *et al.* Cinética del secado de tomillo. Revista Brasileira de ingeniería agrícola y ambiental, 16(6), 2012, p. 675-683.