



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE SECADO PARA DOS VARIEDADES
DE CAMOTE (*Ipomoea batata*) CAMOTE MORADO, CAMOTE NARANJA**

Augusto José Barrientos Rodríguez

Asesorado por el Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus

Guatemala, septiembre de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE SECADO PARA DOS VARIEDADES
DE CAMOTE (*Ipomoea batata*) CAMOTE MORADO, CAMOTE NARANJA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

AUGUSTO JOSÉ BARRIENTOS RODRÍGUEZ
ASESORADO POR EL ING. JORGE EMILIO GODÍNEZ LEMUS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl De León de Paz
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE SECADO PARA DOS VARIEDADES DE CAMOTE (*Ipomoea batata*) CAMOTE MORADO, CAMOTE NARANJA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha de 3 de noviembre de 2011.

Augusto José Barrientos Rodríguez



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala 7 de Noviembre del 2012

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdés
Director de la Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ing. Monzón,

Por la presente carta hago constar que como Ingeniero asesor del trabajo de graduación correspondiente a la carrera de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala titulado "Determinación de las curvas de secado para dos variedades de camote (Ipomoea batata) camote morado, camote naranja" el cual fue realizado por el estudiante Augusto José Barrientos Rodríguez que se identifica con el número de carnet 200512145, apruebo el Informe final de dicho trabajo.

Atentamente,


Ing. Jorge Godínez



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 19 de marzo de 2013
Ref. EI.Q.TG-IF.020.2013

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Acta TG-140-2011-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Augusto José Barrientos Rodríguez**

Identificado con número de carné: **2005-12145**

Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE SECADO PARA DOS VARIEDADES DE CAMOTE (*Ipomoea batata*) CAMOTE MORADO, CAMOTE NARANJA

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Emilio Godínez Lemus**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑADA A TODOS"

Ing. César Alfonso García Guerra
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ACREDITADO POR
Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería
Período 2013 - 2015



ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Ref.EIQ.TG.269.2013

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **AUGUSTO JOSÉ BARRIENTOS RODRÍGUEZ** titulado: "**DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE SECADO PARA DOS VARIEDADES DE CAMOTE (IPOMOEA BATATA) CAMOTE MORADO, CAMOTE NARANJA**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, septiembre 2013

Cc: Archivo
VMMV/ale

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 673.2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE SECADO PARA DOS VARIETADES DE CAMOTE (*Ipomoea batata*) CAMOTE MORADO, CAMOTE NARANJA ELABORACIÓN DE ADEREZOS**, presentado por el estudiante universitario **Augusto José Barrientos Rodríguez**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 30 de septiembre de 2013

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres

César Barrientos y Ana Victoria Rodríguez por el apoyo y enseñanzas que me han dado y me permitieron llegar a este punto.

Mis hermanos

Luisa Fernanda, Valentina y Gabriel Barrientos, por su cariño y los ánimos brindados para la culminación de mi carrera.

Mi novia

Cristina Castillo, por su amor y el impulso dado a lo largo de la realización de este trabajo.

Mi familia

Por su cariño y apoyo en todo momento.

Mis amigos

César García, Hugo Rubio, Roberto Pinto, Julio Vallejo, José Ricardo De León, Mercedes Roquel, Adrián Soberanis y Luis Francisco Anzueto, por su amistad y aliento brindado durante todo este tiempo.

AGRADECIMIENTOS A:

- Inga. Mercedes Ester Roquel** Por toda su ayuda y soporte brindado durante la realización de este trabajo.
- Ing. Jorge Godínez** Por la guía y el apoyo brindado para realizar este informe.
- Ing. César García** Por compartir su conocimiento y ayudar a profundizar el estudio de los resultados experimentales obtenidos durante el estudio.
- Departamentos de Química y
Química Industrial de la
Facultad de Ingeniería de la
Universidad San Carlos de
Guatemala** Por permitirme el uso de equipo y recursos necesarios para la realización de la parte experimental.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS / HIPÓTESIS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. ANTECEDENTES.....	1
1.1. Justificación.....	2
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Operaciones unitarias.....	5
2.1.1. Transferencia de momento.....	5
2.1.2. Transferencia de calor.....	8
2.1.3. Transferencia de masa.....	12
2.1.3.1. Secado.....	14
2.2. Conservación de los alimentos.....	20
2.2.1. Deshidratación de los alimentos.....	21
3. DISEÑO METODOLÓGICO.....	23
3.1. Variables.....	23
3.1.1. Curva No 1 (evaluación de la pérdida de humedad de camote en función del tiempo).....	25
3.1.2. Curva No 2 (variación de contenido de humedad en base seca de camote en función del tiempo).....	25

3.1.3.	Curva No 3 (variación de la velocidad de secado de camote en función del contenido de humedad libre).....	26
3.1.4.	Curva No 4 (contenido de humedad en base seca en función de la humedad relativa)	27
3.2.	Delimitación del campo de estudio	27
3.3.	Recursos humanos disponibles	29
3.4.	Recursos materiales disponibles	29
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	30
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	31
3.6.1.	Determinación de la masa y el contenido de humedad en base seca	31
3.6.2.	Determinación de la temperatura y la humedad relativa	32
3.6.3.	Calidad de los resultados y control del error	33
3.6.4.	Tabulación, ordenamiento procesamiento de la información	38
3.7.	Análisis estadístico	40
4.	RESULTADOS.....	41
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	61
	CONCLUSIONES.....	69
	RECOMENDACIONES	71
	BIBLIOGRAFÍA.....	73
	APÉNDICE	75

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Perfil de velocidad para régimen laminar	7
2.	Perfil de velocidad para régimen turbulento.....	7
3.	Gráfica psicrométrica	16
4.	Contenido de humedad en base seca en función del tiempo.....	17
5.	Velocidad de secado por unidad de área en función del contenido de humedad en base seca	18
6.	Evaluación de la pérdida de humedad de camote en función del tiempo para la geometría de corte en cubos a 40 grados	42
7.	Evaluación de la pérdida de humedad de camote en función del tiempo para la geometría de corte en cubos a 50 grados	43
8.	Variación del contenido de humedad en base seca de camote en función del tiempo para la geometría de corte en cubos a 40 grados ..	44
9.	Variación del contenido de humedad en base seca de camote en función del tiempo para la geometría de corte en cubos a 50 grados ..	45
10.	Variación de la velocidad de secado de camote en función del tiempo para la geometría de corte en cubos a 40 grados	46
11.	Variación de la velocidad de secado de camote en función del tiempo para la geometría de corte en cubos a 50 grados	47
12.	Evaluación de la pérdida de humedad de camote en función del tiempo para la geometría de corte en julianas a 40 grados	48
13.	Evaluación de la pérdida de humedad de camote en función del tiempo para la geometría de corte en julianas a 50 grados	49

14.	Variación del contenido de humedad en base seca camote en función del tiempo para la geometría de corte en julianas a 40 grados.....	50
15.	Variación del contenido de humedad en base seca de camote en función del tiempo para la geometría de corte en julianas a 50 grados	51
16.	Variación de la velocidad de secado de camote en función del tiempo para la geometría de corte en julianas a 40 grados.....	52
17.	Variación de la velocidad de secado de camote en función del tiempo para la geometría de corte en julianas a 50 grados.....	53
18.	Evaluación de la pérdida de humedad de camote en función del tiempo para la geometría de corte en rodajas a 40 grados	54
19.	Evaluación de la pérdida de humedad de camote en función del tiempo para la geometría de corte en rodajas a 50 grados	55
20.	Variación del contenido de humedad en base seca de camote en función del tiempo para la geometría de corte en rodajas a 40 grados	56
21.	Variación del contenido de humedad en base seca de camote en función del tiempo para la geometría de corte en rodajas a T=50°C....	57
22.	Variación de la velocidad de secado de camote en función del tiempo para la geometría de corte en rodajas a 40 grados	58
23.	Variación de la velocidad de secado de camote en función del tiempo para la geometría de corte en rodajas a 50 grados	59
24.	Eficiencia en función de la velocidad para 40 grados.....	60
25.	Eficiencia en función de la velocidad para 50 grados.....	60

TABLAS

I.	Variables a monitorear para la obtención de curvas de secado	24
II.	Dimensiones de los diferentes cortes	27
III.	Porcentaje de error para el camote morado a 40 grados.....	34
IV.	Porcentaje de error para el camote morado a 50 grados.....	35
V.	Porcentaje de error para el camote naranja a 40 grados.....	36
VI.	Porcentaje de error para el camote naranja a 50 grados.....	37
VII.	Variables a medir	38
VIII.	Datos para realización de curvas	39
IX.	Masa en función del tiempo para el corte de cubos a 40 grados para camote morado.....	82
X.	Contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el corte de cubos a 40 grados para camote morado	83
XI.	Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el corte de cubos a 40 grados para camote morado.....	84
XII.	Masa en función del tiempo para el corte de julianas a 40 grados para camote morado.....	85
XIII.	Contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el corte de julianas a 40 grados para camote morado	86
XIV.	Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el corte de julianas a 40 grados para camote.....	87
XV.	Masa en función del tiempo para el corte de rodajas a 40 grados para camote morado.....	88
XVI.	Contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el corte de rodajas a 40 grados para camote morado.....	89
XVII.	Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el corte de rodajas a 40 grados para camote	90

XVIII.	Masa en función del tiempo para el corte de cubos a 50 grados para camote morado.....	91
XIX.	Contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el corte de cubos a 50 grados para camote morado.....	92
XX.	Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el corte de cubos a 50 grados para camote morado	93
XXI.	Masa en función del tiempo para el corte de julianas a 50 grados para camote morado.....	94
XXII.	Contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el corte de julianas a 50 grados para camote morado	95
XXIII.	Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el corte de julianas a 50 grados para camote morado.....	96
XXIV.	Masa en función del tiempo para el corte de rodajas a T=50°C para camote morado.....	97
XXV.	Contenido de humedad base seca en función del tiempo para el corte de rodajas a 50 grados para camote morado.....	98
XXVI.	Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el corte de rodajas a 50 grados para camote morado	99
XXVII.	Masa en función del tiempo para el corte de cubos a 40 grados para camote naranja.....	100
XXVIII.	Contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el corte de cubos a 40 grados para camote naranja	101
XXIX.	Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el corte de cubos a 40 grados para camote naranja.....	102
XXX.	Masa en función del tiempo para el corte de julianas a 40 grados para camote naranja.....	103
XXXI.	Contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el corte de julianas a 40 grados para camote morado	104

XXXII.	Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el corte de julianas a 40 grados para camote naranja	105
XXXIII.	Masa en función del tiempo para el corte de rodajas a T=40°C para camote naranja.....	106
XXXIV.	Contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el corte de rodajas a grados para camote naranja	107
XXXV.	Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el corte de rodajas a grados para camote naranja	108
XXXVI.	Masa en función del tiempo para el corte de cubos a T=50°C para camote naranja.....	109
XXXVII.	Contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el corte de cubos a 50 grados para camote naranja	110
XXXVIII.	Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el corte de cubos a 50 grados para camote naranja ..	111
XXXIX.	Masa en función del tiempo para el corte de julianas a T=50°C para camote naranja.....	112
XL.	Contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el corte de julianas a 50 grados para camote naranja.....	113
XLI.	Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el corte de julianas a 50 grados para camote naranja	114
XLII.	Masa en función del tiempo para el corte de rodajas a 50 grados para camote naranja	115
XLIII.	Contenido de humedad base seca en función del tiempo para el corte de rodajas a 50 grados para camote naranja.....	116
XLIV.	Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el corte de rodajas a 50 grados para camote naranja	117

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área de contacto
Cm	Centímetros
X*	Contenido de humedad al equilibrio
X_{bs}	Contenido de humedad en base seca
X	Contenido de humedad libre
°C	Grados Celsius
G	Gramos
HR	Humedad relativa
H	Masa de humedad
m_s	Masa de sólido
L_s	Masa de sólido seco
m²	Metros cuadrados
Min	Minutos
Δ%	Porcentaje de error de precisión por incertidumbre
T_{bh}	Temperatura de bulbo húmedo
T_{bs}	Temperatura de bulbo seco
T	Tiempo
R	Velocidad de secado

GLOSARIO

Análisis proximal	Análisis que busca determinar en los alimentos el contenido de grasa, de humedad, de proteínas y de cenizas. Este análisis se emplea generalmente, para determinar el valor nutritivo de un alimento.
Área de contacto	Área del sólido a secar que entra en contacto con el medio secante, en el caso de este estudio, el aire ambiental calentado por el horno.
Cromatografía HPLC	Cromatografía líquida de alta eficiencia, es una técnica cromatográfica usada para separar e identificar componentes de una mezcla según las diferentes interacciones que estos tienen con la columna cromatográfica empleada.
Contenido de humedad en base seca	Masa de humedad que tiene un sólido en función de la masa del sólido seco (es decir sin nada de agua). Este puede ser mayor que 1 cuando la masa de humedad (agua) es mayor en el sólido húmedo que la masa de sólido seco.

Eficiencia	Capacidad de obtener los resultados deseados empleando menos recursos. En el caso del presente estudio se enfoca más en la obtención de cierto contenido de humedad en base seca empleado menos tiempo para el secado.
Humedad relativa	Cantidad de agua o humedad que tiene una masa de aire en función de la cantidad máxima de agua que este puede aceptar sin que esta se condense. Este valor depende de la temperatura a la cual se encuentra el aire.
Medio secante	Fluido empleado para remover la humedad del sólido en cuestión. En este caso se emplea aire del ambiente.
Secado	Acción de remover la humedad de un sólido sin emplear métodos mecánicos.
Temperatura de bulbo húmedo	Temperatura que existiría en un medio si este fuera adiabáticamente saturado de agua. Para medir este valor puede emplearse un termómetro de mercurio con un algodón mojado en la punta. Esto último asegura que la punta tenga constantemente agua evaporándose al contacto con esta.

Temperatura de bulbo seco	Temperatura ambiental que se puede medir directamente con un termómetro de mercurio.
Tubérculo	Es un tallo que se encuentra debajo de la tierra y en el cual se almacenan los nutrientes de la planta a la que pertenece, razón por la cual puede tener un valor nutricional considerable.
Velocidad de secado	Cantidad de humedad que se pierde en un área determinada por unidad de tiempo.

RESUMEN

El estudio se llevó a cabo con el objetivo de obtener datos experimentales para evaluar las tendencias del proceso de secado de dos variedades de camote (*Ipomoea batata*), siendo estos el camote morado, el camote naranja en función de tres geometrías de corte diferentes. Para este trabajo se utilizó únicamente camotes pertenecientes a la estación lluviosa para evitar diferencias significativas entre las muestras. Con los datos obtenidos se buscó realizar las siguientes curvas de secado, curva No 1: masa del sólido en función del tiempo de secado, curva No 2: contenido de humedad en base seca en función del tiempo de secado, curva No 3: velocidad de secado en función del contenido de humedad en base seca, y curva No 4: contenido de humedad en base seca en función del humedad relativa. Esta última curva no pudo realizarse debido a las condiciones del experimento.

Para la obtención de los datos experimentales se emplearon varios tipos de corte empleando dos temperaturas de secado conocidas y valiéndose de un horno con convección forzada para secar los tubérculos.

Tras graficar las diferentes curvas de secado se realizó una comparación entre las curvas de los diferentes tubérculos para observar si existen diferencias significativas entre ellas. Además se compararon las curvas hechas para los diferentes cortes y determinar cuál de ellos es el más eficiente para llevar a cabo un proceso de secado de tubérculos. Dicha eficiencia se obtuvo en función de dos parámetros: el tiempo de secado y la cantidad de energía empleada en el proceso.

OBJETIVOS

General

Estudiar la evolución del proceso de secado para dos especies de tubérculos, el camote morado y camote naranja a través del monitoreo de la pérdida de masa durante el secado.

Específicos

1. Monitorear la pérdida de humedad para el camote morado y el camote naranja durante el proceso del secado para tres tipos de geometrías de corte (rodajas, julianas y cubos).
2. Realizar las curvas de secado correspondientes a ambos tubérculos a partir de los datos experimentales de pérdida de humedad en función del tiempo.
3. Evaluar las tendencias de las curvas de secado obtenidas experimentalmente con las referidas en la literatura para tubérculos similares.
4. Comparar las tendencias obtenidas para el camote morado con las obtenidas para el camote naranja.
5. Comparar, en el caso de cada uno de los tubérculos, las tendencias obtenidas para las diferentes geometrías de corte.

HIPÓTESIS

El corte que presenta la transferencia de masa más eficiente, en cuanto al tiempo de secado y la cantidad de energía utilizada, para el proceso de secado de los cuatro tubérculos estudiados es el de cubos.

INTRODUCCIÓN

Los procesos de conservación de los alimentos han sido fundamentales en los últimos años para mejorar la calidad de los alimentos. Existe una gama muy amplia de dichos métodos, de entre los cuales se puede citar la refrigeración, la pasteurización, la deshidratación, etc. Con respecto a la tercera de las opciones mencionadas, la deshidratación, se puede decir que, además de ser un proceso para conservación de alimentos permite modificar las propiedades físicas de los mismos, permitiendo eventualmente cambiar su presentación transformándolos en harinas, por ejemplo.

Este es el caso de los tubérculos, los cuales al ser deshidratados adecuadamente pueden ser utilizados para la fabricación de féculas que presentan propiedades alimenticias considerables. Adicionalmente, este proceso presenta la ventaja que los tubérculos son fáciles de cultivar, incluso en zonas relativamente áridas tal y como es el caso del corredor seco de Guatemala.

Sin embargo, no se cuenta con mucha información para este proceso, ya que no es muy común. En ese sentido surge la necesidad de generar bibliografía experimental para apoyar la implementación de este proceso. Gran parte de la información que se necesita corresponde al proceso de secado propiamente y esta incluye como parte fundamental las curvas de secado. Dichas curvas presentan la evolución y las tendencias de la humedad, la temperatura, la velocidad de secado y otras propiedades relevantes del secado de alimentos.

En ese sentido, el presente trabajo consiste en la realización y análisis de las curvas de secado correspondientes a dos variedades de camote, los cuales conforman una muestra representativa de las variedades que pueden utilizarse para la producción de harina.

1. ANTECEDENTES

Actualmente, ya se cuenta en la Escuela de Ingeniería Química con dos trabajos de graduación relacionados con el secado de tubérculos: Diseño de una línea de producción para la elaboración de harina de camote (*Ipomoea Batata*), realizado por la Inga. Mercedes Ester Roquel, y Evaluación del rendimiento en la producción de harina de malanga (*Colocasia esculenta (L.) Schott*) a nivel laboratorio y su caracterización proximal y fisicoquímica para aprovechamiento alimenticio, realizado por el Ing. Ronald Roberto Rodríguez.

En el primer trabajo se realizó la planificación para el montaje de una línea de fabricación de harina, haciendo adicionalmente, un estudio de las propiedades alimenticias y un análisis sensorial de la misma. Para ello se realizaron una serie de análisis, tales como: el proximal y cromatografía HPLC, una serie de encuestas evaluando la aceptación de los productos obtenidos a partir de la harina de camote. Asimismo, se realizaron curvas de peso en función del tiempo para evaluar la eficiencia de secado para tres diferentes cortes del tubérculo.

Por su parte, el segundo trabajo es similar al anterior, con la diferencia de que este se trabajó únicamente a nivel laboratorio, sin realizar el montaje de una línea de producción a mayor escala, y con el hecho de que se empleó otro tipo de tubérculo, la malanga. Ambos trabajos se centran en el valor nutricional y la aceptación de los productos de harina de tubérculos más que en el proceso de secado en sí.

1.1. Justificación

El cultivo de tubérculos es una alternativa muy viable para las poblaciones desfavorecidas que se encuentran en suelos poco fértiles y secos. Tal y como es el caso de las personas que habitan en el corredor seco de Guatemala. Dichos tubérculos no solo se dan fácilmente sino que presentan propiedades alimenticias interesantes, para poblaciones que sufren de desnutrición.

En ese sentido se puede decir que, la implementación de procesos de alimentos que contengan tubérculos como materia prima es ideal para estas áreas desfavorecidas, tanto para consumo como para producción y venta de alimentos. Uno de estos procesos que puede hacerse tanto de manera artesanal como industrial es el secado de tubérculos que pueden posteriormente, ser consumidos directamente o ser empleados para fabricación de otros alimentos. Un ejemplo claro de esto es la utilización de harinas de tubérculos para fabricación de pasteles, champurradas, entre otros.

Este proceso tiene la ventaja de que no se necesita un equipo complejo para realizarlo y además, facilita la conservación de los alimentos, ya que al secarlos disminuye considerablemente la actividad del agua presente y prolonga la vida de anaquel.

Para llevar a cabo de manera adecuada y óptima un proceso de esta naturaleza, es necesario contar con conocimientos acerca del comportamiento de los tubérculos en el secado fundamentados con datos experimentales. Dicho tipo de bibliografía es muy escasa, ya que se trata de un proceso poco empleado en países como Guatemala. Es por ello que surge la necesidad de realizar procesos de tipo experimental y obtener de esta manera datos bibliográficos válidos que puedan emplearse en procesos reales.

La generación de las curvas de secado de cuatro tubérculos nativos que se realizará en el presente trabajo de graduación, proporciona una herramienta de este tipo.

Actualmente, existen algunos trabajos de graduación hechas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala que tratan el tema de la fabricación de féculas de tubérculos, tal y como se mencionó en la sección anterior. Si bien en estos se trabajó el tema de secado de tubérculos, se enfocaban, principalmente, en el resultado del secado y no tanto en el proceso en sí.

En dichas investigaciones se generó únicamente, una de las curvas de secado (cambio de masa en función del tiempo). Además, en ninguna se tomó en cuenta la influencia de la humedad relativa en el secado. Por lo tanto, si bien los trabajos de graduación anteriormente mencionados presentan un gran trabajo de investigación y experimentación, este se enfoca principalmente, en la fécula de tubérculos (contenido alimenticio, consistencia, etc), dejando campo abierto para el estudio del secado propiamente.

En ese sentido se puede decir que, en el presente trabajo funge como complemento del proyecto antes mencionado, ya que se hace un estudio más profundo del proceso del secado de dos de los tubérculos estudiados, generando así una gran variedad de curvas de secado y tomando en cuenta la influencia de la humedad relativa, la cual es un parámetro directamente relacionado con la variación del contenido de humedad de un sólido, en este caso de un tubérculo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Operaciones unitarias

Las operaciones unitarias en Ingeniería Química se definen como los pasos elementales que componen un proceso. Dichas operaciones pueden ser clasificadas de diversas formas. Una de las más comunes es, la que las diferencia según la transferencia que se da en el procedimiento. Las categorías de esta clasificación son las siguientes:

2.1.1. Transferencia de momento

Esta operación unitaria consiste en generar o modificar el movimiento del elemento deseado para llevarlo a generar una trayectoria deseada. Dicha operación está directamente relacionada con el trasiego de fluidos y por lo tanto con la mecánica de fluidos.

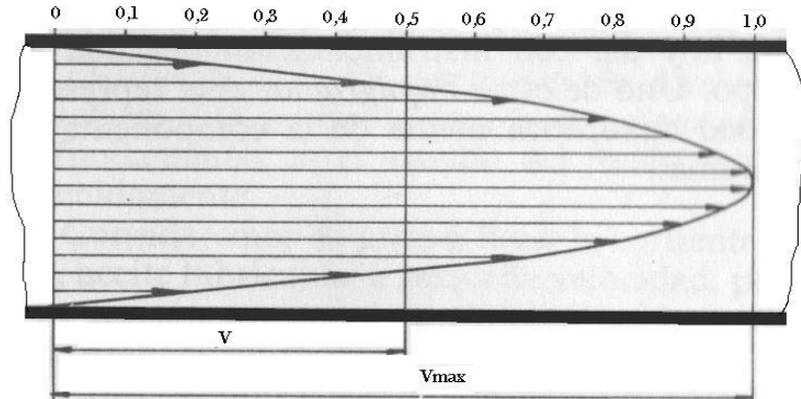
Un fluido es una sustancia deformable en la cual se produce un deslizamiento entre las capas que lo conforman cuando este entra en movimiento. Estos pueden ser compresibles o incompresibles, dependiendo de su naturaleza. Para desplazar un fluido de una posición a otra se emplean conductos que definen su trayectoria. Cuando se lleva a cabo el trasiego se distinguen tres regiones diferentes, la central llamada flujo franco, la perimetral que se encuentra directamente en contacto con el conducto que transporta al fluido llamada capa límite y la región de transición entre las dos mencionadas anteriormente llamada zona buffer.

En la primera fase mencionada, las moléculas del fluido no están en contacto con el conducto que las transporta y por lo tanto se desplazan libremente. La segunda fase están en contacto directo con las paredes del conducto por lo que se genera una capa de fluido inmóvil debido a las interacciones con las paredes.

Dicha capa se conoce como capa límite. La zona buffer es una zona de transición en la que las moléculas que se encuentran en la capa límite se desplazan eventualmente a la zona franca o viceversa. Debido a este desplazamiento de moléculas se generan pequeños remolinos llamados eddies.

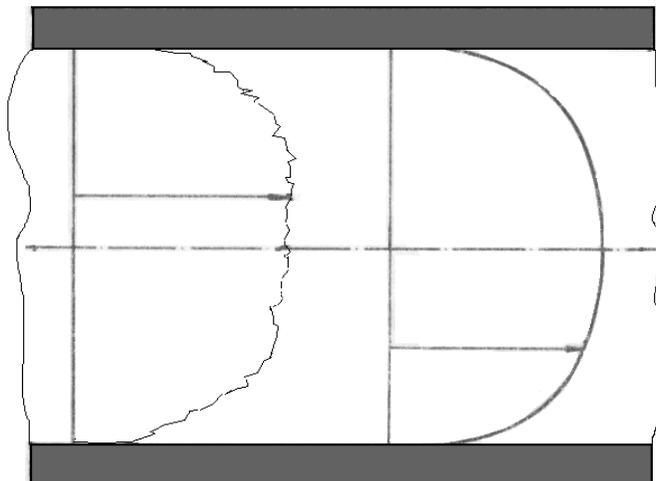
La forma del desplazamiento de los fluidos varía según el régimen en que se encuentren. Usualmente se distinguen dos regímenes, el laminar en el cual las partículas se desplazan ordenadamente de manera casi rectilínea, y el régimen turbulento donde las partículas tienen una trayectoria una trayectoria más errática.

Figura 1. Perfil de velocidad para régimen laminar



Fuente: B VELÁSQUEZ. MSc. Ing. Luz Maria. Aspectos teóricos de la operación secado y su aplicación en productos sólidos. http://es.wikipedia.org/wiki/Flujo_laminar. Consulta: 15 de abril de 2012.

Figura 2. Perfil de velocidad para régimen turbulento



Fuente: Flujo laminar. http://es.wikipedia.org/wiki/Flujo_laminar. Consulta: 15 de abril de 2012.

La distinción del régimen se hace con respecto al número adimensional llamado número de Reynolds:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

Donde:

V: velocidad lineal del fluido

D: diámetro de tubería

ν : viscosidad cinemática del fluido

Mientras mayor sea el número de Reynolds mayor será la turbulencia del fluido. Los valores límites para los diferentes regímenes varían según la literatura, pero los más usados son los siguientes:

Régimen laminar: $Re \leq 2000$

Régimen turbulento: $Re \geq 4000$

2.1.2. Transferencia de calor

La transferencia de calor se da siempre de un cuerpo con mayor temperatura a otro con temperatura menor. Este principio se aprovecha en las operaciones unitarias, ya sea para calentar o para enfriar un cuerpo sólido o un fluido. Dicha transferencia de calor puede darse con tres mecanismos diferentes: conducción, convección y radiación.

- Conducción

Este mecanismo consiste en la transferencia de calor al interior de un cuerpo o entre varios cuerpos que se encuentran en contacto directo y están inmóviles a escala macroscópica.

En la conducción lo que se da es una transferencia de energía térmica entre las moléculas de un gas, líquido o sólido. En el caso de los metales la transferencia de calor se da también, por medio de los electrones libres lo que los hace, por lo general, buenos conductores.

La transferencia de energía térmica, en este caso, está gobernada por una propiedad física llamada conductividad térmica (κ) la cual depende a su vez del material utilizado. Este valor da una idea de la capacidad de transferir calor del material en cuestión y se expresa en el sistema internacional en $J/(s \cdot ^\circ C \cdot m)$. A mayor conductividad mejor es la transferencia de calor por el material. Aunque la conductividad térmica varía, con la temperatura esta puede considerarse como constante en intervalos de temperatura cortos para fines prácticos.

La ecuación de transferencia de calor cuando hay únicamente conducción es conocida como la Ley de Fourier y se presenta de la siguiente manera:

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} = -\kappa A \frac{\partial T}{\partial x}$$

Donde:

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t}$$

$\frac{\partial Q_x}{\partial t}$: flujo de calor en función del tiempo que atraviesa un área A en dirección.

κ : conductividad térmica del material

A: área de transferencia de calor

T: temperatura

t: tiempo

- Convección

En el caso de la convección, las moléculas no se encuentran estacionarias como en el de la conducción. Las moléculas tienen un movimiento relativo mayor lo que causa que la transferencia de calor se dé entre corrientes calientes y corrientes frías. Para que esto suceda, las moléculas tienen que estar lo suficientemente separadas unas de otras para permitir su movimiento, por lo que la convección se da únicamente en estado gaseoso o líquido.

Se distinguen dos tipos de convección: la natural y la forzada. En la primera, las moléculas más calientes del gas o del líquido tienden a subir las más frías a bajar por diferencia de densidades. Esto causa que las corrientes entren en contacto y haya de esta manera transferencia de calor.

Por su parte, la convección forzada se da cuando el movimiento no se da de forma natural si no que se agrega un dispositivo mecánico que causa el movimiento. Este es el caso de los ventiladores que crean una corriente de aire que permite secar sólidos en un secador. Ambos fenómenos, la convección forzada y natural pueden darse simultáneamente. Sin embargo, generalmente es más importante el efecto de la forzada, por lo que el uso de esta hace que los procesos de transferencia de calor se den aún más rápido.

La convección se expresa según la ley de enfriamiento de Newton, la cual se enuncia a continuación:

$$\frac{dQ}{dt} = hA(T_s - T_{inf})$$

Donde:

$\frac{dQ}{dt}$

: flujo de calor en función del tiempo

h: coeficiente convectivo

A: Área de transferencia de calor

T_s: es la temperatura de la pared que contiene al fluido

T_{inf}: temperatura del fluido lejos del cuerpo

A diferencia de la conductividad κ en la conducción, el coeficiente convectivo h no depende únicamente de la naturaleza del fluido la temperatura, sino que depende, también de la geometría del sistema, la velocidad de flujo la diferencia de temperaturas.

- Radiación

En la transferencia de calor por radiación no se necesita un medio físico para que el flujo de calor tenga lugar. La diferencia de los otros dos mecanismos, ya que estos no pueden darse en el vacío como la radiación. En la radiación la transferencia de calor se da por radiaciones electromagnéticas.

Sin embargo en las operaciones unitarias este es el mecanismo que tiene menos ingerencia en a lo que la transferencia de calor se refiere. La ecuación

que rige esta transferencia es la de Stefan-Boltzmann que se presenta a continuación:

$$Q = eA\sigma T^4$$

Donde:

Q: es la cantidad de energía calórica transferida

e: es la emisividad del medio

A: es el área de contacto

σ : es la constante de Stefan-Boltzmann

T: es la temperatura absoluta del cuerpo emisor

2.1.3. Transferencia de masa

Este tipo de proceso de transporte tiene lugar en las operaciones unitarias de secado, absorción, destilación y procesos de membranas. Para que esta se lleve a cabo es necesario que haya 3 elementos: un marco fijo, uno o varios solutos migrantes y un gradiente. El soluto mencionado es el que migra del marco fijo al exterior o viceversa, situación que causa una diferencia entre la concentración inicial de este al principio y al final del proceso. Lo que causa la migración de los solutos es la diferencia de concentraciones entre la fase estudiada y el exterior o entre dos puntos de dicha fase.

El intercambio de solutos puede darse de dos maneras: con contacto blando, es decir cuando hay contacto directo entre dos fases, o por contacto duro, es decir con una membrana semipermeable separando las dos fases. El segundo método es más selectivo porque pueden obtenerse membranas

bastante especializadas para procesos diversos, lo que hace que la tecnología de membranas se emplee más en las operaciones unitarias.

Al igual que en la transferencia de calor, la transferencia de masa puede darse por varios mecanismos. En este caso son dos: de difusión y el de convección.

- Difusión

Este tiene lugar en una fase estática, es decir que, en este caso el marco fijo no tiene movimiento alguno sino que son únicamente los solutos los que migran de un lugar a otro. Sin embargo, la migración de dichos solutos no se hace de manera rectilínea y ordenada. Aunque el conjunto de moléculas de soluto tengan una trayectoria definida, las moléculas individuales tienen una trayectoria azarosa, ya que en el camino chocan con el marco fijo o unas con otras. Así como la conducción de calor dependía directamente con la conductividad térmica k la difusión depende directamente de una propiedad llamada difusividad D . Esta depende tanto del material del marco fijo como del tipo de soluto migrante. Generalmente se expresa como difusividad de un soluto A en un marco fijo B.

Este tipo de transferencia de masa se expresa con la ecuación de Fick:

$$J = AD_{AB} \frac{dX_A}{dz}$$

Donde:

J: flujo neto del soluto migrante

A: concentración del soluto A

D_{AB} : difusividad del soluto A en B

$\frac{dX_A}{dz}$: razón de cambio de la fracción molar de A en una distancia z paralela a la trayectoria.

La transferencia de masa por difusión en sólidos se clasifica en dos: difusión de Fick y de Knudsen. En la primera, los poros del sólido son bastante grandes y se asume que partículas del soluto migrante (en este caso un gas) atraviesan sin mayor problema el sólido. En el segundo caso, los poros del sólido son del orden de la trayectoria media libre de las partículas de gas, por lo que estas tendrán colisiones mucho más frecuente con las paredes del poro.

- Transferencia de masa por convección

A diferencia de la difusión antes mencionada, en este mecanismo la transferencia de masa se da por un movimiento de fluido, ya sea laminar o turbulento.

2.1.3.1. Secado

El proceso del secado consiste en eliminar partículas de un líquido presentes en un sólido de manera no mecánica, siendo el líquido, por lo general agua. Esto se lleva a cabo hasta que el contenido de humedad en el sólido llega al valor deseado. Cuando la cantidad de líquido es muy alta se emplean, casi siempre métodos mecánicos para eliminar la mayor parte de esta

puesto que hacerlo directamente por secado no resulta viable. En ese sentido el proceso de secado es, por lo general, uno de los últimos pasos en un proceso.

Debido a que lo que se está haciendo disminuir la concentración del líquido en el sólido, se trata de una transferencia de masa. Sin embargo, el secado va por lo general acompañado de una transferencia de calor, ya que el hecho de aumentar la temperatura volatiliza el líquido haciendo más fácil que este sea removido. Es por ello que para secar se emplea un dispositivo que incremente la temperatura.

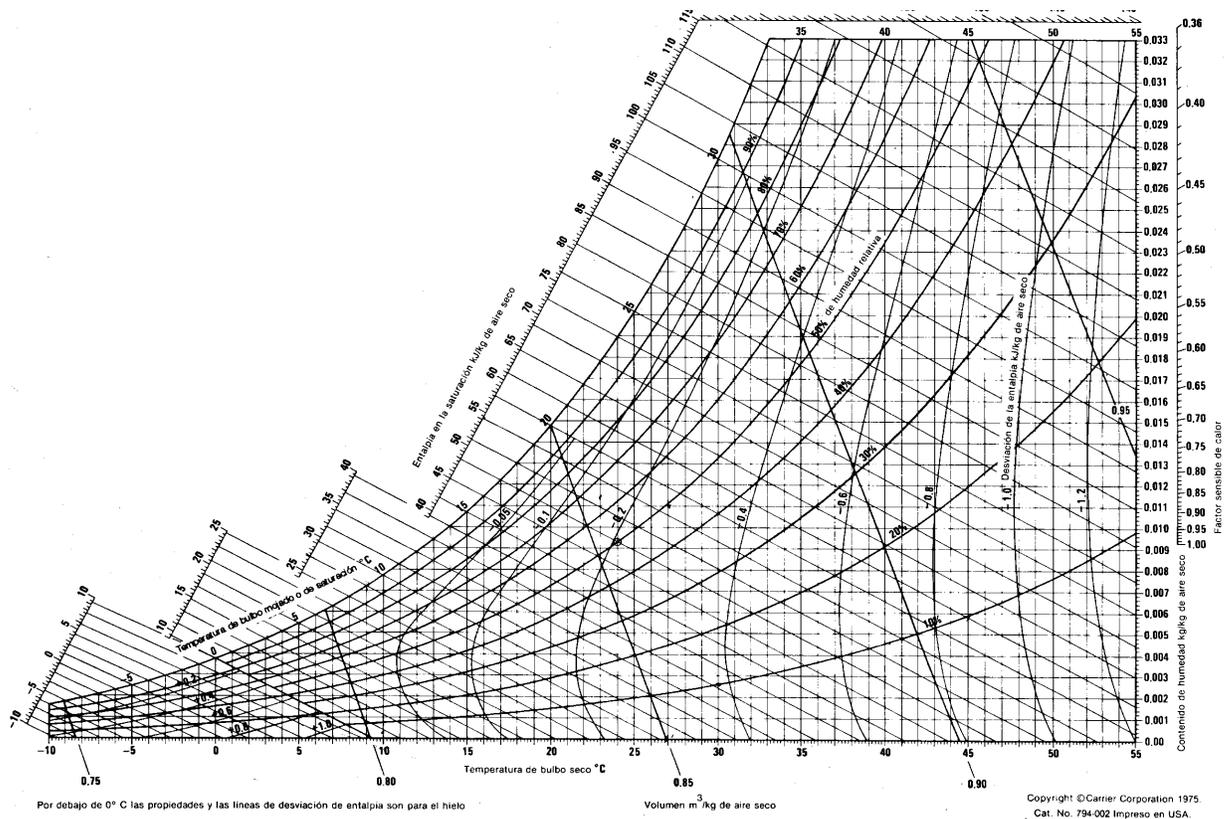
Las variables que influyen en el secado son la geometría del sólido, ya que esta determina su área de contacto con el medio secante, la temperatura, la humedad del medio secante, mientras más seco sea este, más efectivo será, y la velocidad del medio secante, esta puede ser regulada con ventiladores cuando se trata de ventilación forzada.

Como se puede ver, las propiedades del gas que se emplea para secar son muy importantes. Se emplea aire para secar, existe una gran cantidad de datos bibliográficos para sistemas agua-aire. Una de las herramientas más usadas es la carta psicrométrica. Esta muestra la humedad absoluta del aire (Habs), la humedad relativa (porcentaje RH), la temperatura de bulbo seco (Tbs) que en este caso se refiere a la temperatura del aire empleado para secar y la temperatura de bulbo húmedo (Tbh) la cual corresponde a la temperatura de un termómetro que tiene un algodón mojado en el bulbo.

Conociendo 2 de estas variables, se encuentra un punto en la gráfica psicrométrica lo que permite encontrar las demás. Esto es de gran utilidad cuando se desea encontrar las humedades absolutas y relativas de aire, ya que

estas no pueden medirse con tanta facilidad como las temperaturas de bulbo seco húmedo.

Figura 3. Gráfico psicrométrica



Fuente: Universidad Carlos III de Madrid. Laboratorio de física 2 (1 Ingeniería industrial) Ley de radiación de Stefan-Boltzmann [en línea]. Consulta: 15 de abril 2012.

El secado de los sólidos consta de varias fases en las que varía la humedad del sólido en cuestión. Esto es perfectamente ilustrado con las llamadas curvas de secado, las cuales no son más que curvas que muestran la evolución de ciertas propiedades del sólido conforme al tiempo o al contenido

de humedad. A continuación se mencionan algunas de ellas, ya que el detalle del resto de las curvas puede verse en la sección 3.1.

La curva que representa el contenido de humedad en base seca (X_{bs}) en función del tiempo demuestra que la humedad en el sólido no varía de manera lineal y homogénea sino que presenta varias etapas. Conforme el tiempo avanza el contenido de humedad en base seca comienza a descender cada vez más hasta que llega a tener una tendencia lineal. Posteriormente empieza a descender cada vez menos hasta que adquiere un comportamiento asintótico tendiendo cada vez más a un valor constante. Este valor se conoce como humedad en equilibrio (X^*). Este comportamiento demuestra que el sólido no puede quedar completamente seco, siempre conserva cierto contenido de humedad que no puede ser eliminado.

Las fases del secado son también claras en la curva de velocidad de secado por unidad de área en función del contenido de humedad en base seca (ver imagen No 5). En la primera etapa (A-B), el sólido se calienta desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de bulbo húmedo del gas.

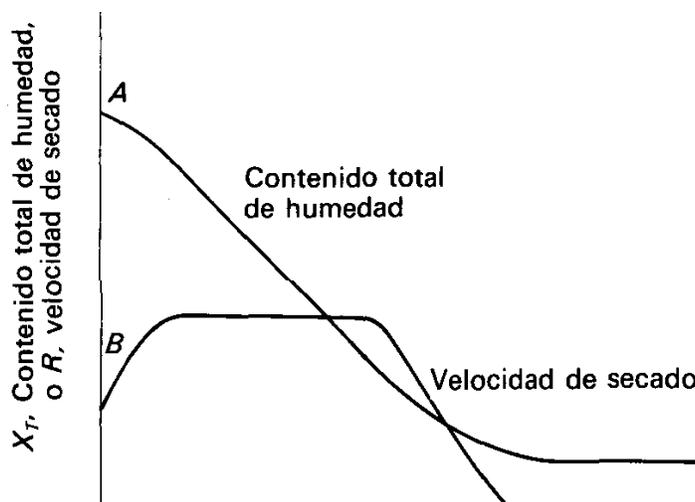
Esta etapa es de corta duración y la evaporación no es significativa. En la segunda etapa (B-C) es la de velocidad de secado constante. En esta etapa se evapora la humedad libre o no ligada del sólido y la temperatura se mantiene igual a la de bulbo húmedo del gas.

En la última etapa (C-E), la velocidad de secado se vuelve decreciente. En esta se evapora la humedad ligada, por lo que la resistencia a la evaporación es más fuerte. Para evaporar este tipo de humedad es necesario aumentar la temperatura debido a que se rompe el equilibrio térmico existente y el sólido

sobrepasa la temperatura de bulbo húmedo del gas. La transferencia de masa en esta etapa en cuestión se lleva a cabo por el fenómeno de difusión.

1.

Figura 4. **Contenido de humedad en base seca en función del tiempo**

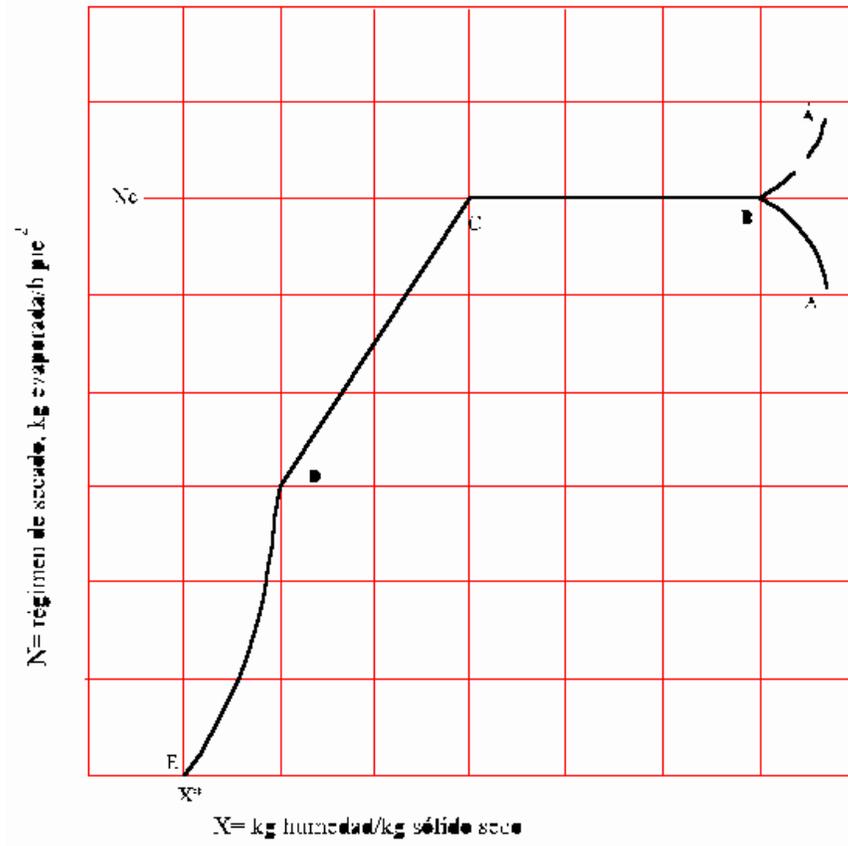


Fuente: GEANKOPLIS. Christie J. Procesos de transporte operaciones hídricos y unitarias.

p.832¹

¹MCABE Warren L. SMITH Julian C. HARRIOT Meter. *Operaciones unitarias ingeniería química*. p. 822

Figura 5. Velocidad de secado por unidad de área en función del contenido de humedad libre



Fuente: Universidad Carlos III de Madrid. Laboratorio de física 2 (1 Ingeniería industrial) Ley de radiación de Stefan-Boltzmann [en línea]. Consulta: 15 de abril 2012.

- Tipos de secadores

Pueden clasificarse en dos tipos: los que ponen el sólido directamente en contacto con el gas secante, llamados secadores adiabáticos o directos; y los secadores en los que el calor se transfiere al sólido por un medio externo los cuales son llamados no adiabáticos o indirectos por oposición a los primeros²

En el caso de los secadores adiabáticos el contacto del sólido con el medio secante puede darse de diversas formas.

- Por secado con circulación superficial en donde el gas circula sobre la superficie del sólido.
- Cuando el gas atraviesa una rejilla que contiene pedazos del sólido, llamado secado a través.
- Cuando el sólido dispuesto en partículas granulares cae a través de una corriente de gas.
- Cuando el sólido dispuesto en partículas finas es transportado por una corriente de gas con una velocidad considerable llevándolo de un lugar a otro (generalmente a un dispositivo de separación mecánico).

2.2. Conservación de los alimentos

La conservación de los alimentos es un proceso fundamental en la prevención de enfermedades. A lo largo de la historia se han descubierto varios métodos que permiten almacenar alimentos por más tiempo evitando que estos

² VAN ARSDEL. Wallace B, COPLEY Michael J. *Food Dehydration volumen I-Principles*.p.2.

se contaminen o se descompongan, de manera a no causar enfermedades, ya sea por organismos encargados de la descomposición o patógenos a la hora de ser ingeridos por el ser humano. A continuación se enunciarán algunos de los métodos más importantes que se emplean en la actualidad, así como una breve descripción de cómo estos funcionan.

2.2.1. Deshidratación de los alimentos

El proceso de deshidratación de alimentos puede definirse como la eliminación del exceso de humedad sin destrucción del tejido celular, sin el deterioro de los valores energéticos del alimento. Este proceso permite la conservación prolongada del alimento conservando gran parte de su valor nutritivo.

Dicho método comenzó a utilizarse a gran escala a partir de la Primera Guerra Mundial por su practicidad, y se intensificó en la Segunda Guerra Mundial. Sin embargo, no fue sino hasta después de esta segunda que siguió empleándose considerablemente en períodos no bélicos.

El éxito de la deshidratación como método de conservación radica en la reducción de la actividad del agua que este provoca. Al eliminar humedad hay menos partículas de agua disponibles para ser aprovechadas por los microorganismos responsables de la descomposición y contaminación de los alimentos.

Este proceso se lleva a cabo como un secado de sólidos y, por lo tanto se comporta de la manera explicada en la sección 2.1.3.1.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Las variables que se tomaron en cuenta para la realización del estudio se dividen en dos grupos: las que se fijaron desde el inicio y las que variaron y fueron monitoreadas a lo largo de las sesiones de secado.

Los variables que se fijaron desde el inicio son: las temperaturas (50 y 40 grados), la velocidad del medio secante, las dimensiones de las muestras, el espesor de muestras (muestras distribuidas en monocapa de 1 centímetro de espesor). Debido a que se empleó aire del ambiente para el secado la humedad relativa de este no fue regulada sino que únicamente monitoreada. Los detalles de elección de estos valores están especificados en la siguiente sección.

Tabla I. **Variables a monitorear para la obtención de curvas de secado**

Variable	símbolo	Unidad de medida
Contenido de humedad en base seca	X_{bs}	g H ₂ O/g sólido seco
Contenido de humedad al equilibrio	X*	g H ₂ O/g sólido seco
Contenido de humedad libre	X	g H ₂ O/g sólido seco
Humedad relativa	HR	Adimensional
Tiempo	t	min
Masa de sólido	m_s	g
Masa de humedad	H	g
Masa de sólido seco	L_s	g
Velocidad de secado	R	en g H ₂ O/(min*m ²)
Área	A	(en m ²)
Temperatura de bulbo seco	T_{bs}	⁰ C
Temperatura de bulbo húmedo	T_{bh}	⁰ C

Fuente: elaboración propia.

3.1.1. Curva No 1 (evaluación de la pérdida de humedad de camote en función del tiempo)

En el caso de la curva No 2, la variable independiente es el tiempo de secado el cual se midió de manera directa y cuyas mediciones se hicieron en minutos (min). La variable dependiente, por su parte es la masa del sólido la cual se tomó igualmente, de manera directa y cuya unidad es el gramo (g).

3.1.2. Curva No 2 (variación del contenido de humedad en base seca de camote en función del tiempo)

La variable independiente es en este caso el tiempo de secado (en min) la dependiente el contenido de humedad en base seca, el cual se calcula de la siguiente manera:

$$X_{bz} = \frac{h}{L_s}$$

Donde:

X_{bs} : contenido de humedad en base seca (g H₂O/ g sólido seco)

h: masa de humedad en g

L_s : masa de sólido seco en g

3.1.3. Curva No 3 (variación de la velocidad de secado de camote en función del contenido de humedad libre)

La variable independiente es en este caso el contenido de humedad en base seca (ver sección 3.1.3) y la variable dependiente será la velocidad de secado, la cual se calcula tal y como se muestra a continuación:

$$R = -\frac{dX}{dt} * \frac{L_s}{A}$$

Donde:

R: velocidad de secado (en g H₂O/(min*m²))

L_s: masa de sólido seco (g de sólido seco)

A: área de transferencia de masa de sólido (en m²)

$\frac{dX}{dt}$: cambio del contenido de humedad libre en el sólido en función del tiempo

(en H₂O/min*g sólido seco)

La humedad libre se define de la siguiente manera:

$$X = X_{bs} - X^*$$

Donde:

X: contenido de humedad libre (g H₂O/g sólido seco)

X_{bs}: contenido de humedad en base seca (g de sólido seco)

X*: contenido de humedad al equilibrio (g de H₂O/ g de sólido seco)

3.1.4. Curva No 4 (contenido de humedad en base seca en función de la humedad relativa)

En el caso de la curva No 4, la variable independiente es la humedad relativa del ambiente (la cual depende de las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo) y la variable dependiente corresponde al contenido de humedad en base seca.

3.2. Delimitación de campo de estudio

El presente trabajo se limitó al estudio de dos tubérculos nativos, el camote morado y el camote naranja. Se empleó únicamente camotes obtenidos en la temporada seca, ya que los obtenidos en temporada lluviosa pueden presentar diferencias significativas en la consistencia y porcentaje de fibra lo cual tendría una influencia sobre el secado. Para dichos tubérculos se trabajó con tres tipos de corte para cada uno de los tubérculos para encontrar cuál es el más eficiente para el proceso de secado. Las dimensiones de los cortes son los que se muestran en la tabla II:

Tabla II. Dimensiones de los diferentes cortes

Julianas	Cubos	rodajas
1 cm de grosor y 5 cm de largo	1 cm de lado	1 cm de grosor

Fuente: elaboración propia.

Se trabajó con masas superiores a 10g que es una cantidad considerable para ser pesada en la balanza a utilizar. Se escogió este valor elevado para disminuir la influencia de la incertidumbre de la balanza electrónica que se

empleara ($\pm 5 \cdot 10^{-4}g$) en los resultados. Las muestras se distribuyeron en la bandeja como una monocapa de 1 centímetro de espesor.

Como medio secante se empleó aire caliente con un flujo turbulento horizontal con respecto al sólido a secar. La velocidad del aire fue constante en todas las corridas ya que el horno empleado tiene la limitación que puede proporcionar únicamente una velocidad. El valor empleado fue de $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ valor que fue determinado con un anemómetro. La humedad relativa del aire entrante no se reguló sino que fue únicamente monitoreada, ya que se empleó aire del ambiente.

Por tratarse de un proceso de deshidratación de alimentos es importante que los valores nutricionales de los tubérculos se mantengan aun después de la deshidratación. En ese sentido se decidió trabajar con temperaturas que se encuentran por debajo de los 60 grados, temperatura a la cual comienza la desnaturalización de las proteínas. Sin embargo, si bien las temperaturas altas conllevan el riesgo de desnaturalizar las proteínas, las temperaturas muy bajas presentan el inconveniente que el proceso de deshidratación es muy lento. En ese sentido se eligieron temperaturas cercanas a los 60 grados. Se escogió 10 grados como factor de seguridad por lo que la temperatura más alta empleada será de 50 grados.

Adicionalmente se trabajará con una temperatura de 40 grados. Se eligieron únicamente 2 temperaturas de estudio debido a que al elegir un número mayor aumentaría la cantidad de sesiones de secado y esto limitaría el número de corridas a realizar (en el presente estudio se realizaron 3 corridas para disminuir el error de exactitud)

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Augusto José Barrientos Rodríguez
- Asesor: Ing. Jorge Godínez
- Co-asesora: Inga. Mercedes Roquel

3.4. Recursos materiales disponibles

Las pruebas de secado se llevaron a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Química Industrial de la Facultad Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Allí se cuenta con un horno Premlab de flujo forzado por inundación de 3 pies cúbicos. El equipo tiene únicamente una velocidad de viento. Se trata de un flujo horizontal al sólido que desea secarse, el cual entra por un costado y sale por el otro. Dicho equipo cuenta también, con un orificio para introducir un termómetro y medir de esta manera la temperatura de bulbo seco y húmedo. Se emplearon bandejas hechas con malla de metal, para aumentar el contacto de los tubérculos con el medio secante.

El pesado de las muestra se llevó a cabo en una balanza electrónica, con una incerteza de $5 \cdot 10^{-4}g$.

Para la medición de la temperatura de bulbo húmedo se emplearon termómetros de mercurio. La determinación de la temperatura de bulbo seco por su parte, se hizo leyendo directamente la temperatura del monitor del horno.

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

El estudio que se llevó a cabo fue de naturaleza empírica-experimental, es decir que, se basó en datos reales obtenidos directamente por el experimentador. Asimismo, se trata de un estudio de tipo cuantitativo, ya que se obtuvieron mediciones directas o indirectas de las magnitudes estudiadas con la ayuda de instrumentos de medición.

La etapa experimental consistió exclusivamente, en la recopilación de datos durante el proceso de secado. El proceso de recabación de información se realizó de manera separada para cada corte de cada tubérculo obteniendo así información específica de cada uno de ellos. Con los datos obtenidos se graficaron las 4 diferentes curvas para cada corte de cada tubérculo obteniendo, de esta manera 12 juegos de curvas de secado por tubérculo.

Finalmente, se llevó a cabo la etapa de análisis en la cual se estudiaron las tendencias y valores de las curvas comparando los resultados para los diferentes cortes. En este análisis se intercompararon los resultados de los diferentes cortes pertinentes a un mismo tubérculo, a manera de determinar cuál de ellos es el más adecuado para emplearse en el secado.

En el trabajo se estudió dos tipos diferentes de tubérculos, el camote morado y el naranja. Para cada uno de ellos se trabajó con tres cortes, diferentes siendo estos: en rodajas, en julianas y en cubos. Esto se hizo con el objetivo de variar el área de contacto y la forma del sólido a secar, para poder finalmente comparar los datos obtenidos y encontrar cuál es el corte más eficiente para el secado.

Cada tubérculo se trabajó de manera individual empleando muestras mayores a 10 gramos por cada corte en cada sesión de secado. La unidad de medida de la balanza es el gramo, por lo que se puede decir que 10 gramos es una cantidad considerable para ser pesada. Se escogió este valor elevado para disminuir la influencia de la incertidumbre de la balanza ($\pm 5 \cdot 10^{-4}$ g) en los resultados.

Para asegurar la precisión de los resultados se realizaron 3 corridas para cada uno de los cortes y se obtuvo un promedio de los datos el cual fue el empleado en las curvas de secado. El número de corridas se limitó, únicamente a 3, ya que como se trata de una cantidad considerable de sesiones de secado a realizar (2 tubérculos por 3 cortes por 2 temperaturas de estudio da un total de 12 sesiones de secado por cada corrida), el hecho de aumentar el número de corridas subiría el volumen de información a manejar, lo cual complicaría el estudio innecesariamente. Al contar con todas las mediciones necesarias se procederá a la realización de las curvas de secado.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

En la sección que se presenta a continuación se describirá cuáles fueron los pasos de experimentación para la obtención de la información, así como la manera en que esta fue distribuida y ordenada para permitir los cálculos posteriores, necesarios para la determinación de las curvas de secado.

3.6.1. Determinación de la masa y el contenido de humedad en base seca

La masa de cada una de los tubérculos tomó cada cierto intervalo de tiempo empleando una balanza digital. Dicha balanza se encuentra afuera del

horno por lo que es necesario retirar las bandejas cada cierto para pesarlas. Esto tiene la desventaja que aporta cierta variabilidad al proceso de secado, ya que las muestras se exponen momentáneamente a las condiciones externas. Sin embargo, se considera que el error debido a esto es despreciable.

La toma de las masas se lleva a cabo hasta que se llegue a una masa constante. Conociendo las diferentes masas a lo largo del tiempo y la masa de sólido seco se procederá a calcular el contenido de humedad en base seca.

3.6.2. Determinación de la temperatura y la humedad relativa

Las temperaturas de bulbo seco y húmedo se tomaron por el orificio de la parte superior del horno. Para la realización de las medidas de temperatura de bulbo húmedo se empleó un termómetro largo, de manera a que las mediciones se hicieran lo más cerca posible del sólido. El termómetro tenía un algodón húmedo sujetado en el bulbo a manera a obtener la Temperatura de bulbo húmedo. La temperatura de bulbo seco por su parte, fue directamente obtenida del monitor del horno el cual muestra una medición constante de esta.

Se realizaron tres medidas y el promedio fue el empleado para los resultados. Esto con el objetivo de reducir la probabilidad de obtener un error craso en los resultados.

Una vez obtenidos los valores de las temperaturas se utilizaron tablas de datos psicométricos para aire-agua encontradas en la bibliografía, para obtener los valores de humedad relativa correspondientes.

3.6.3. Calidad de los resultados y control del error

Con el objetivo de obtener resultados precisos, se realizaron varias corridas para cada corte. Empleando la herramienta estadística de la Q de Dixon, se eliminaron los valores sospechosos evitando de esta manera que los resultados sean influenciados por errores crasos. Una vez eliminados dichos valores se obtuvieron las medias de los datos restantes y estas fueron las que se emplearon como valores para los cálculos de las diferentes curvas de secado.

El control del error de precisión de los resultados se llevó a cabo en dos partes:

- En la primera se analizó el error de precisión por incertidumbre, basándose en las incertidumbres de los instrumentos empleados.
- Para la determinación de las incertidumbres de las variables indirectas, es decir las que se calculan a con fórmulas partir de los datos medidos, se utilizaron derivadas parciales de dichas ecuaciones.
- En la segunda parte se analizó el error de precisión por desviación utilizando para esto ecuación de la desviación estándar.

Tabla III. Porcentaje de error para el camote morado a T=40 °C

t (en mi n)	Cubos				Julianas				Rodajas			
	Masa		Xbs		Masa		Xbs		Masa		Xbs	
	Δ% Masa	%Error por desviación	Δ% Xbs	%Error por desviación	Δ% Masa	%Error por desviación	Δ% Xbs	%Error por desviación	Δ% Masa	%Error por desviación	Δ% Xbs	%Error por desviación
0	0,00	0,00	7,75	0,00	0,00	4,52	7,75	0,00	0,00	5,82	7,75	0,00
30	0,00	0,30	8,15	0,33	0,00	4,27	8,08	0,60	0,00	6,78	8,04	1,45
60	0,00	0,96	8,74	1,09	0,00	4,64	8,49	0,86	0,00	7,76	8,43	3,19
90	0,00	2,50	9,10	2,83	0,00	4,04	8,76	1,71	0,00	8,90	8,67	4,94
120	0,01	2,42	9,64	2,78	0,00	4,51	9,17	0,47	0,00	8,44	9,00	4,32
150	0,01	3,26	10,11	3,77	0,00	3,91	9,52	1,78	0,00	9,48	9,32	6,21
180	0,01	3,34	10,74	3,92	0,00	3,71	9,97	1,80	0,00	9,87	9,66	6,90
210	0,01	3,70	11,22	4,40	0,00	3,73	10,36	2,10	0,00	10,54	10,03	8,06
240	0,01	3,72	11,78	4,47	0,00	3,58	10,80	2,73	0,00	11,17	10,44	9,27
270	0,01	3,29	12,39	4,02	0,00	3,25	11,22	2,82	0,00	11,39	10,85	9,78
300	0,01	4,09	12,95	5,07	0,00	3,71	11,69	2,89	0,00	12,17	11,25	11,46
330	0,01	3,45	13,36	4,33	0,00	3,90	12,18	5,53	0,00	10,31	11,41	8,34
360	0,01	4,96	14,05	6,36	0,01	4,08	12,58	3,28	0,00	13,62	12,14	14,89
390	0,01	4,23	14,49	5,50	0,01	4,91	12,94	3,51	0,00	13,52	12,45	15,07
420	0,01	4,54	14,96	6,00	0,01	4,94	13,36	3,64	0,00	13,75	12,81	15,89
450	0,01	5,38	15,42	7,23	0,01	4,78	13,74	4,23	0,00	24,59	13,19	17,62
480	0,01	5,12	15,97	7,02	0,01	5,21	14,21	4,30	0,00	14,41	13,67	18,07
510	0,01	5,64	16,40	7,87	0,01	5,65	14,58	5,34	0,00	15,05	14,07	20,15
540	0,01	5,82	16,79	8,26	0,01	5,76	14,97	5,26	0,01	15,09	14,46	20,81

Fuente: elaboración propia.

En la tabla III, todos los valores obtenidos fueron validados con la prueba de la Q de Dixon, para una probabilidad de 0,90³

³ DICK, John. Química analítica. p.65 .

Tabla IV. Porcentaje de error para el camote morado a T=50 °C

t (en mi n)	Cubos				Julianas				Rodajas			
	Masa		Xbs		Masa		Xbs		Masa		Xbs	
	Δ% Masa	%Error por desviación	Δ% Xbs	%Error por desviación	Δ% Masa	%Error por desviación	Δ% Xbs	%Error por desviación	Δ% Masa	%Error por desviación	Δ% Xbs	%Error por desviación
0	0,00	8,23	7.75	0	0,00	6,94	7,75	0,00	0,00	6,65	7,75	0,00
30	0,00	9,29	8.70	4,53	0,00	5,66	8,35	1,87	0,00	6,05	8,18	0,83
60	0,00	9,18	9.49	5,13	0,00	5,65	8.78	1,94	0,00	5,54	8,62	1,58
90	0,00	9,20	10.31	5,75	0,00	6,11	9,30	1,74	0,00	5,05	9,03	2,34
120	0,01	10,06	11.24	7,72	0,00	6,51	9,82	2,39	0,00	4,96	9,49	2,53
150	0,01	10,42	12.18	8,52	0,00	6,97	10,40	2,68	0,00	4,90	9,97	2,69
180	0,01	11,02	13.17	10,41	0,00	7,50	11,00	2,96	0,00	4,81	10,49	2,91
210	0,01	11,83	14.07	12,24	0,00	7,76	11,50	2,71	0,00	4,63	10,95	3,29
240	0,01	12,78	14.99	14,66	0,00	8,08	12,00	3,73	0,00	4,55	11,44	3,52
270	0,01	13,55	15.85	17,09	0,00	8,25	12,60	4,11	0,00	4,58	11,90	3,58
300	0,01	14,23	16.91	20,28	0,00	8,32	13,20	4,56	0,00	4,58	12,51	3,71
330	0,01	14,73	17.43	22,50	0,00	8,28	13,60	4,45	0,00	4,52	12,81	3,89
360	0,01	15,57	18.21	26,50	0,00	7,91	14,10	3,82	0,00	4,40	13,30	4,23
390	0,01	15,99	18.90	29,59	0,00	8,01	14,60	3,79	0,00	4,48	13,77	4,23
420	0,01	16,43	19.62	33,47	0,00	7,98	15,10	3,51	0,00	4,38	14,29	4,58
450	0,01	16,73	20.28	37,35	0,00	8,03	15,60	3,56	0,00	4,49	14,79	4,54
480	0,01	16,82	20.80	40,40	0,00	8,30	16,00	4,36	0,00	4,62	15,25	4,41

Fuente: elaboración propia.

En la tabla III todos los valores obtenidos fueron validados con la prueba de la Q de Dixon para una probabilidad de 0,90⁴

⁴DICK, John. Química analítica. p.65 .

Tabla V. Porcentaje de error para el camote naranja a T=40 °C

t (en mi n)	Cubos				Julianas				Rodajas			
	Masa		Xbs		Masa		Xbs		Masa		Xbs	
	Δ% Masa	%Error por desviación	Δ% Xbs	%Error por desviación	Δ% Masa	%Error por desviación	Δ% Xbs	%Error por desviación	Δ% Masa	%Error por desviación	Δ% Xbs	%Error por desviación
0	0,00	3,10	9,87	0,00	0,00	5,42	9,87	0,00	0,00	23,35	9,87	0,00
30	0,00	2,62	10,29	0,75	0,00	5,79	10,13	0,74	0,00	23,92	10,05	0,79
60	0,01	2,65	10,88	0,99	0,00	6,32	10,54	1,65	0,00	25,16	10,45	2,53
90	0,01	2,29	11,51	1,49	0,00	6,39	10,92	1,89	0,00	25,82	10,79	3,52
120	0,01	2,23	12,37	1,51	0,00	6,75	11,37	2,62	0,00	26,63	11,27	4,80
150	0,01	2,45	13,08	1,26	0,00	7,22	11,85	3,50	0,00	27,47	11,70	6,31
180	0,01	2,67	13,99	2,56	0,00	7,51	12,37	3,94	0,00	28,16	12,20	7,54
210	0,01	3,08	14,99	3,92	0,00	7,67	12,93	4,31	0,00	28,87	12,69	8,89
240	0,01	3,11	16,14	4,07	0,00	8,31	13,57	5,49	0,00	29,81	13,34	10,81
270	0,01	2,71	17,32	3,86	0,00	8,49	14,22	6,20	0,00	30,69	13,92	12,68
310	0,01	2,63	19,11	2,63	0,00	8,97	15,13	6,92	0,00	31,88	14,85	15,76
330	0,01	2,70	19,98	2,41	0,00	9,38	15,63	7,91	0,00	32,36	15,29	17,20
360	0,01	2,63	21,41	2,86	0,00	9,56	16,41	8,60	0,01	33,16	16,03	19,83
390	0,01	1,99	23,11	10,57	0,01	10,11	17,19	10,19	0,01	33,86	16,76	22,49
420	0,01	2,54	24,17	3,66	0,01	10,09	17,98	10,71	0,01	34,75	17,56	25,99
450	0,01	2,85	25,68	3,73	0,01	10,43	18,83	12,21	0,01	35,41	18,39	29,33
480	0,01	2,93	26,79	3,14	0,01	10,58	19,48	13,21	0,01	36,06	19,05	32,90
520	0,01	2,95	28,42	1,51	0,01	10,56	20,50	14,40	0,01	36,89	20,07	38,58
540	0,01	3,10	29,17	1,76	0,01	10,56	20,96	15,01	0,01	37,13	20,58	41,35

Fuente: elaboración propia.

En la tabla III todos los valores obtenidos fueron validados con la prueba de la Q de Dixon para una probabilidad de 0,90⁵.

⁵DICK, John. Química analítica. p.65 .

Tabla VI. Porcentaje de error para el camote naranja a T=50 °C

t (en mi n)	Cubos				Julianas				Rodajas			
	Masa		Xbs		Masa		Xbs		Masa		Xbs	
	Δ% Masa	%Error por desviación	Δ% Xbs	%Error por desviación	Δ% Masa	%Error por desviación	Δ% Xbs	%Error por desviación	Δ% Masa	%Error por desviación	Δ% Xbs	%Error por desviación
0	0,00	4,28	9,87	0,00	0,00	12,68	9,87	0,00	0,00	6,16	9,87	0,00
30	0,00	3,39	10,88	1,47	0,00	12,13	10,53	1,28	0,00	5,22	10,30	2,00
60	0,00	4,29	11,79	4,36	0,00	12,61	11,12	1,66	0,00	6,75	10,75	1,64
90	0,01	3,58	12,86	2,35	0,00	12,41	11,80	1,37	0,00	8,15	11,19	4,38
120	0,01	4,44	13,73	3,66	0,00	12,45	12,34	2,16	0,00	7,11	11,78	2,91
150	0,01	4,47	15,16	4,50	0,00	12,79	13,25	2,13	0,00	7,26	12,51	3,68
180	0,01	4,93	16,40	5,47	0,00	13,23	14,16	2,61	0,00	7,63	13,21	4,39
210	0,01	5,53	17,80	7,59	0,00	14,03	15,17	4,17	0,00	7,89	13,93	5,21
240	0,01	6,16	19,02	10,15	0,00	14,35	16,04	4,84	0,00	8,33	14,65	6,05
270	0,01	6,46	20,41	12,77	0,01	15,05	17,15	6,45	0,00	8,66	15,48	7,15
300	0,01	6,63	21,76	14,60	0,01	15,54	18,13	7,75	0,00	8,87	16,32	7,86
330	0,01	7,02	23,06	17,81	0,01	15,90	19,10	9,56	0,00	9,09	17,19	8,74
360	0,01	7,20	24,33	21,42	0,01	16,34	20,03	11,58	0,00	9,40	18,05	9,79
390	0,01	7,37	25,56	26,54	0,01	16,73	21,04	13,67	0,00	9,51	18,94	10,68
420	0,01	7,54	26,73	33,98	0,01	17,18	21,99	16,79	0,00	9,63	19,83	11,84
450	0,01	7,64	27,72	43,79	0,01	17,56	22,84	19,61	0,00	9,78	20,60	12,94

Fuente: elaboración propia.

En la tabla III todos los valores obtenidos fueron validados con la prueba de la Q de Dixon para una probabilidad de 0,90⁶.

⁶DICK, John. Química analítica. p.65 .

3.6.4. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

La información preliminar obtenida para la realización de las curvas de secado se organizó como se muestra en la tabla VII:

Tabla VII. **Variables a medir**

t	Tbh	Tbs	m
t_1	Tbh_1	Tbs_1	m_1
t_2	Tbh_2	Tbs_2	m_2
t_3	Tbh_3	Tbs_3	m_3
'''
t_n	Tbh_n	Tbs_n	m_n

Fuente: elaboración propia.

Donde:

t: tiempo de secado en h

Tbh: temperatura de bulbo húmedo en $^{\circ}\text{C}$

Tbs: temperatura de bulbo seco en $^{\circ}\text{C}$

m: masa en g

n: número total de muestras tomadas para cada corrida

Adicionalmente se especificará la velocidad de viento empleada para cada corrida.

Posteriormente se procedió a hacer los cálculos y conversiones necesarias para obtener los datos que se emplean para las curvas propiamente. Dichos datos se tabularon como se describe en la tabla VII:

Tabla VIII. Datos para realización de curvas

cur		cur	
va 1		va 2	
Xbs	t	M	t
Xbs ₁	t ₁	m ₁	t ₁
Xbs ₂	t ₂	m ₂	t ₂
Xbs ₃	t ₃	m ₃	t ₃
...
Xbs _n	t _n	m _n	t _n
cur		cur	
va 3		va 4	
Hr	t	R	Xbs
Hr ₁	t ₁	Xbs ₁	Xbs ₁
Hr ₂	t ₂	Xbs ₂	Xbs ₂
Hr ₃	t ₃	Xbs ₃	Xbs ₃
...
Hr _n	t _n	Xbs _n	Xbs _n

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, todos los datos correspondientes a las curvas fueron graficados para apreciar de manera visual las tendencias.

3.7. Análisis estadístico

Los datos encontrados en la experimentación se someterán a un primer análisis para descartar los datos sospechosos que posiblemente conlleven un error craso. Para ello se empleará la herramienta de la Q de Dixon.

Posteriormente se efectuará un análisis de la dispersión de los datos, empleando la desviación estándar. Dicho análisis permitirá evaluar la precisión con la que los datos obtenidos pueden predecir el comportamiento del tubérculo a lo largo del proceso de secado.

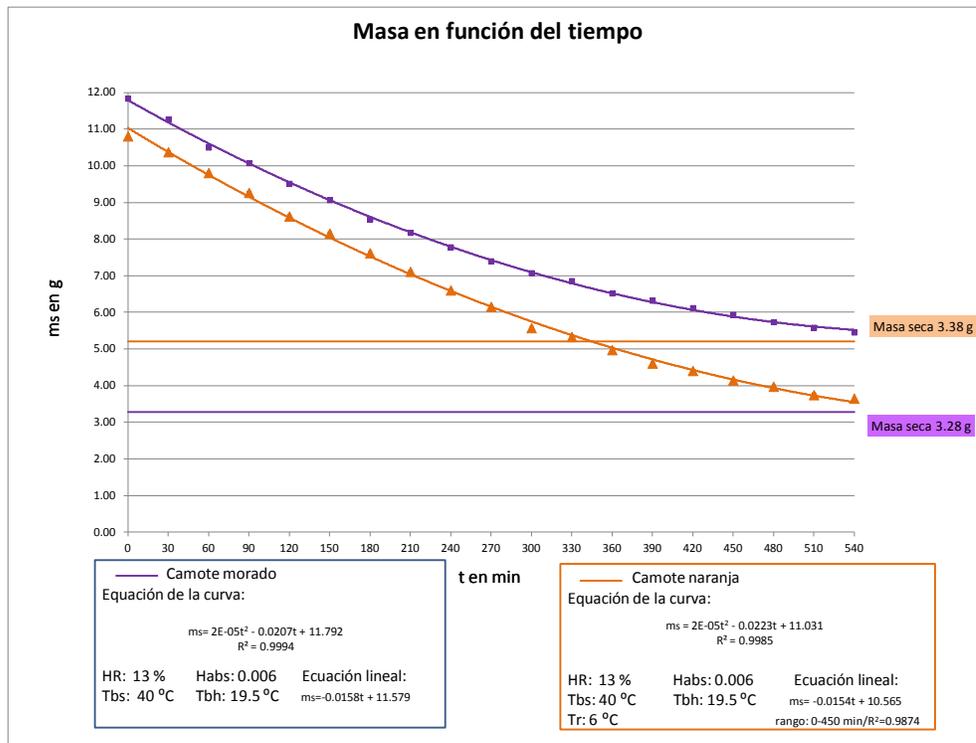
Tras haber empleado los datos obtenidos para calcular los términos necesarios para trazar las curvas de secado se evaluará la probabilidad de adaptar modelos matemáticos a dichas curvas. La validez de los modelos se evaluará empleando el coeficiente de correlación relativo R^2 .

4. RESULTADOS

Geometría de cubos:

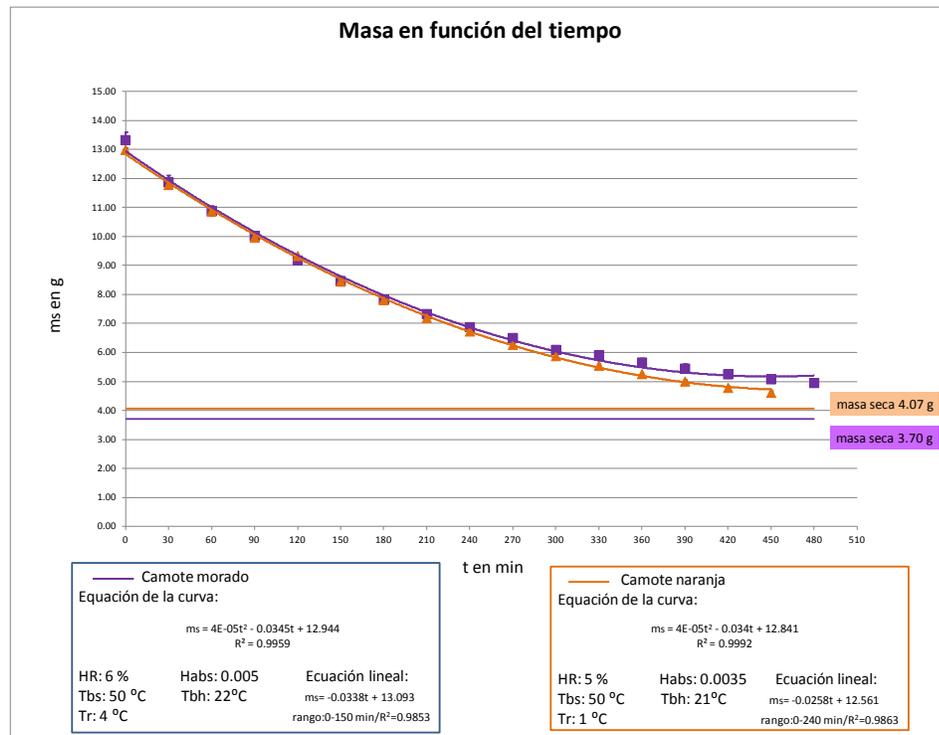
Tras haber realizado las sesiones de secado tanto como para el camote morado como para el naranja se logró la obtención de las gráficas de secado así como de los modelos matemáticos que se adaptan a ellas. A continuación se presentan las curvas de sacado obtenidas para los dos tipos de camote, para los tres cortes estudiados, comparando en cada una de ellas la evolución del camote morado con la del camote naranja. Inicialmente se presentan las tendencias obtenidas para la geometría de cubos.

Figura6. Evaluación de la pérdida de humedad de camote en función del tiempo para la geometría de corte encubos a 40 grados



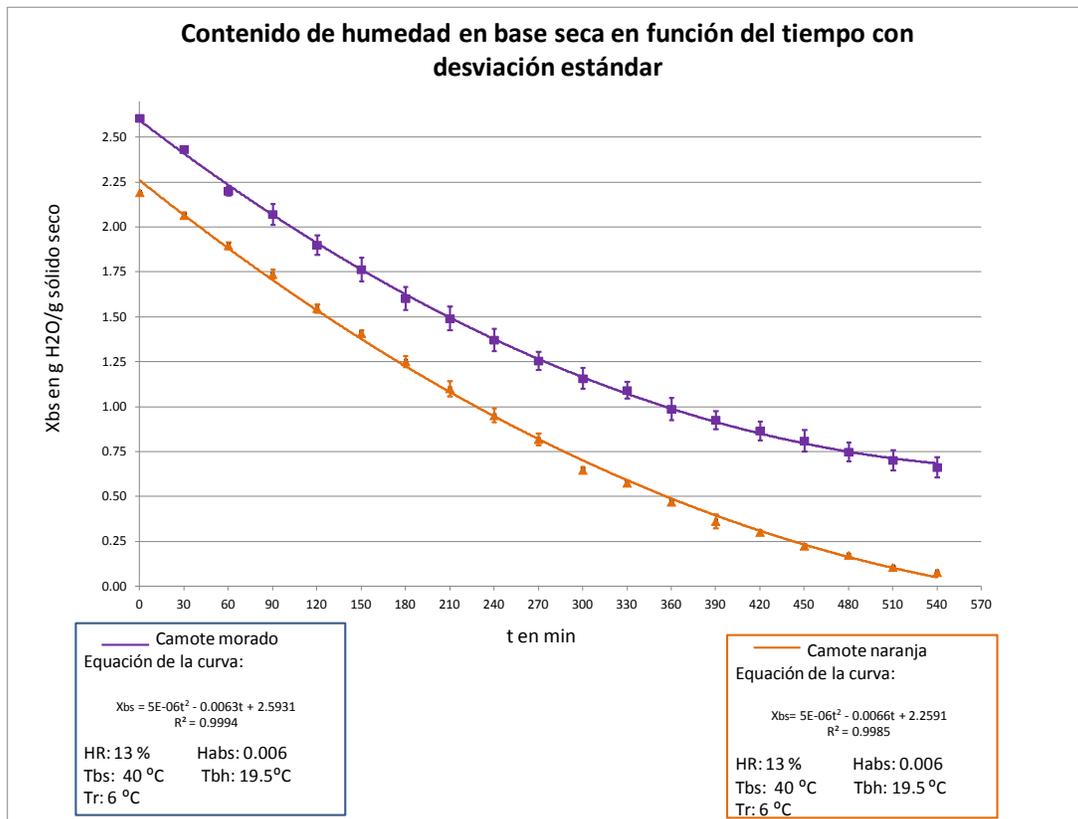
Fuente: elaboración propia, con base a resultados obtenidos.

Figura7. Evaluación de la pérdida de humedad de camote en función del tiempo para la geometría de corte en cubos a 50 grados



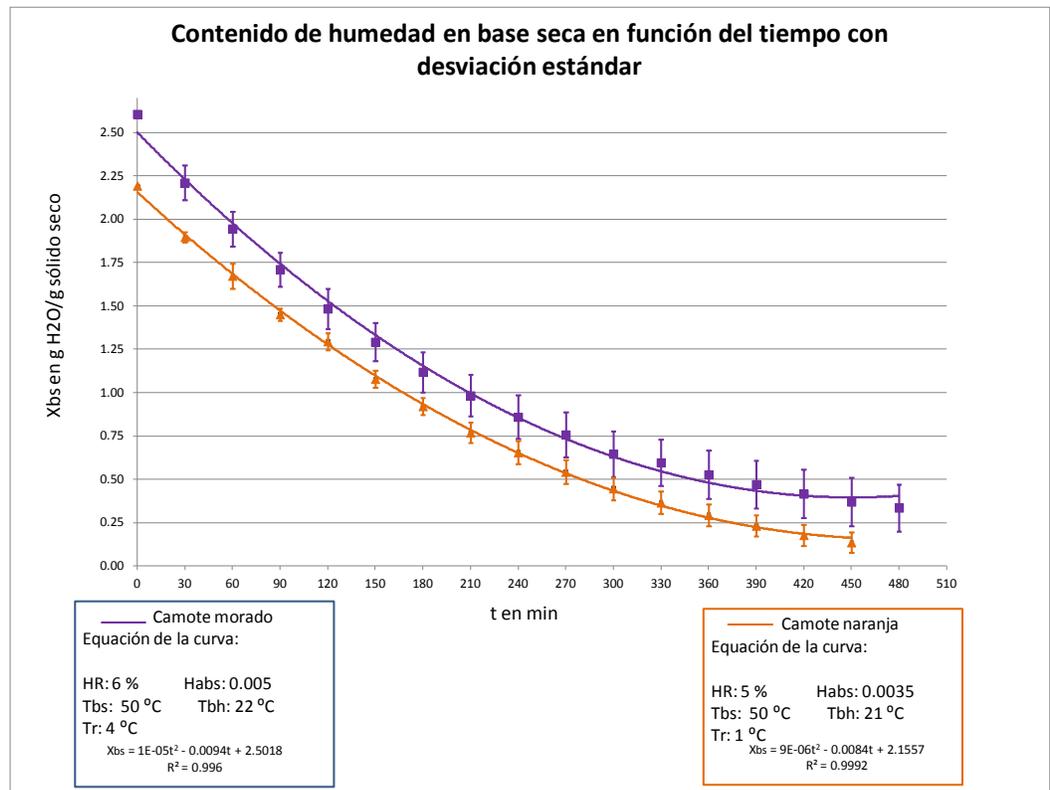
Fuente: elaboración propia, con base a resultados obtenidos.

Figura8. **Variación del contenido de humedad en base seca de camote en función del tiempo para la geometría de corte en cubos a 40 grados**



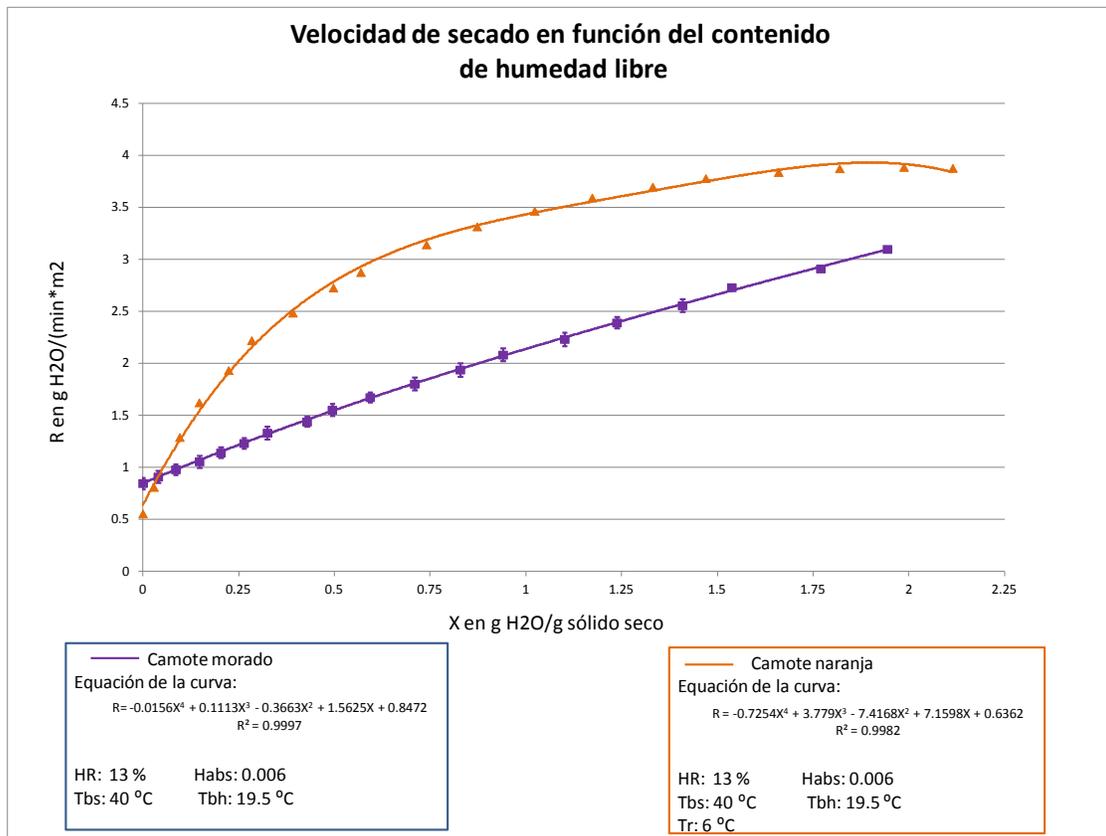
Fuente: elaboración propia, con base a resultados obtenidos.

Figura9. **Variación del contenido de humedad en base seca de camote en función del tiempo para la geometría de corte en cubos a 50 grados**



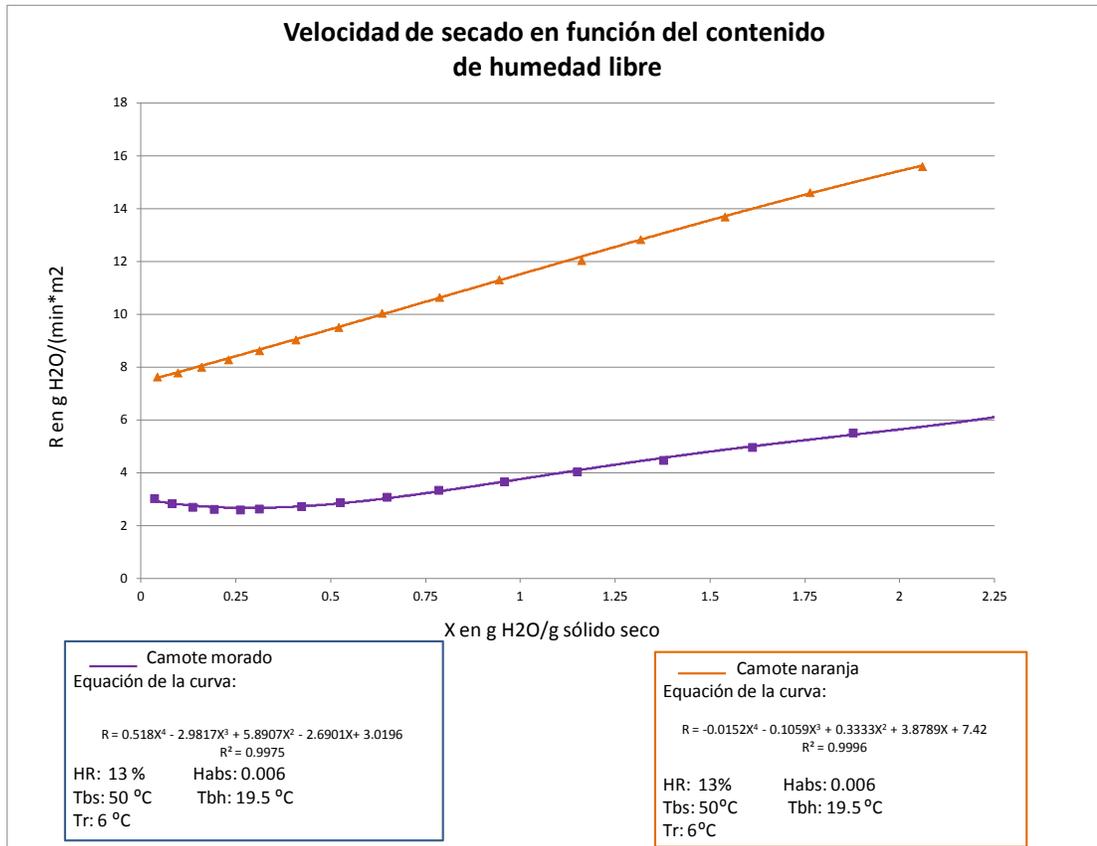
Fuente: elaboración propia, con base a resultados obtenidos.

Figura10. Variación de la velocidad de secado de camote en función del contenido de humedad libre para la geometría de corte en cubos a 40 grados



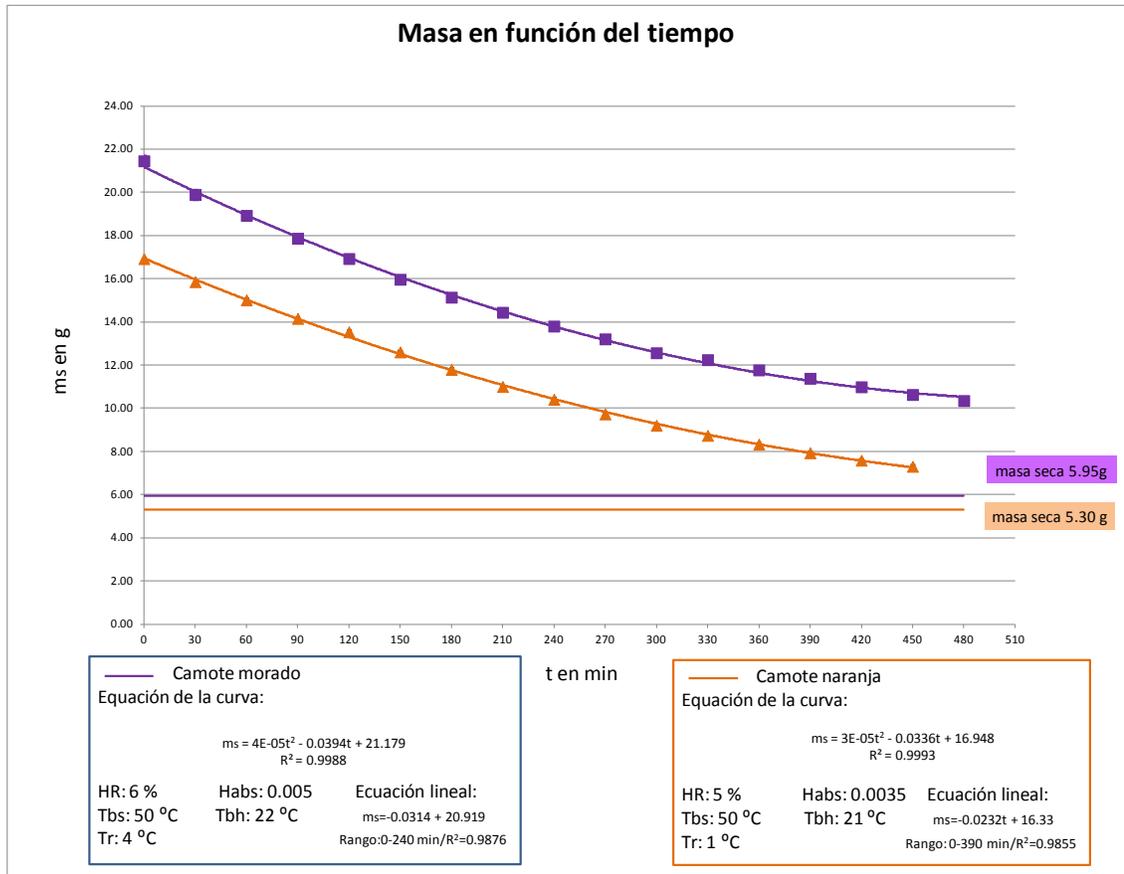
Fuente: elaboración propia, con base a resultados obtenidos.

Figura11. Variación de la velocidad de secado de camote en función del contenido de humedad libre para la geometría de corte en cubos a 50 grados



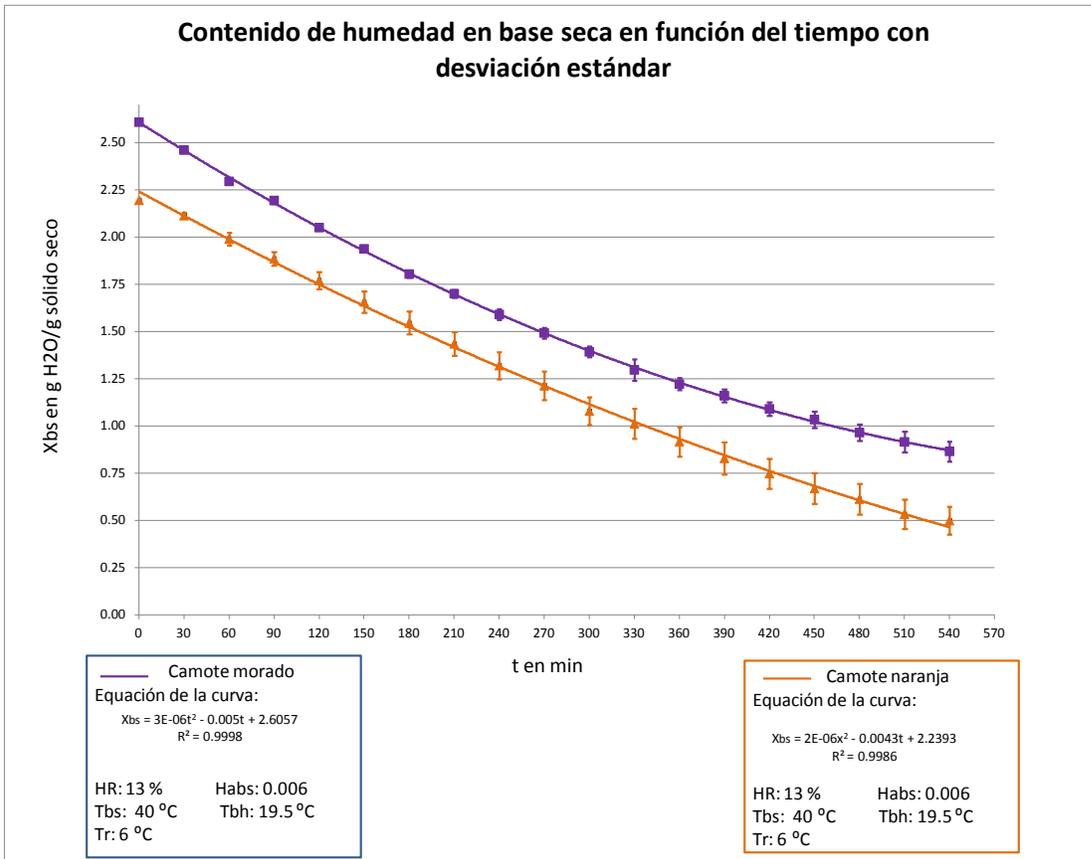
Fuente: elaboración propia, con base a resultados obtenidos.

Figura13. Evaluación de la pérdida de humedad de camote en función del tiempo para la geometría de corte en julianas a 50 grados



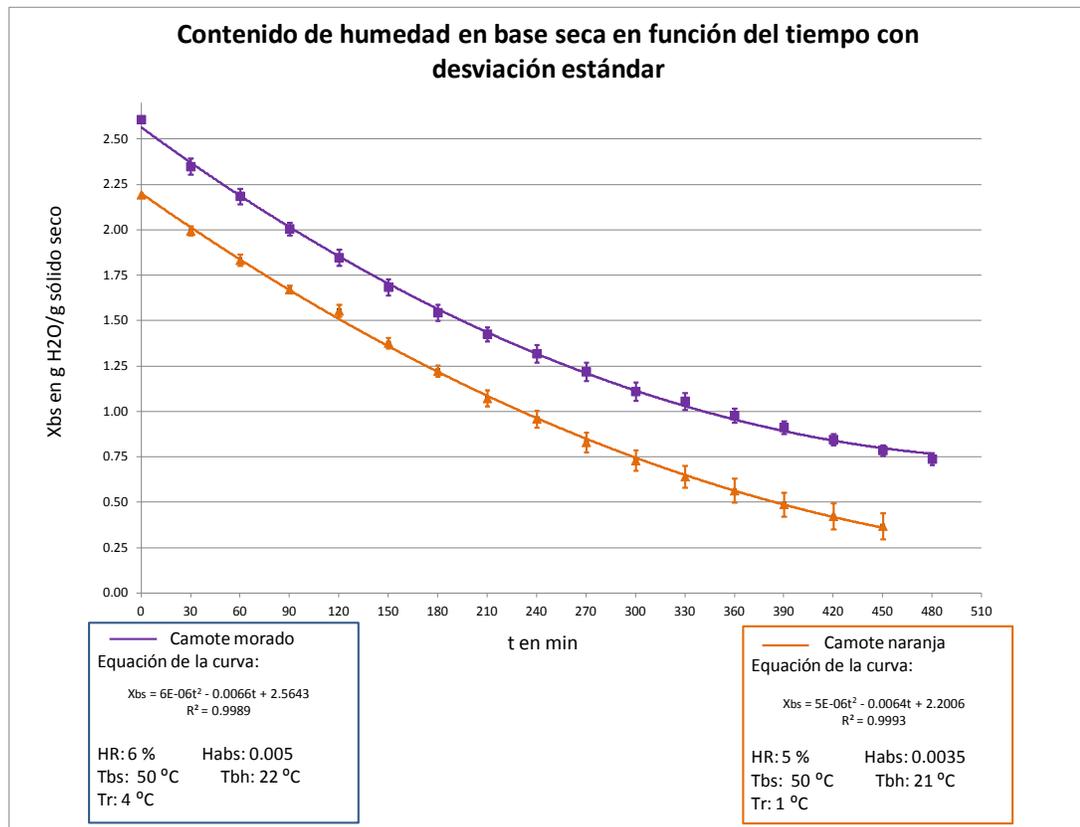
Fuente: elaboración propia, con base a resultados obtenidos.

Figura14. Variación del contenido de humedad en base seca de camote en función del tiempo para la geometría de corte en julianas a 40 grados



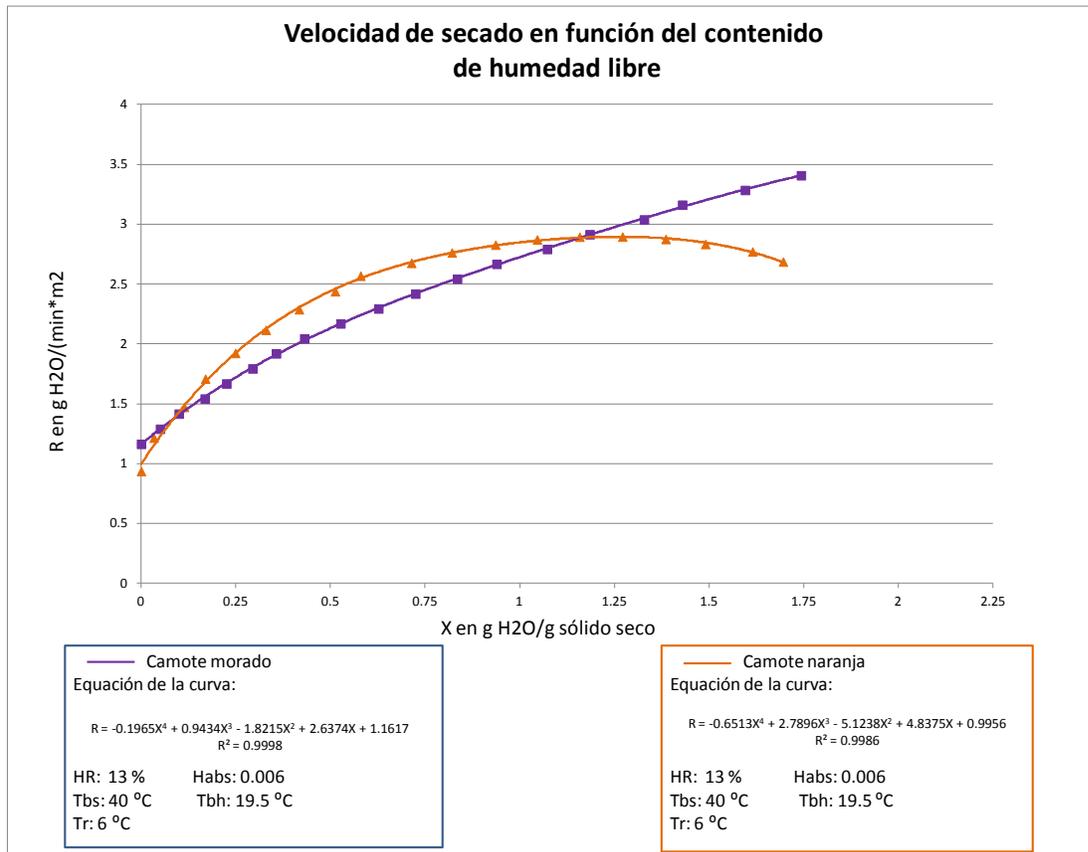
Fuente: elaboración propia, con base a resultados obtenidos.

Figura15. Variación del contenido de humedad en base seca de camote en función del tiempo para la geometría de corte en julianas a 50 grados



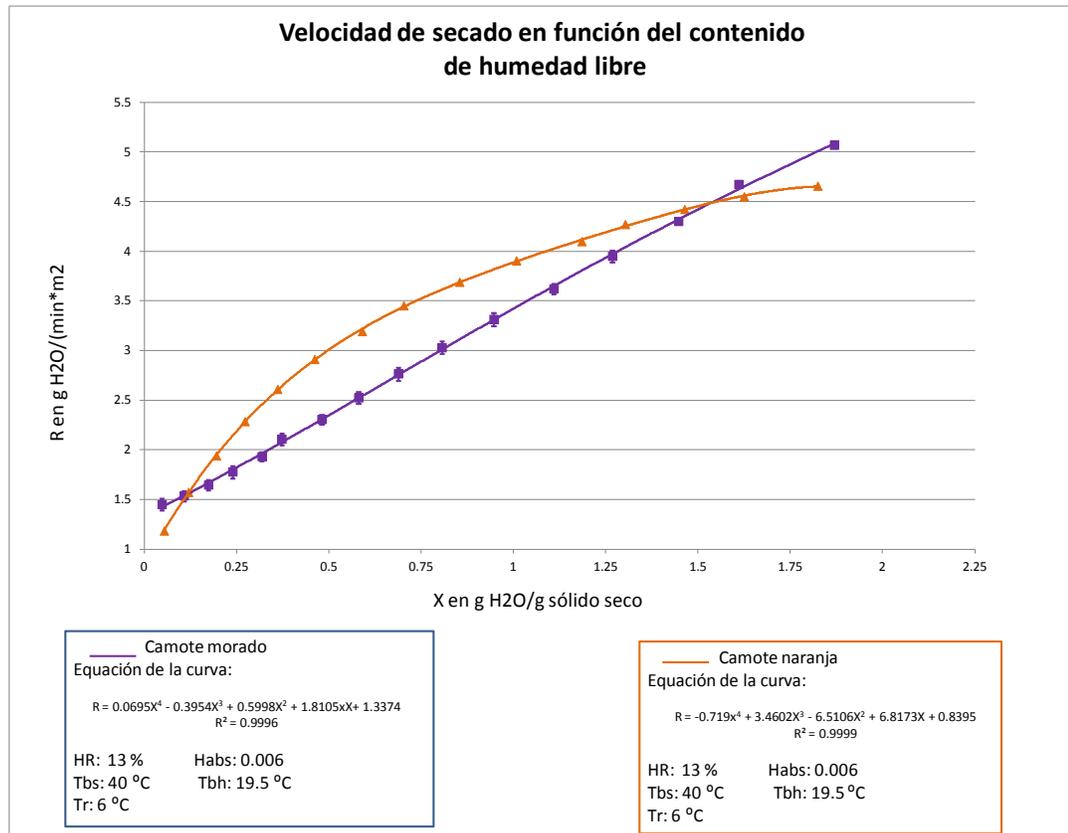
Fuente: elaboración propia, con base a resultados obtenidos.

Figura16. Variación de la velocidad de secado de camote en función del contenido de humedad libre para la geometría de corte en julianas a 40 grados



Fuente: elaboración propia, con base a resultados obtenidos.

Figura17. Variación de la velocidad de secado de camote en función del contenido de humedad libre para la geometría de corte en julianas a 50 grados

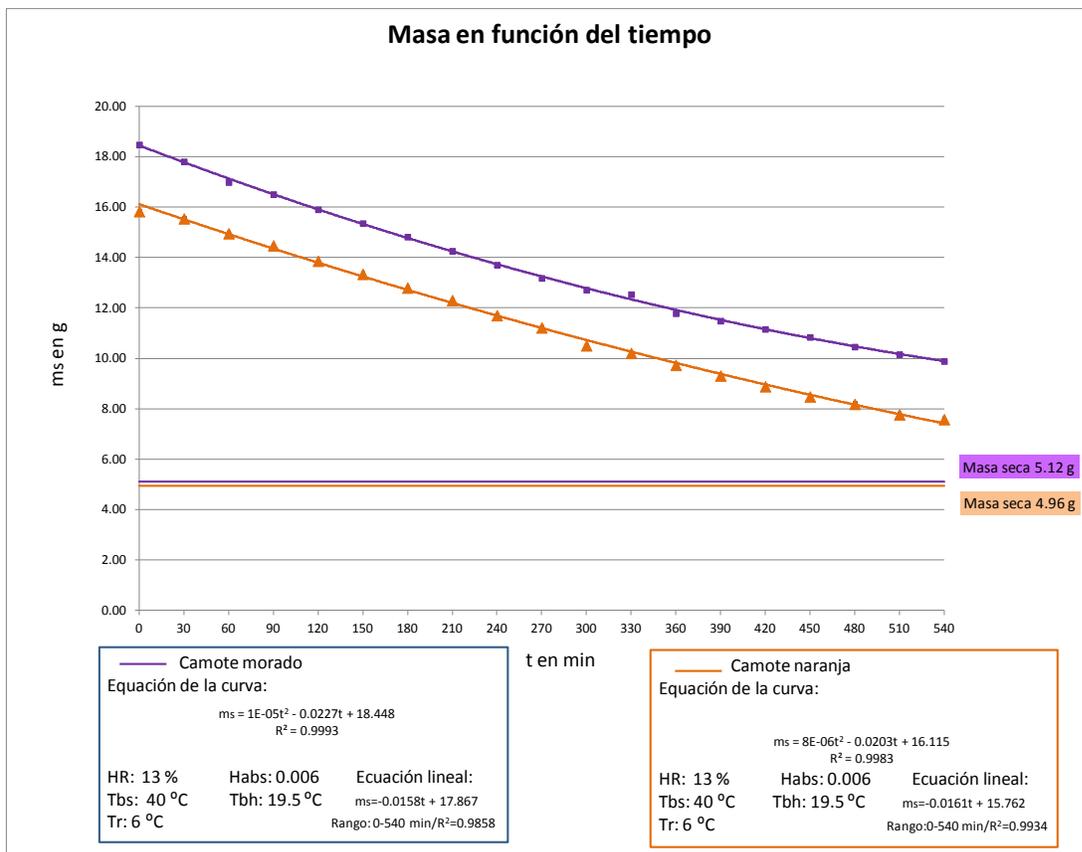


Fuente: elaboración propia con, base a resultados obtenidos.

Geometría de rodajas:

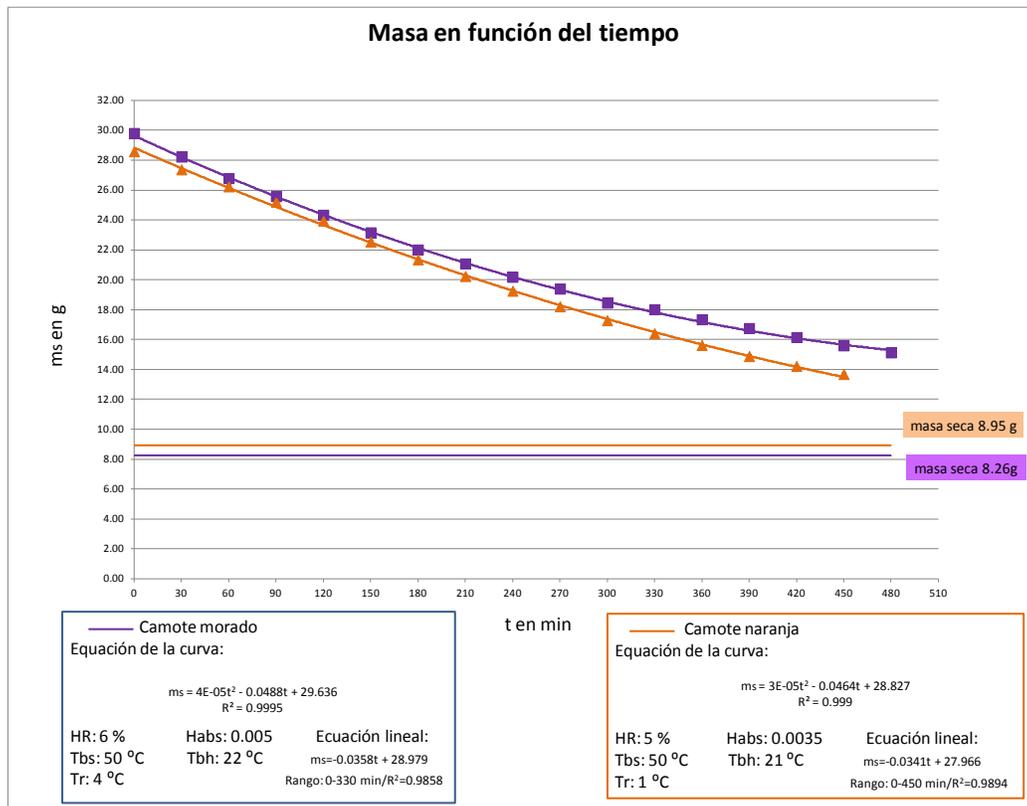
Finalmente se presentaran a continuación las curvas obtenidas para la geometría de rodajas, comparando nuevamente las tendencias obtenidas para los dos tipos de camote.

Figura18. Evaluación de la pérdida de humedad de camote en función del tiempo para la geometría de corte en rodajas a 40 grados



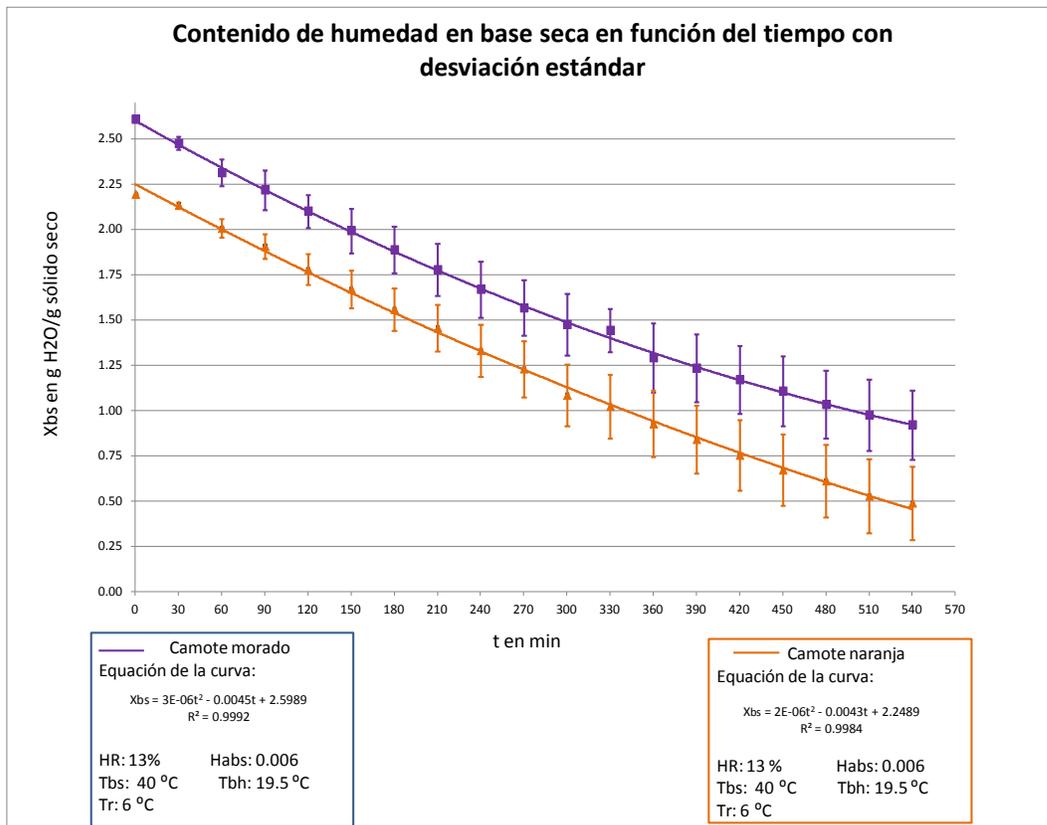
Fuente: elaboración propia, con base a resultados obtenidos.

Figura19. Evaluación de la pérdida de humedad de camote en función del tiempo para la geometría de corte en rodajas a50 grados



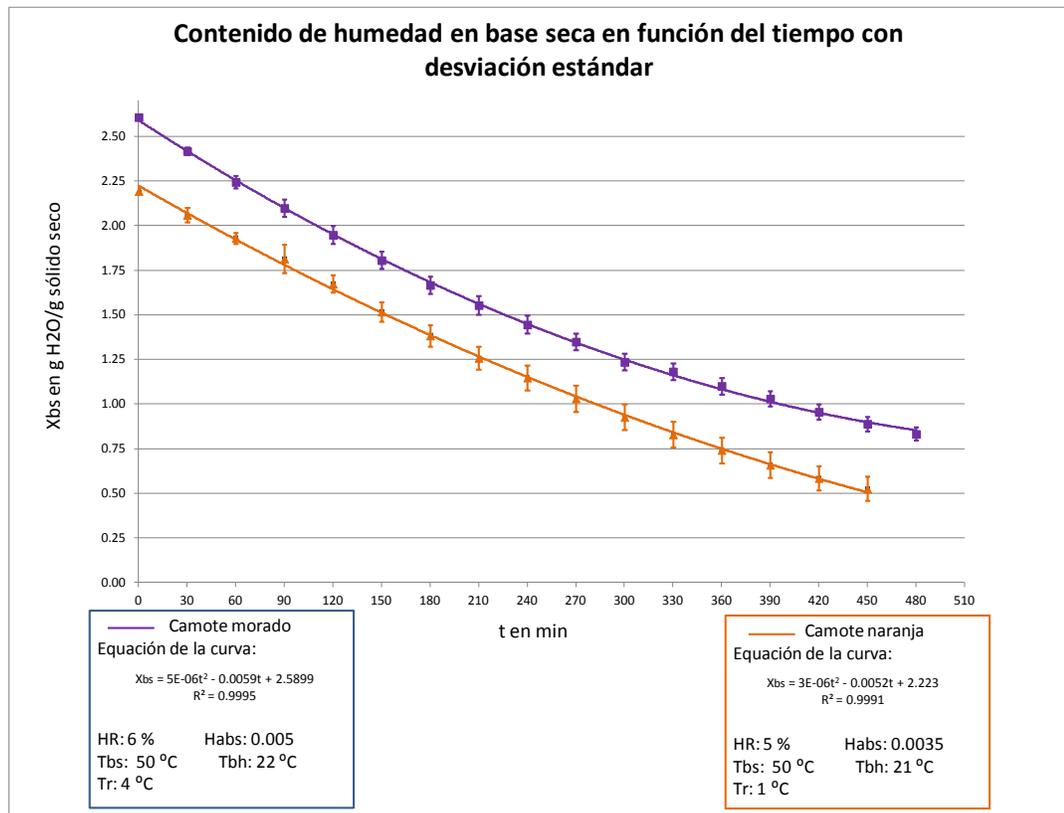
Fuente: elaboración propia, con base a resultados obtenidos.

Figura20. Variación del contenido de humedad en base seca de camote en función del tiempo para la geometría de corte en rodajas a 40 grados



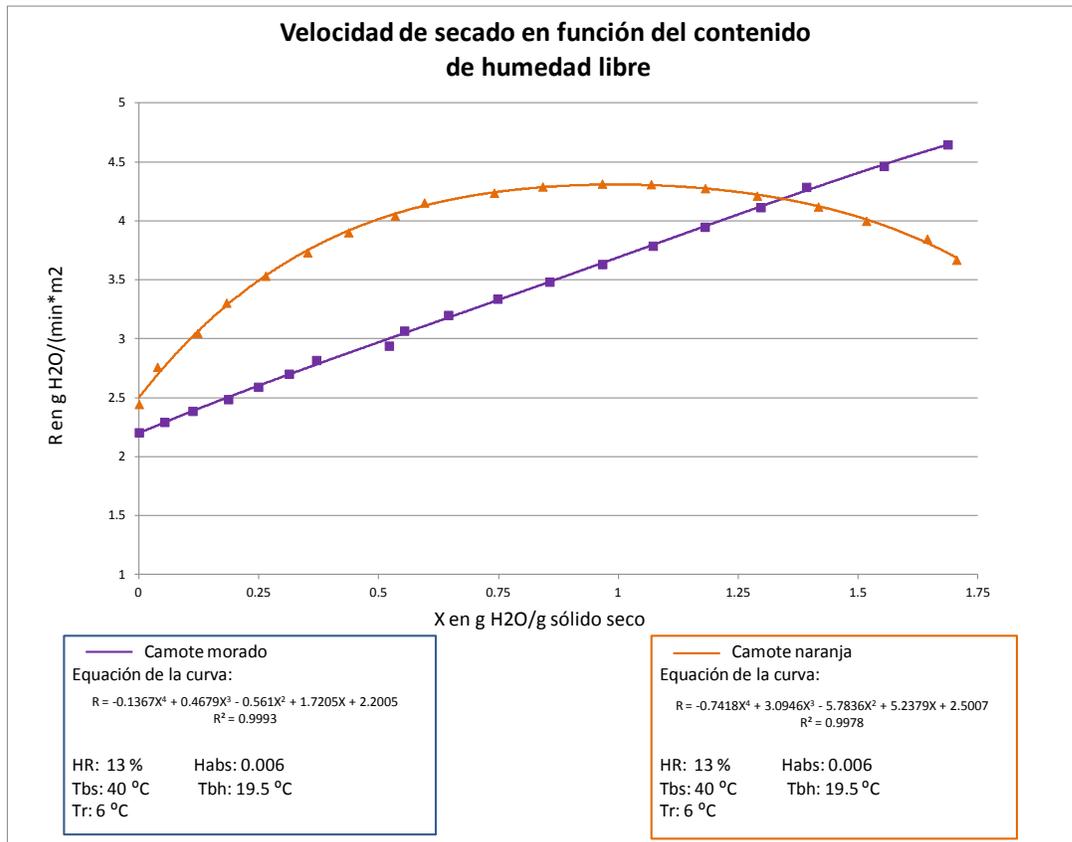
Fuente: elaboración propia, con base a resultados obtenidos.

Figura21. Variación del contenido de humedad en base seca de camote en función del tiempo para la geometría de corte en rodajas a 50 grados



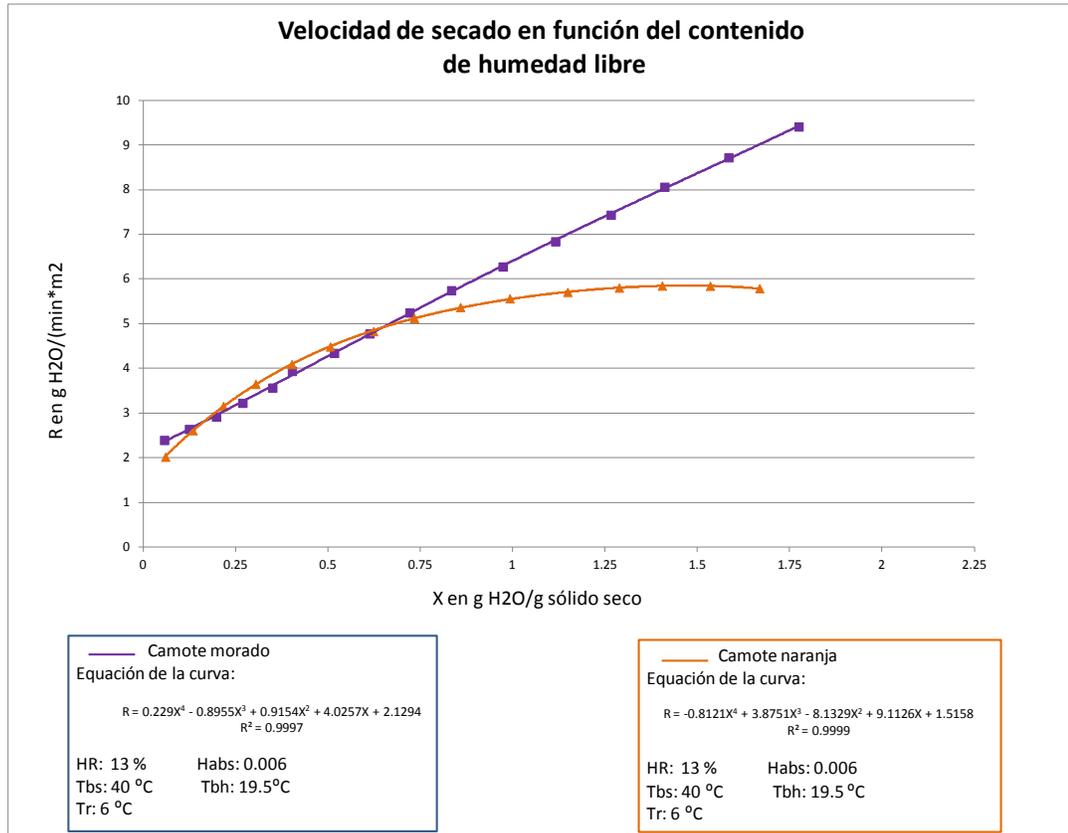
Fuente: elaboración propia, con base a resultados obtenidos.

Figura22. Variación de la velocidad de secado de camote en función del contenido de humedad libre para la geometría de corte enrodajas a 40 grados



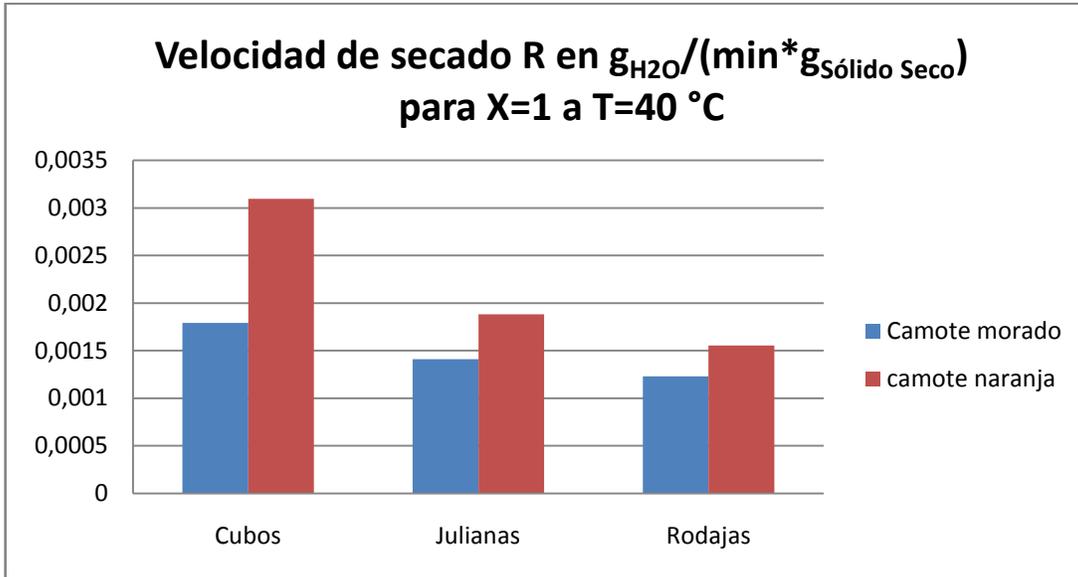
Fuente: elaboración propia, con base a resultados obtenidos.

Figura23. **Variación de la velocidad de secado de camote en función del contenido de humedad libre para la geometría de corte en rodajas a 50 grados**



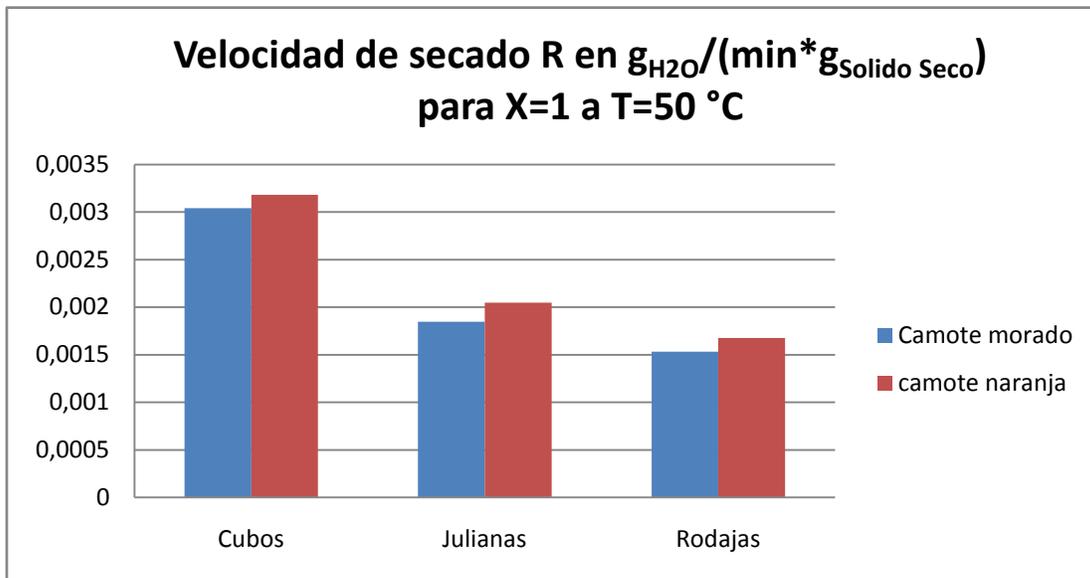
Fuente: elaboración propia, con base a resultados obtenidos.

Figura24. Eficiencia en función de la velocidad para 40 grados



Fuente: elaboración propia, con base a resultados obtenidos

Figura25. Eficiencia en función de la velocidad para 50 grados



Fuente: elaboración propia, con base a resultados obtenidos

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En el presente trabajo de graduación se buscó estudiar el proceso de secado de dos especies de camote a través de la pérdida de humedad durante el proceso de secado. Para ello se emplearon 3 tipos de geometría de corte (cubos, julianas y rodajas) a dos temperaturas conocidas (50 y 40 grados).

Se empleó como medio secante aire del ambiente el cual presentó diferentes humedades relativas según el día que se realizaban las sesiones. Dicho parámetro no podía ser controlado por lo que fue únicamente monitoreado, presentando valores que variaron desde 67 por ciento hasta 80 por ciento. Como se puede observar en los datos calculados (apéndice 3), al mantener la temperatura de bulbo seco constante la temperatura de bulbo húmedo tuvo variaciones insignificantes. Esto significa que se tuvo un proceso de secado cercano a la idealidad debido a que la humedad despedida por las muestras de camote no incide en la humedad relativa del aire de secado a lo largo de cada experimento. Esto se debe a que las masas empleadas para el camote fueron bajas comparadas con la capacidad del horno (cantidades menores a 30g en un horno de 3 pies³). Esto permite tomar las condiciones del aire de secado dentro del horno como constantes a lo largo de toda la sesión de secado.

En el caso de las curva No 4: contenido de humedad en base seca en función del humedad relativa es necesario obtener datos de equilibrio para varias humedades relativas a una temperatura constante obteniendo una isoterma de humedades relativas al equilibrio en función del contenido de

humedad en base seca⁷. Para lograr esto es necesario modificar la humedad absoluta del medio secante para poder variar las humedades relativas a una misma temperatura. Como se pudo observar en los resultados el rango de humedades relativas obtenidas dentro del horno va únicamente de 7 por ciento a 13 por ciento para el camote morado y de 5 por ciento a 13 por ciento para el naranja. Al tener un rango reducido y un poco de variedad de datos no fue posible trazar una curva satisfactoria de contenido de humedad en base seca en función de la humedad relativa.

Tal y como se puede observar en las otras curvas de secado, las tendencias obtenidas experimentalmente concuerdan con lo esperado según la teoría⁸. En el caso de las curvas de evaluación de la pérdida de humedad de camote en función del tiempo, se observa en un inicio un descenso casi lineal de la masa. Dicho comportamiento se adapta, en gran parte de las sesiones de secado a una ecuación lineal, tal y como se puede observar en las gráficas de los resultados en donde se muestran las ecuaciones lineales correspondientes y el rango en el que estas son válidas con un R^2 superior a 0,985. En el caso de los secados a 40 grados (entre 0 a 300 minutos y 0 a 540 minutos) este rango es mayor que para los que se llevaron a cabo a 50 grados (entre 0 a 150 minutos y 0 a 450 minutos) por lo que se puede concluir que en las condiciones del experimento la fase de velocidad lineal es mayor a 40 grados. Los coeficientes de masa para estos períodos lineales oscilan entre 0,015 y 0,017 g_{H_2O}/min para la temperatura de 40 grados y entre 0,023 y 0,0358 g_{H_2O}/min , para la temperatura de 50 grados. Ésta pendiente más pronunciada para la segunda temperatura indica claramente una velocidad de secado casi 2 veces mayor que para los 40 grados.

⁷ VAN ARSDEL Wallace B. Food dehydration vol 1 P. 69

⁸MCABE Warren L. SMITH Julian C. HARRIOT Meter. *Operaciones unitarias en ingeniería Química* P. 832, 833

En dichas curvas se observa que en todos los casos, con excepción de la figura 18, el camote naranja presenta una etapa de velocidad lineal que dura más tiempo que para el camote morado (de 90 a 150 minutos más). Al comparar las pendientes de las fases lineales se puede notar que no hay diferencias significativas entre el camote naranja y el camote morado. Esto quiere decir que la velocidad de pérdida de humedad es similar para ambos camotes en el período de velocidad lineal. Cabe mencionar que la figura 13: evaluación de la pérdida de humedad de camote en función del tiempo para la geometría de corte en julianas a 50 grados si se observa una clara diferencia, ya que la pendiente del camote morado es 35 por ciento mayor que la del naranja.

Por otra parte, al comparar las diferentes geometrías de corte, la etapa de velocidad lineal dura más tiempo para el corte de rodajas, seguido del corte de julianas y finalmente el de cubos. Esto significa que la velocidad de pérdida de humedad disminuye más rápidamente en el corte de cubos que en el de julianas y la de este más que el de rodajas. Sin embargo, la pendiente de la fase lineal es mayor para la geometría de corte de cubos que para las otras dos, principalmente a 40 grados donde esta se duplica. Esto significa que los cubos pierden humedad con mayor rapidez que las julianas y las rodajas.

Posteriormente, el valor de la masa empieza a descender cada vez menos hasta tender a un valor con un comportamiento asintótico (ejemplo figura 7). El comportamiento es el mismo en las curvas de contenido de humedad en base seca en función del tiempo, donde el valor de X_{bs} tiende finalmente al equilibrio cuando se ha alcanzado la humedad mínima del sólido a la temperatura trabajada, es decir la humedad en equilibrio (ejemplo figura 9). En ese sentido las ecuaciones cuadráticas mostradas en las gráficas presentaron un alto grado de compatibilidad para el rango completo de tiempo en el que se

llevaron a cabo los secados, no solo en la parte lineal sino también, en la parte asintótica.

En el caso de las curvas de variación de la velocidad de secado de camote en función del tiempo, no se observa una tendencia tan definida como en las curvas anteriores ni fases tan claras como lo indica la teoría⁹, en las cuales se observa, al ir disminuyendo el contenido de humedad, una fase de velocidad constante seguida de un descenso lineal de la velocidad de secado y finalmente un descenso parabólico. Sin embargo, a grandes rasgos las curvas obtenidas si se adaptan a lo esperado, es decir que, en todos los casos la velocidad de secado disminuye claramente al disminuir el contenido de humedad en base seca, como puede observarse claramente en las figuras 10 y 17. Esto se debe a que mientras más alto sea el contenido de humedad del sólido hay más humedad disponible para evaporarse, por lo que la velocidad de pérdida de humedad es mayor.

No se observa una pendiente nula en ninguna de las curvas obtenidas experimentalmente, como se ve en la teoría. Sin embargo, sí se observa un descenso más lento al inicio en algunos casos con una pendiente baja. Este es el caso, principalmente, en las curvas del camote naranja, como puede verse en la figura 16 en el caso del camote naranja en donde entre $X=0,94$ y $X=1,49$ se obtiene una velocidad de secado que oscila $2,83$ y $2,89$ $g/(min \cdot m^2)$, lo cual podría considerarse como la fase de velocidad constante.

Al comparar las velocidades obtenidas entre las temperaturas de 40 y 50 grados, puede observarse una clara diferencia, ya que las de la temperatura más alta son notablemente superiores en todos los casos. El caso en donde el cambio es más pronunciado es el del camote naranja para el corte de cubos, en

⁹ GEANKOPLIS. Christie J. *Procesos de Transporte operaciones unitarias*. P. 598

donde la velocidad máxima pasa de 3,88 g/(min*m²) a 40 grados a 15,6 g/(min*m²) a 50 grados, siendo la segunda casi 4 veces mayor.

De manera general, a 40 grados se puede decir que, el camote naranja pierde más humedad que el morado, ya que los valores obtenidos para X_{bsal} final de las corridas (tiempo de 540 minutos) son menores para los tres cortes estudiados. Obteniendo para el camote morado los valores de 0,66, 0,86 y 0,92 para los cortes de cubos, julianas y rodajas respectivamente, y los valores para el camote naranja de 0,08, 0,50 y 0,49. Este es el mismo caso para las curvas obtenidas para 50 grados en donde se obtienen valores de 0,34, 0,74 y 0,83. Para el camote morado y 0,13, 0,37 y 0,53, para los cortes respectivos de cubos, julianas y rodajas. En todos los casos estudiados, el camote naranja pierde un mayor porcentaje de masa de humedad en un tiempo determinado que el camote morado. Observando las tablas de masa en función del tiempo esto también se observa, como en el caso del corte de cubos a 40 grados en donde el camote naranja pierde hasta un 65 por ciento de humedad para un tiempo de 540 minutos mientras que el camote morado pierde únicamente un 54 por ciento. Esto puede verse igualmente reflejado en las figuras 24 y 25 en donde, para $X=1$, el camote naranja presenta un velocidad en $g_{H_2O}/g_{sólido\ seco}$ mayor que para el morado para todas las geometrías utilizadas.

Se escogió el valor de contenido de humedad libre (X) igual a 1 porque este corresponde al periodo de velocidad lineal en todos los casos y esta es la fase más útil para el secado, ya que la pérdida de humedad es mayor. El hecho de que la pérdida de humedad en el camote naranja sea mayor se debe a la mayor duración de la fase lineal como se mencionó en la página 61.

Al comparar las variaciones de las curvas para los diferentes cortes es evidente que el corte que pierde más humedad es el de los cubos. Este pierde

de 54 por ciento a 63 por ciento para el camote morado y de 64 por ciento a 66 por ciento para el camote naranja. Por su parte, el corte de julianas pierde levemente más humedad que el de rodajas presentando pérdidas de entre 48 por ciento y 52 por ciento para el camote morado y 53 por ciento y 57 por ciento para el naranja.

Finalmente, el corte de rodajas presenta valores de 46 por ciento a 49 por ciento para el camote morado y de 52 por ciento para el naranja. Esto es de esperarse, ya que el área de contacto es superior para los cubos (relación aproximada de $5 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{g}$) que para las julianas y las rodajas ($4 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{g}$ y $2.5 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{g}$). Esto se refleja de igual manera en las figuras 24 y 25 en donde las velocidades de secado $g_{\text{H}_2\text{O}}/g_{\text{sólido seco}}$ son mayores para el corte de cubos, seguido de las julianas y finalmente de las rodajas. Es importante mencionar que este no es necesariamente el caso de las velocidades mostradas en las figuras anteriores (R dada en $g_{\text{H}_2\text{O}}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$), las cuales están dadas en función del área. Sin embargo, desde el punto de vista de la producción es más significativa la velocidad en función de la masa, ya que por lo general la materia prima se consigue en unidades de masa, comúnmente llamada peso.

En cuanto a la parte cualitativa del secado, puede decirse que con las temperaturas y tiempos empleados la morfología y la apariencia no fueron significativamente afectadas a lo largo de los experimentos. Las dimensiones (ancho, largo y espesor) se redujeron aproximadamente un 80 por ciento mientras que las paredes laterales presentaron una deformación leve debido al encogimiento gradual de las muestras. Esto significa que se logró un secado con un bajo colapso de la pared celular. Por otra parte, las muestras tomaron una coloración con leves manchas cafés lo que significa que hubo un bajo pareamiento enzimático y por ende poca oxidación. Las manchas están

más presentes en el corte de cubos, tal y como puede observarse e las fotos de muestras secas en los apéndices.

CONCLUSIONES

1. El monitoreo de la pérdida de humedad para camote naranja y morado mediante el secado en un horno de convección a escala de laboratorio, se realizó exitosamente.
2. El monitoreo realizado con base en el diseño de experimentación propuesto, permitió la obtención de información suficiente para la realización de las curvas de secado para ambos camotes y las tres geometrías de corte propuestas.
3. Las curvas de secado de evaluación de la pérdida de humedad de camote en función del tiempo y variación del contenido de humedad en base seca de camote en función del tiempo obtenidas, presentan en todos los casos la tendencia esperada por la teoría.
4. La pendiente de pérdida de humedad en la fase lineal (coeficiente de masa) es dos veces mayor para 50 que para 40 grados.
5. Las curvas de variación de la velocidad de secado de camote en función del contenido de humedad libre, presentan un descenso de la velocidad al disminuir el contenido de humedad, más no una fase de velocidad constante definida.
6. La fase lineal en las curvas de pérdida de humedad en función del tiempo tiene mayor duración para el camote naranja que, para el camote morado (de 90 a 150 minutos más).

7. El camote naranja pierde más humedad que el morado, para un tiempo dado en cualquiera de los cortes estudiados (de 5 por ciento a 10 por ciento más).
8. La pendiente de la fase lineal en las curvas de pérdida de humedad en función del tiempo es mayor para la geometría de corte de cubos, que para las otras dos geometrías.
9. La geometría de corte que pierde más humedad en las dos temperaturas estudiadas es la de cubos, seguida por la de julianas y finalmente, aunque cercana, la geometría de rodajas.

RECOMENDACIONES

1. Realizar las corridas necesarias (en este caso fueron 3) para cada corte en la misma sesión de secado, para que las condiciones sean las mismas y la variabilidad sea menor.
2. Para la obtención de información de secado hay que encender el horno con cierto tiempo de antelación para asegurarse que este, esté a la temperatura deseada a la hora de iniciar las corridas.
3. Los cortes de camote deben realizarse justo antes de que se inicie el secado, ya que si se hacen días previos, este empieza a perder humedad al estar en contacto con el ambiente desprovisto de su cáscara. Esto alteraría los resultados de las curvas, ya que el contenido de humedad con el que se iniciaría el experimento no sería el original.
4. Hacer un estudio con muestras considerablemente mayores a las empleadas en este estudio, a manera de estudiar casos no ideales comparando las condiciones de secado para muestras de masa variable y de esta manera evaluar la capacidad del horno Plemlab empleado.

BIBLIOGRAFÍA

1. DICK J. G. *Química Analítica*. 2a ed México:El manual moderno,1979. 747 p.
2. GEANKOPLIS. Christie J. *Procesos de transporte operaciones hídricas y unitarias*.3a ed. México. CECSA, 1998. 1024 p.
3. MCABE, Warren L; SMITH,Julián C; HARRIOT, Meter. *Operaciones unitarias ingeniería química*. 4a ed. España:McGraw-Hill, 1991. 1121p.
4. VAN ARSDEL, Wallace B; COPLEY, Michael J. *Food DehydrationIngenieríaavolumen I-Principles USA: The Avi publishing company,INC*.1963. 185 p.
5. VELÁSQUEZ, Luz Maria. *Aspectos teóricos de la operación secado y su aplicación en productos sólidos* [en línea] [<http://www.monografias.com/trabajos15/operacion-secado/operación-secado.shtml#CURVAS>]. [Consulta: 04 de abril de 2011].
6. Universidad Carlos III de Madrid. Laboratorio de Física 2(1 Ingeniería industrial) *Ley de Radiación de Stefan-Boltzmann*[en línea][<http://bacterio.uc3m.es/docencia/laboratorio/guiones/termo/StefanBoltzmann.pdf>]. [Consulta : 23 de marzo de 2011].

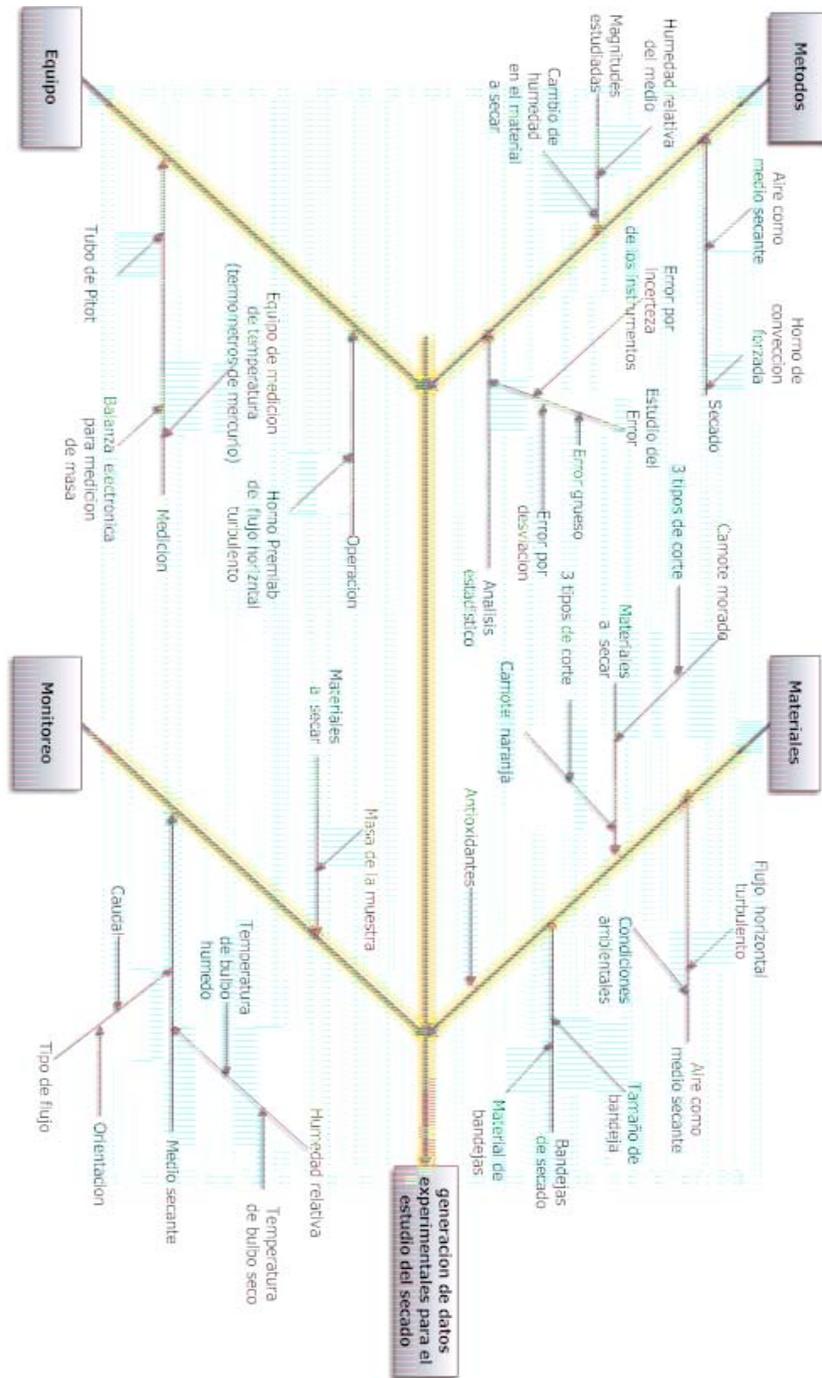
APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**

Carrera	Área de estudio	Materia	Tema general	Tema específico
Ingeniería Química	Operaciones unitarias	Balance de masa y energía IQ 1	Balance de masa. Balance de energía	Balance de las entradas y salidas de humedad en el secador, balance de energía del secador
		Transferencia de masa IQ 4	Transferencia de masa por difusión, convección	Transferencia de la humedad presente en el sólido al ambiente
		Operaciones unitarias complementarias IQ 5	Secado	Secado en bandejas
	Área de especialización	Tecnología de alimentos	Deshidratación de alimentos	Termolabilidad de las proteínas/ conservación de alimentos

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Fotos y tablas de datos del secado**

Camote morado



Camote naranja



Continuación del apéndice 3.

Cortes de camote naranja



Julianas en malla de metal



Continuación del apéndice 3.

Juliana y cubo seco



Julianas, cubos y rodajas secas



Continuación del apéndice 3.

Horno prelab



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Camote morado

Camote morado a 40 grados

Masa en función del tiempo para el corte de cubos a 40 grados para camote morado

t (en min)	Tbh (en °C)	Tbs (en °C)	Muestra 1 (en g)	Muestra 2 (en g)	Muestra 3 (en g)	Media (en g)
0	N/A	40	11,93	11,47	12,12	11,84
30	20,0	40	11,34	10,95	11,51	11,27
60	20,0	40	10,61	10,26	10,65	10,50
90	19,5	40	10,17	9,99	10,07	10,08
120	19,5	40	9,50	9,46	9,59	9,52
150	19,0	40	9,15	9,05	9,01	9,07
180	19,5	40	8,57	8,54	8,51	8,54
210	19,5	40	8,24	8,18	8,13	8,18
240	19,5	40	7,88	7,77	7,70	7,78
270	19,5	40	7,47	7,37	7,37	7,40
300	19,0	40	7,22	7,04	6,98	7,08
330	19,5	40	7,02	6,77	6,80	6,86
360	19,5	40	6,70	6,48	6,38	6,52
390	19,0	40	6,52	6,22	6,23	6,32
420	19,0	40	6,32	6,03	6,03	6,13
450	19,0	40	6,13	5,89	5,81	5,94
480	19,0	40	5,91	5,68	5,63	5,74
510	19,0	40	5,78	5,53	5,46	5,59
540	19,0	40	5,65	5,40	5,33	5,46

Los datos de la tabla fueron obtenidos para una humedad relativa de 71% para el aire del ambiente y una humedad relativa de 13% adentro del horno.

Continuación del apéndice 4.

Contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el corte de cubos a 40 grados para camote morado

t (en min)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Media
0	2,61	2,61	2,61	2,61
30	2,43	2,44	2,43	2,43
60	2,21	2,23	2,17	2,20
90	2,08	2,14	2,00	2,07
120	1,87	1,98	1,86	1,90
150	1,77	1,85	1,68	1,76
180	1,59	1,69	1,53	1,60
210	1,49	1,57	1,41	1,49
240	1,38	1,44	1,29	1,37
270	1,26	1,32	1,19	1,26
300	1,18	1,21	1,08	1,16
330	1,12	1,13	1,03	1,09
360	1,03	1,04	0,90	0,99
390	0,97	0,95	0,86	0,93
420	0,91	0,90	0,79	0,87
450	0,85	0,85	0,73	0,81
480	0,79	0,79	0,68	0,75
510	0,75	0,74	0,63	0,70
540	0,71	0,70	0,59	0,66

Continuación del apéndice 4.

Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el corte de cubos a 40 grados para camote morado

T (en min)	Xbs	X	R (en g/(min*m ²))	Area media (en m ²)	Ls (en g)
0	2,61	1,94	3,10	0,0072	3,28
30	2,43	1,77	2,91	0,0072	3,28
60	2,20	1,54	2,73	0,0072	3,28
90	2,07	1,41	2,56	0,0072	3,28
120	1,90	1,24	2,39	0,0072	3,28
150	1,76	1,10	2,23	0,0072	3,28
180	1,60	0,94	2,08	0,0072	3,28
210	1,49	0,83	1,94	0,0072	3,28
240	1,37	0,71	1,80	0,0072	3,28
270	1,26	0,59	1,68	0,0072	3,28
300	1,16	0,49	1,55	0,0072	3,28
330	1,09	0,43	1,44	0,0072	3,28
360	0,99	0,32	1,33	0,0072	3,28
390	0,93	0,26	1,23	0,0072	3,28
420	0,87	0,20	1,14	0,0072	3,28
450	0,81	0,15	1,06	0,0072	3,28
480	0,75	0,09	0,98	0,0072	3,28
510	0,70	0,04	0,91	0,0072	3,28
540	0,66	0,00	0,85	0,0072	3,28

Continuación del apéndice 4.

**Masa en función del tiempo para el corte de julianas a 40 grados para
camote morado**

T (en min)	Tbh (en g)	Tbs (en g)	Muestra 1 (en g)	Muestra 2 (en g)	Muestra 3 (en g)	Media (en g)
0	N/A	40	16,47	15,23	16,98	16,22
30	20,0	40	15,85	14,64	16,18	15,56
60	20,0	40	15,16	13,86	15,43	14,82
90	19,5	40	14,75	13,54	14,79	14,36
120	19,5	40	13,98	12,86	14,31	13,71
150	19,0	40	13,54	12,48	13,60	13,20
180	19,5	40	12,89	11,95	12,98	12,60
210	19,5	40	12,45	11,50	12,47	12,14
240	19,5	40	11,97	11,05	11,90	11,64
270	19,5	40	11,46	10,68	11,45	11,20
300	19,0	40	11,07	10,19	10,99	10,75
330	19,5	40	10,80	9,81	10,34	10,32
360	19,5	40	10,34	9,42	10,21	9,99
390	19,0	40	10,11	9,04	9,98	9,71
420	19,0	40	9,79	8,75	9,66	9,40
450	19,0	40	9,55	8,54	9,35	9,14
480	19,0	40	9,23	8,19	9,09	8,84
510	19,0	40	9,06	7,94	8,85	8,62
540	19,0	40	8,80	7,71	8,66	8,39

Los datos de la tabla fueron obtenidos para una humedad relativa de 71 por ciento para el aire del ambiente y una humedad relativa de 13 por ciento adentro del horno.

Continuación del apéndice 4.

Contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el corte de julianas a 40 grados para camote morado

T (en min)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Media
0	2,61	2,61	2,61	2,61
30	2,47	2,47	2,44	2,46
60	2,32	2,28	2,28	2,29
90	2,23	2,21	2,14	2,19
120	2,06	2,05	2,04	2,05
150	1,97	1,95	1,89	1,94
180	1,82	1,83	1,76	1,80
210	1,73	1,72	1,65	1,70
240	1,62	1,62	1,53	1,59
270	1,51	1,53	1,43	1,49
300	1,43	1,41	1,34	1,39
330	1,37	1,32	1,20	1,30
360	1,27	1,23	1,17	1,22
390	1,22	1,14	1,12	1,16
420	1,15	1,07	1,05	1,09
450	1,09	1,02	0,99	1,03
480	1,02	0,94	0,93	0,96
510	0,98	0,88	0,88	0,92
540	0,93	0,83	0,84	0,86

Continuación del apéndice 4.

Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el corte de julianas a 40 grados para camote morado

T (en min)	X _{bs}	X	R (en g/(min*m ²))	Area media (en m ²)	Ls (en g)
0	2,61	1,74	3,41	0,0066	4,50
30	2,46	1,59	3,28	0,0066	4,50
60	2,29	1,43	3,16	0,0066	4,50
90	2,19	1,33	3,04	0,0066	4,50
120	2,05	1,18	2,91	0,0066	4,50
150	1,94	1,07	2,79	0,0066	4,50
180	1,80	0,94	2,67	0,0066	4,50
210	1,70	0,83	2,54	0,0066	4,50
240	1,59	0,72	2,42	0,0066	4,50
270	1,49	0,63	2,29	0,0066	4,50
300	1,39	0,53	2,17	0,0066	4,50
330	1,30	0,43	2,04	0,0066	4,50
360	1,22	0,36	1,92	0,0066	4,50
390	1,16	0,29	1,79	0,0066	4,50
420	1,09	0,23	1,67	0,0066	4,50
450	1,03	0,17	1,54	0,0066	4,50
480	0,96	0,10	1,42	0,0066	4,50
510	0,92	0,05	1,29	0,0066	4,50
540	0,86	0,00	1,16	0,0066	4,50

Continuación del apéndice 4.

Masa en función del tiempo para el corte de rodajas a grados para camote morado

T (en min)	Tbh (en °C)	Tbs (en °C)	Muestra 1 (en g)	Muestra 2 (en g)	Muestra 3 (en g)	Media (en g)
0	N/A	40	18,75	19,65	17,06	18,49
30	20,0	40	18,17	19,08	16,19	17,81
60	20,0	40	17,55	18,26	15,17	16,99
90	19,5	40	17,17	17,90	14,48	16,52
120	19,5	40	16,50	17,18	14,06	15,91
150	19,0	40	16,12	16,65	13,33	15,37
180	19,5	40	15,57	16,13	12,78	14,83
210	19,5	40	15,00	15,63	12,17	14,27
240	19,5	40	14,46	15,11	11,58	13,72
270	19,5	40	13,87	14,59	11,11	13,19
300	19,0	40	13,48	14,13	10,57	12,73
330	19,5	40	13,18	13,72	10,74	12,55
360	19,5	40	12,63	13,20	9,54	11,79
390	19,0	40	12,34	12,83	9,32	11,50
420	19,0	40	12,00	12,49	9,02	11,17
450	19,0	40	11,66	12,23	8,66	10,85
480	19,0	40	11,23	11,82	8,36	10,47
510	19,0	40	11,02	11,47	8,02	10,17
540	19,0	40	10,71	11,17	7,80	9,90

Los datos de la tabla fueron obtenidos para una humedad relativa de 71 por ciento para el aire del ambiente y una humedad relativa de 13 por ciento adentro del horno.

Continuación del apéndice 4.

Contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el corte de rodajas a 40 grados para camote morado

T (en min)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Media
0	2,61	2,61	2,61	2,61
30	2,50	2,50	2,42	2,47
60	2,38	2,35	2,21	2,31
90	2,30	2,29	2,06	2,22
120	2,18	2,15	1,97	2,10
150	2,10	2,06	1,82	1,99
180	2,00	1,96	1,70	1,89
210	1,89	1,87	1,57	1,78
240	1,78	1,77	1,45	1,67
270	1,67	1,68	1,35	1,57
300	1,59	1,59	1,24	1,47
330	1,54	1,52	1,27	1,44
360	1,43	1,42	1,02	1,29
390	1,37	1,36	0,97	1,23
420	1,31	1,29	0,91	1,17
450	1,24	1,25	0,83	1,11
480	1,16	1,17	0,77	1,03
510	1,12	1,11	0,70	0,97
540	1,06	1,05	0,65	0,92

Continuación del apéndice 4.

Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el corte de rodajas a 40 grados para camote morado

T (en min)	Xbs	X	R (en g/(min*m ²))	Area media (en m ²)	Ls (en g)
0	2,61	1,69	4,65	0,004962	5,12
30	2,47	1,55	4,46	0,004962	5,12
60	2,31	1,39	4,29	0,004962	5,12
90	2,22	1,30	4,11	0,004962	5,12
120	2,10	1,18	3,95	0,004962	5,12
150	1,99	1,07	3,79	0,004962	5,12
180	1,89	0,97	3,63	0,004962	5,12
210	1,78	0,86	3,48	0,004962	5,12
240	1,67	0,75	3,34	0,004962	5,12
270	1,57	0,65	3,20	0,004962	5,12
300	1,47	0,55	3,07	0,004962	5,12
330	1,44	0,52	2,94	0,004962	5,12
360	1,29	0,37	2,82	0,004962	5,12
390	1,23	0,31	2,70	0,004962	5,12
420	1,17	0,25	2,59	0,004962	5,12
450	1,11	0,19	2,49	0,004962	5,12
480	1,03	0,11	2,39	0,004962	5,12
510	0,97	0,05	2,29	0,004962	5,12
540	0,92	0,00	2,20	0,004962	5,12

El dato perteneciente a la casilla eliminado no se tomó en cuenta ya presentaba un valor mayor al doble de los otros 2 datos con los que se obtuvo la media.

Continuación del apéndice 4.

**Masa en función del tiempo para el corte de cubos a 50 grados para
camote morado**

T (en min)	Tbh (en °C)	Tbs (en °C)	Muestra 1 (en g)	Muestra 2 (en g)	Muestra 3 (en g)	Media (en g)
0	23,0	50	14,51	11,87	13,64	13,34
30	22,0	50	13,33	10,66	11,63	11,88
60	22,5	50	12,23	9,83	10,62	10,89
90	22,0	50	11,27	9,07	9,74	10,03
120	22,0	50	10,46	8,30	8,80	9,19
150	22,0	50	9,70	7,63	8,11	8,48
180	22,0	50	9,04	7,05	7,43	7,84
210	22,0	50	8,55	6,55	6,93	7,34
240	22,0	50	8,12	6,09	6,46	6,89
270	22,0	50	7,74	5,71	6,09	6,51
300	22,0	50	7,32	5,32	5,68	6,10
330	21,5	50	7,14	5,14	5,49	5,92
360	22,0	50	6,90	4,88	5,23	5,67
390	22,0	50	6,68	4,67	5,03	5,46
420	22,0	50	6,46	4,48	4,84	5,26
450	22,0	50	6,28	4,31	4,68	5,09
480	22,0	50	6,12	4,20	4,56	4,96

Los datos de la tabla fueron obtenidos para una humedad relativa de 80%.para el aire del ambiente y una humedad relativa de 7% adentro del horno.

Continuación del apéndice 4.

Contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el corte de cubos a 50 grados para camote morado

T (en min)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Media
0	2,61	2,61	2,61	2,61
30	2,32	2,24	2,08	2,21
60	2,04	1,99	1,81	1,95
90	1,80	1,76	1,58	1,71
120	1,60	1,52	1,33	1,48
150	1,41	1,32	1,15	1,29
180	1,25	1,14	0,97	1,12
210	1,13	0,99	0,83	0,98
240	1,02	0,85	0,71	0,86
270	0,93	0,74	0,61	0,76
300	0,82	0,62	0,50	0,65
330	0,78	0,56	0,45	0,60
360	0,72	0,48	0,38	0,53
390	0,66	0,42	0,33	0,47
420	0,61	0,36	0,28	0,42
450	0,56	0,31	0,24	0,37
480	0,52	0,28	0,21	0,34

Continuación del apéndice 4.

Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el corte de cubos a 50 grados para camote morado

T (en min)	X _{bs}	X	R (en g/(min*m ²))	Area media (en m ²)	Ls (en g)
0	2,61	2,27	6,13	0,007	3,70
30	2,21	1,88	5,52	0,007	3,70
60	1,95	1,61	4,97	0,007	3,70
90	1,71	1,38	4,48	0,007	3,70
120	1,48	1,15	4,05	0,007	3,70
150	1,29	0,96	3,67	0,007	3,70
180	1,12	0,78	3,35	0,007	3,70
210	0,98	0,65	3,09	0,007	3,70
240	0,86	0,52	2,88	0,007	3,70
270	0,76	0,42	2,73	0,007	3,70
300	0,65	0,31	2,64	0,007	3,70
330	0,60	0,26	2,61	0,007	3,70
360	0,53	0,19	2,63	0,007	3,70
390	0,47	0,14	2,71	0,007	3,70
420	0,42	0,08	2,84	0,007	3,70
450	0,37	0,03	3,04	0,007	3,70
480	0,34	0,00	3,29	0,007	3,70

El dato perteneciente a la casilla eliminado, no se tomó en cuenta, presentaba un valor 10 veces mayoral de los otros 2 datos con los que se obtuvo la media.

Continuación del apéndice 4.

Masa en función del tiempo para el corte de julianas a 50 grados para camote morado

T (en min)	Tbh (en °C)	Tbs (en °C)	Muestra 1 (en g)	Muestra 2 (en g)	Muestra 3 (en g)	Media (en g)
0	23,0	50	19,56	21,59	23,20	21,45
30	22,0	50	18,43	20,07	21,17	19,89
60	22,5	50	17,53	19,11	20,13	18,92
90	22,0	50	16,40	18,17	19,02	17,87
120	22,0	50	15,41	17,38	17,99	16,93
150	22,0	50	14,43	16,45	17,02	15,96
180	22,0	50	13,57	15,61	16,23	15,14
210	22,0	50	12,91	14,81	15,58	14,44
240	22,0	50	12,26	14,25	14,88	13,80
270	22,0	50	11,71	13,65	14,26	13,21
300	22,0	50	11,12	13,01	13,56	12,56
330	21,5	50	10,85	12,66	13,22	12,24
360	22,0	50	10,49	12,12	12,69	11,77
390	22,0	50	10,14	11,69	12,30	11,38
420	22,0	50	9,80	11,25	11,90	10,98
450	22,0	50	9,48	10,87	11,53	10,63
480	22,0	50	9,19	10,60	11,25	10,35

Los datos de la tabla fueron obtenidos para una humedad relativa de 80% para el aire del ambiente y una humedad relativa de 7% adentro del horno.

Continuación del apéndice 4.

Contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el corte de julianas a 50 grados para camote morado

T (en min)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Media
0	2,61	2,61	2,61	2,61
30	2,40	2,35	2,29	2,35
60	2,23	2,19	2,13	2,19
90	2,02	2,04	1,96	2,01
120	1,84	1,90	1,80	1,85
150	1,66	1,75	1,65	1,69
180	1,50	1,61	1,52	1,54
210	1,38	1,48	1,42	1,43
240	1,26	1,38	1,31	1,32
270	1,16	1,28	1,22	1,22
300	1,05	1,17	1,11	1,11
330	1,00	1,12	1,06	1,06
360	0,93	1,03	0,97	0,98
390	0,87	0,95	0,91	0,91
420	0,81	0,88	0,85	0,85
450	0,75	0,82	0,79	0,79
480	0,69	0,77	0,75	0,74

Continuación del apéndice 4.

Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el corte de julianas a 50 grados para camote morado

T (en min)	Xbs	X	R (en g/(min*m ²))	Area media (en m ²)	Ls (en g)
0	2,61	1,87	5,07	0,0088	5,95
30	2,35	1,61	4,67	0,0088	5,95
60	2,19	1,45	4,30	0,0088	5,95
90	2,01	1,27	3,95	0,0088	5,95
120	1,85	1,11	3,62	0,0088	5,95
150	1,69	0,95	3,31	0,0088	5,95
180	1,54	0,81	3,03	0,0088	5,95
210	1,43	0,69	2,77	0,0088	5,95
240	1,32	0,58	2,52	0,0088	5,95
270	1,22	0,48	2,31	0,0088	5,95
300	1,11	0,37	2,11	0,0088	5,95
330	1,06	0,32	1,93	0,0088	5,95
360	0,98	0,24	1,78	0,0088	5,95
390	0,91	0,17	1,65	0,0088	5,95
420	0,85	0,11	1,54	0,0088	5,95
450	0,79	0,05	1,45	0,0088	5,95
480	0,74	0,00	1,38	0,0088	5,95

Continuación del apéndice 4.

**Masa en función del tiempo para el corte de rodajas a 50 grados para
camote morado**

T (en min)	Tbh (en °C)	Tbs (en °C)	Muestra 1 (en g)	Muestra 2 (en g)	Muestra 3 (en g)	Media (en g)
0	23,0	50	27,52	29,50	32,35	29,79
30	22,0	50	26,24	27,99	30,40	28,21
60	22,5	50	25,04	26,60	28,67	26,77
90	22,0	50	24,05	25,43	27,20	25,56
120	22,0	50	22,91	24,20	25,86	24,32
150	22,0	50	21,81	23,04	24,58	23,15
180	22,0	50	20,75	21,90	23,34	22,00
210	22,0	50	19,90	21,00	22,29	21,06
240	22,0	50	19,07	20,11	21,32	20,17
270	22,0	50	18,32	19,33	20,49	19,38
300	22,0	50	17,44	18,38	19,50	18,44
330	21,5	50	17,03	17,95	19,02	18,00
360	22,0	50	16,44	17,25	18,30	17,33
390	22,0	50	15,87	16,66	17,70	16,74
420	22,0	50	15,31	16,07	17,04	16,14
450	22,0	50	14,77	15,51	16,48	15,58
480	22,0	50	14,29	15,05	16,00	15,11

Los datos de la tabla fueron obtenidos para una humedad relativa de 80 por ciento para el aire del ambiente y una humedad relativa de 7 por ciento adentro del horno.

Continuación del apéndice 4.

Contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el corte de rodajas a 50 grados para camote morado

T (en min)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Media
0	2,61	2,607	2,607	2,61
30	2,44	2,423	2,390	2,42
60	2,28	2,253	2,197	2,24
90	2,15	2,110	2,034	2,10
120	2,00	1,959	1,884	1,95
150	1,86	1,818	1,741	1,81
180	1,72	1,678	1,603	1,67
210	1,61	1,568	1,486	1,55
240	1,50	1,459	1,378	1,45
270	1,40	1,364	1,285	1,35
300	1,29	1,247	1,175	1,24
330	1,23	1,195	1,121	1,18
360	1,15	1,110	1,041	1,10
390	1,08	1,037	0,974	1,03
420	1,01	0,965	0,900	0,96
450	0,94	0,896	0,837	0,89
480	0,87	0,841	0,785	0,83

Continuación del apéndice 4.

Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el corte de rodajas a 50 grados para camote morado

T (en min)	X _{bs}	X	R (en g/(min*m ²))	Area media (en m ²)	Ls (en g)
0	2,61	1,77	9,41	0,005619	8,26
30	2,42	1,58	8,72	0,005619	8,26
60	2,24	1,41	8,06	0,005619	8,26
90	2,10	1,27	7,43	0,005619	8,26
120	1,95	1,12	6,84	0,005619	8,26
150	1,81	0,97	6,28	0,005619	8,26
180	1,67	0,83	5,74	0,005619	8,26
210	1,55	0,72	5,25	0,005619	8,26
240	1,45	0,61	4,78	0,005619	8,26
270	1,35	0,52	4,34	0,005619	8,26
300	1,24	0,40	3,94	0,005619	8,26
330	1,18	0,35	3,57	0,005619	8,26
360	1,10	0,27	3,23	0,005619	8,26
390	1,03	0,20	2,92	0,005619	8,26
420	0,96	0,12	2,64	0,005619	8,26
450	0,89	0,06	2,40	0,005619	8,26
480	0,83	0,00	2,18	0,005619	8,26

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Camote naranja

Camote naranja a 40 grados

Masa en función del tiempo para el corte de cubos a 40 grados para camote naranja

T (en min)	Tbh (en °C)	Tbs (en °C)	Muestra 1 (en g)	Muestra 2 (en g)	Muestra 3 (en g)	Media (en g)
0	20,0	40	10,39	10,83	11,21	10,81
30	20,0	40	10,04	10,38	10,71	10,38
60	20,0	40	9,51	9,77	10,15	9,81
90	19,5	40	9,03	9,23	9,55	9,27
120	20,0	40	8,40	8,61	8,87	8,63
150	20,0	40	7,89	8,21	8,37	8,16
180	19,5	40	7,33	7,77	7,76	7,62
210	19,0	40	6,81	7,32	7,21	7,11
240	19,0	40	6,32	6,80	6,70	6,61
270	19,0	40	5,92	6,30	6,25	6,16
310	19,0	40	5,37	5,66	5,71	5,58
330	19,0	40	5,14	5,40	5,47	5,34
360	19,5	40	4,80	5,04	5,10	4,98
390	19,5	40	4,51	4,73	4,60	4,61
420	20,0	40	4,26	4,45	4,52	4,41
450	20,0	40	3,99	4,20	4,27	4,15
480	19,0	40	3,82	4,01	4,10	3,98
520	19,0	40	3,61	3,76	3,88	3,75
540	19,0	40	3,51	3,65	3,79	3,65

Los datos de la tabla fueron obtenidos para una humedad relativa de 67 por ciento para el aire del ambiente y una humedad relativa de 13 por ciento adentro del horno.

Continuación del apéndice 5.

Contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el corte de cubos a 40 grados para camote naranja

T (en min)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Media
0	2,19	2,19	2,19	2,19
30	2,09	2,06	2,05	2,07
60	1,92	1,88	1,89	1,90
90	1,78	1,72	1,72	1,74
120	1,58	1,54	1,53	1,55
150	1,43	1,42	1,39	1,41
180	1,25	1,29	1,21	1,25
210	1,09	1,16	1,05	1,10
240	0,94	1,00	0,91	0,95
270	0,82	0,86	0,78	0,82
310	0,65	0,67	0,63	0,65
330	0,58	0,59	0,56	0,58
360	0,47	0,49	0,45	0,47
390	0,39	0,39	0,31	0,36
420	0,31	0,31	0,29	0,30
450	0,23	0,24	0,22	0,23
480	0,17	0,18	0,17	0,18
520	0,11	0,11	0,11	0,11
540	0,08	0,08	0,08	0,08

Continuación del apéndice 5.

Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el corte de cubos a 40 grados para camote naranja

T (en min)	X _{bs}	X	R (en g/(min*m ²))	Area media (en m ²)	Ls (en g)
0	2,19	2,11	3,88	0,0048	3,39
30	2,07	1,99	3,89	0,0048	3,39
60	1,90	1,82	3,88	0,0048	3,39
90	1,74	1,66	3,84	0,0048	3,39
120	1,55	1,47	3,78	0,0048	3,39
150	1,41	1,33	3,70	0,0048	3,39
180	1,25	1,17	3,59	0,0048	3,39
210	1,10	1,02	3,47	0,0048	3,39
240	0,95	0,87	3,32	0,0048	3,39
270	0,82	0,74	3,14	0,0048	3,39
310	0,65	0,57	2,88	0,0048	3,39
330	0,58	0,50	2,73	0,0048	3,39
360	0,47	0,39	2,49	0,0048	3,39
390	0,36	0,28	2,22	0,0048	3,39
420	0,30	0,22	1,94	0,0048	3,39
450	0,23	0,15	1,63	0,0048	3,39
480	0,18	0,10	1,29	0,0048	3,39
520	0,11	0,03	0,81	0,0048	3,39
540	0,08	0,00	0,56	0,0048	3,39

Continuación del apéndice 5.

Masa en función del tiempo para el corte de julianas a 40 grados para camote naranja

T (en min)	Tbh (en °C)	Tbs (en °C)	Muestra 1 (en g)	Muestra 2 (en g)	Muestra 3 (en g)	Media (en g)
0	20,0	40	17,93	15,94	16,09	16,65
30	20,0	40	17,56	15,57	15,58	16,23
60	20,0	40	16,98	14,95	14,84	15,59
90	19,5	40	16,40	14,45	14,29	15,04
120	20,0	40	15,82	13,89	13,64	14,45
150	20,0	40	15,27	13,33	13,00	13,86
180	19,5	40	14,68	12,74	12,43	13,28
210	19,0	40	14,07	12,18	11,87	12,71
240	19,0	40	13,52	11,57	11,24	12,11
270	19,0	40	12,92	11,07	10,67	11,55
300	19,0	40	12,23	10,27	10,07	10,86
330	19,0	40	11,90	9,91	9,72	10,51
360	19,5	40	11,36	9,40	9,27	10,01
390	19,5	40	10,92	8,92	8,82	9,56
420	20,0	40	10,43	8,52	8,44	9,13
450	20,0	40	10,01	8,10	8,05	8,72
480	19,0	40	9,69	7,80	7,80	8,43
510	19,0	40	9,21	7,41	7,41	8,01
540	19,0	40	9,01	7,23	7,27	7,83

Los datos de la tabla fueron obtenidos para una humedad relativa de 67 por ciento para el aire del ambiente y una humedad relativa de 13 por ciento adentro del horno.

Continuación del apéndice 5.

Contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el corte de julianas a 40 grados para camote naranja

T (en min)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Media
0	2,19	2,19	2,19	2,19
30	2,13	2,12	2,09	2,11
60	2,02	1,99	1,95	1,99
90	1,92	1,89	1,84	1,88
120	1,82	1,78	1,71	1,77
150	1,72	1,67	1,58	1,66
180	1,61	1,55	1,47	1,54
210	1,51	1,44	1,36	1,43
240	1,41	1,32	1,23	1,32
270	1,30	1,22	1,12	1,21
300	1,18	1,06	1,00	1,08
330	1,12	0,98	0,93	1,01
360	1,02	0,88	0,84	0,92
390	0,95	0,79	0,75	0,83
420	0,86	0,71	0,68	0,75
450	0,78	0,62	0,60	0,67
480	0,73	0,56	0,55	0,61
510	0,64	0,48	0,47	0,53
540	0,60	0,45	0,44	0,50

Continuación del apéndice 5.

Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el corte de julianas a 40 grados para camote naranja

T (en min)	X _{bs}	X	R (en g/(min*m ²))	Area media (en m ²)	Ls (en g)
0	2,19	1,70	2,69	0,0066	5,21
30	2,11	1,61	2,77	0,0066	5,21
60	1,99	1,49	2,83	0,0066	5,21
90	1,88	1,39	2,87	0,0066	5,21
120	1,77	1,27	2,89	0,0066	5,21
150	1,66	1,16	2,89	0,0066	5,21
180	1,54	1,05	2,87	0,0066	5,21
210	1,43	0,94	2,83	0,0066	5,21
240	1,32	0,82	2,76	0,0066	5,21
270	1,21	0,71	2,68	0,0066	5,21
300	1,08	0,58	2,57	0,0066	5,21
330	1,01	0,51	2,44	0,0066	5,21
360	0,92	0,42	2,29	0,0066	5,21
390	0,83	0,33	2,12	0,0066	5,21
420	0,75	0,25	1,92	0,0066	5,21
450	0,67	0,17	1,71	0,0066	5,21
480	0,61	0,11	1,47	0,0066	5,21
510	0,53	0,03	1,22	0,0066	5,21
540	0,50	0,00	0,94	0,0066	5,21

Continuación del apéndice 5.

Masa en función del tiempo para el corte de rodajas a 40 grados para camote naranja

T (en min)	Tbh (en °C)	Tbs (en °C)	Muestra 1 (en g)	Muestra 2 (en g)	Muestra 3 (en g)	Media (en g)
0	20,0	40	20,95	12,32	14,24	15,84
30	20,0	40	20,70	12,04	13,92	15,55
60	20,0	40	20,18	11,44	13,27	14,96
90	19,5	40	19,68	11,03	12,75	14,48
120	20,0	40	19,01	10,49	12,11	13,87
150	20,0	40	18,48	10,09	11,49	13,35
180	19,5	40	17,85	9,62	10,95	12,81
210	19,0	40	17,29	9,20	10,45	12,31
240	19,0	40	16,61	8,69	9,84	11,71
270	19,0	40	16,06	8,27	9,35	11,23
300	19,0	40	15,23	7,71	8,61	10,52
330	19,0	40	14,87	7,48	8,30	10,22
360	19,5	40	14,29	7,12	7,81	9,74
390	19,5	40	13,77	6,81	7,39	9,32
420	20,0	40	13,26	6,47	6,96	8,89
450	20,0	40	12,74	6,14	6,60	8,49
480	19,0	40	12,37	5,92	6,30	8,20
510	19,0	40	11,84	5,60	5,91	7,78
540	19,0	40	11,57	5,46	5,73	7,59

Los datos de la tabla fueron obtenidos para una humedad relativa de 67 por ciento para el aire del ambiente y una humedad relativa de 13 por ciento adentro del horno.

Continuación del apéndice 5.

Contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el corte de rodajas a 40 grados para camote naranja

T (en min)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Media
0	2,19	2,19	2,19	2,19
30	2,16	2,12	2,12	2,13
60	2,08	1,96	1,98	2,01
90	2,00	1,86	1,86	1,91
120	1,90	1,72	1,72	1,78
150	1,82	1,61	1,58	1,67
180	1,72	1,49	1,46	1,56
210	1,64	1,39	1,34	1,45
240	1,53	1,25	1,21	1,33
270	1,45	1,14	1,10	1,23
300	1,32	1,00	0,93	1,08
330	1,27	0,94	0,86	1,02
360	1,18	0,85	0,75	0,93
390	1,10	0,76	0,66	0,84
420	1,02	0,68	0,56	0,75
450	0,94	0,59	0,48	0,67
480	0,89	0,53	0,41	0,61
510	0,80	0,45	0,32	0,53
540	0,76	0,42	0,29	0,49

Continuación del apéndice 5.

Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el corte de rodajas a 40 grados para camote naranja

T (en min)	X _{bs}	X	R (en g/(min*m ²))	Area media (en m ²)	Ls (en g)
0	2,19	1,71	3,67	0,0045963	4,96
30	2,13	1,64	3,85	0,0045963	4,96
60	2,01	1,52	4,00	0,0045963	4,96
90	1,91	1,42	4,12	0,0045963	4,96
120	1,78	1,29	4,21	0,0045963	4,96
150	1,67	1,18	4,28	0,0045963	4,96
180	1,56	1,07	4,31	0,0045963	4,96
210	1,45	0,97	4,31	0,0045963	4,96
240	1,33	0,84	4,29	0,0045963	4,96
270	1,23	0,74	4,24	0,0045963	4,96
300	1,08	0,60	4,15	0,0045963	4,96
330	1,02	0,53	4,04	0,0045963	4,96
360	0,93	0,44	3,90	0,0045963	4,96
390	0,84	0,35	3,73	0,0045963	4,96
420	0,75	0,26	3,53	0,0045963	4,96
450	0,67	0,18	3,30	0,0045963	4,96
480	0,61	0,12	3,05	0,0045963	4,96
510	0,53	0,04	2,76	0,0045963	4,96
540	0,49	0,00	2,44	0,0045963	4,96

Continuación del apéndice 5.

**Masa en función del tiempo para el corte de cubos a 40 grados para
camote naranja**

T (en min)	Tbh (en °C)	Tbs (en °C)	Muestra 1 (en g)	Muestra 2 (en g)	Muestra 3 (en g)	Media (en g)
0	20,0	50	13,77	12,47	12,75	13,00
30	21,0	50	12,35	11,45	11,56	11,79
60	21,0	50	11,48	10,81	10,34	10,88
90	20,5	50	10,48	9,76	9,68	9,97
120	21,0	50	9,91	9,19	8,93	9,34
150	21,0	50	8,97	8,35	8,06	8,46
180	21,0	50	8,33	7,72	7,41	7,82
210	21,5	50	7,72	7,14	6,75	7,20
240	21,0	50	7,26	6,71	6,24	6,74
270	21,5	50	6,77	6,28	5,78	6,28
300	21,5	50	6,37	5,88	5,41	5,89
330	21,0	50	6,04	5,54	5,09	5,56
360	21,0	50	5,74	5,25	4,81	5,27
390	21,0	50	5,48	5,00	4,57	5,01
420	21,0	50	5,25	4,77	4,36	4,79
450	21,0	50	5,06	4,60	4,20	4,62

Los datos de la tabla fueron obtenidos para una humedad relativa de 75% para el aire del ambiente y una humedad relativa de 5% adentro del horno

Continuación del apéndice 5.

Contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el corte de cubos a 50 grados para camote naranja

T (en min)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Media
0	2,19	2,19	2,19	2,19
30	1,86	1,93	1,90	1,90
60	1,66	1,77	1,59	1,67
90	1,43	1,50	1,42	1,45
120	1,30	1,35	1,24	1,30
150	1,08	1,14	1,02	1,08
180	0,93	0,98	0,85	0,92
210	0,79	0,83	0,69	0,77
240	0,68	0,72	0,56	0,66
270	0,57	0,61	0,45	0,54
300	0,48	0,51	0,36	0,45
330	0,40	0,42	0,27	0,36
360	0,33	0,34	0,20	0,29
390	0,27	0,28	0,14	0,23
420	0,22	0,22	0,09	0,18
450	0,17	0,18	0,05	0,13

Continuación del apéndice 5.

Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el corte de cubos a 50 grados para camote naranja

T (en min)	Xbs	X	R (en g/(min*m ²))	Area media (en m ²)	Ls (en g)
0	2,19	2,06	15,60	0,0024	4,07
30	1,90	1,76	14,62	0,0024	4,07
60	1,67	1,54	13,70	0,0024	4,07
90	1,45	1,32	12,84	0,0024	4,07
120	1,30	1,16	12,04	0,0024	4,07
150	1,08	0,94	11,32	0,0024	4,07
180	0,92	0,79	10,65	0,0024	4,07
210	0,77	0,63	10,05	0,0024	4,07
240	0,66	0,52	9,51	0,0024	4,07
270	0,54	0,41	9,04	0,0024	4,07
300	0,45	0,31	8,63	0,0024	4,07
330	0,36	0,23	8,29	0,0024	4,07
360	0,29	0,16	8,01	0,0024	4,07
390	0,23	0,10	7,79	0,0024	4,07
420	0,18	0,04	7,64	0,0024	4,07
450	0,13	0,00	7,55	0,0024	4,07

Continuación del apéndice 5.

Masa en función del tiempo para el corte de julianas a 50 grados para camote naranja

T (en min)	Tbh (en °C)	Tbs (en °C)	Muestra 1 (en g)	Muestra 2 (en g)	Muestra 3 (en g)	Media (en g)
0	20,0	50	16,609	14,463	19,691	16,92
30	21,0	50	15,733	13,562	18,267	15,85
60	21,0	50	14,957	12,718	17,355	15,01
90	20,5	50	14,063	12,05	16,349	14,15
120	21,0	50	13,532	11,467	15,595	13,53
150	21,0	50	12,575	10,638	14,585	12,60
180	21,0	50	11,766	9,892	13,711	11,79
210	21,5	50	11,004	9,107	12,888	11,00
240	21,0	50	10,4	8,58	12,238	10,41
270	21,5	50	9,706	7,948	11,535	9,73
300	21,5	50	9,148	7,478	10,979	9,20
330	21,0	50	8,714	7,046	10,447	8,74
360	21,0	50	8,31	6,672	10,005	8,33
390	21,0	50	7,892	6,325	9,574	7,93
420	21,0	50	7,562	6,001	9,192	7,59
450	21,0	50	7,256	5,755	8,895	7,30

Los datos de la tabla fueron obtenidos para una humedad relativa de 75 por ciento para el aire del ambiente y una humedad relativa de 5 por ciento adentro del horno.

Continuación del apéndice 5.

Contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el corte de julianas a 50 grados para camote naranja

T (en min)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Media
0	2,19	2,19	2,19	2,19
30	2,03	1,99	1,96	1,99
60	1,88	1,81	1,81	1,83
90	1,70	1,66	1,65	1,67
120	1,60	1,53	1,53	1,55
150	1,42	1,35	1,37	1,38
180	1,26	1,18	1,22	1,22
210	1,12	1,01	1,09	1,07
240	1,00	0,89	0,98	0,96
270	0,87	0,75	0,87	0,83
300	0,76	0,65	0,78	0,73
330	0,68	0,56	0,69	0,64
360	0,60	0,47	0,62	0,56
390	0,52	0,40	0,55	0,49
420	0,45	0,33	0,49	0,42
450	0,40	0,27	0,44	0,37

Continuación del apéndice 5.

Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el corte de julianas a 50 grados para camote naranja

T (en min)	Xbs	X	R (en g/(min*m ²))	Area media (en m ²)	Ls (en g)
0	2,19	1,82	4,66	0,0066	5,30
30	1,99	1,62	4,55	0,0066	5,30
60	1,83	1,46	4,42	0,0066	5,30
90	1,67	1,30	4,27	0,0066	5,30
120	1,55	1,18	4,10	0,0066	5,30
150	1,38	1,01	3,90	0,0066	5,30
180	1,22	0,85	3,69	0,0066	5,30
210	1,07	0,70	3,45	0,0066	5,30
240	0,96	0,59	3,19	0,0066	5,30
270	0,83	0,46	2,91	0,0066	5,30
300	0,73	0,36	2,61	0,0066	5,30
330	0,64	0,27	2,29	0,0066	5,30
360	0,56	0,20	1,94	0,0066	5,30
390	0,49	0,12	1,57	0,0066	5,30
420	0,42	0,05	1,18	0,0066	5,30
450	0,37	0,00	0,77	0,0066	5,30

Continuación del apéndice 5.

Masa en función del tiempo para el corte de rodajas a 50 grados para camote naranja

T (en min)	Tbh (en °C)	Tbs (en °C)	Muestra 1 (en g)	Muestra 2 (en g)	Muestra 3 (en g)	Media (en g)
0	20,00	50	30,51	26,25	28,96	28,57
30	21,00	50	29,11	25,61	27,36	27,36
60	21,00	50	28,38	24,04	26,23	26,22
90	20,50	50	27,90	22,93	24,76	25,19
120	21,00	50	26,12	21,97	23,71	23,93
150	21,00	50	24,68	20,72	22,19	22,53
180	21,00	50	23,50	19,56	20,96	21,34
210	21,50	50	22,36	18,53	19,77	20,22
240	21,00	50	21,39	17,55	18,77	19,24
270	21,50	50	20,33	16,58	17,68	18,19
300	21,50	50	19,34	15,69	16,76	17,26
330	21,00	50	18,41	14,86	15,90	16,39
360	21,00	50	17,59	14,09	15,14	15,61
390	21,00	50	16,78	13,40	14,43	14,87
420	21,00	50	16,06	12,79	13,77	14,21
450	21,00	50	15,47	12,28	13,26	13,67

Los datos de la tabla fueron obtenidos para una humedad relativa de 75 por ciento para el aire del ambiente y una humedad relativa de 5 por ciento adentro del horno.

Continuación del apéndice 5.

Contenido de humedad en base seca en función del tiempo para el corte de julianas a 50 grados para camote naranja

T (en min)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Media
0	2,19	2,19	2,19	2,19
30	2,05	2,12	2,02	2,06
60	1,97	1,93	1,89	1,93
90	1,92	1,79	1,73	1,81
120	1,73	1,67	1,62	1,67
150	1,58	1,52	1,45	1,52
180	1,46	1,38	1,31	1,38
210	1,34	1,25	1,18	1,26
240	1,24	1,14	1,07	1,15
270	1,13	1,02	0,95	1,03
300	1,02	0,91	0,85	0,93
330	0,93	0,81	0,75	0,83
360	0,84	0,71	0,67	0,74
390	0,76	0,63	0,59	0,66
420	0,68	0,56	0,52	0,59
450	0,62	0,49	0,46	0,53

Continuación del apéndice 5.

Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre para el corte de rodajas a 50 grados para camote naranja

T (en min)	Xbs	X	R (en g/(min*m ²))	Area media (en m ²)	Ls (en g)
0	2,19	1,67	5,79	0,00680	8,95
30	2,06	1,53	5,84	0,00680	8,95
60	1,93	1,40	5,85	0,00680	8,95
90	1,81	1,29	5,80	0,00680	8,95
120	1,67	1,15	5,71	0,00680	8,95
150	1,52	0,99	5,56	0,00680	8,95
180	1,38	0,86	5,37	0,00680	8,95
210	1,26	0,73	5,12	0,00680	8,95
240	1,15	0,62	4,83	0,00680	8,95
270	1,03	0,51	4,49	0,00680	8,95
300	0,93	0,40	4,09	0,00680	8,95
330	0,83	0,30	3,65	0,00680	8,95
360	0,74	0,22	3,16	0,00680	8,95
390	0,66	0,13	2,61	0,00680	8,95
420	0,59	0,06	2,02	0,00680	8,95
450	0,53	0,00	1,38	0,00680	8,95

El dato perteneciente a la casilla eliminado no se tomó en cuenta, ya presentaba un valor menor al doble de los otros 2 datos con los que se obtuvo la media.

Fuente: elaboración propia.