



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS

ESTUDIO DE LA DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA CON
UNA MEZCLA TERCIARIA (SAL, CHILE Y JUGO DE
LIMÓN) Y LA CINÉTICA DE SECADO CON MICROONDAS
DE REBANADAS DE PAPAYA (*Carica Papaya L.*)

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO INDUSTRIAL

PRESENTAN:

AMAYA BAUTISTA GUSTAVO ANDRES
CRISTOBAL SAN JUAN KARLA ESTEFANI

ASESOR:
M. EN C. ALFREDO GARCÍA DE LA CRUZ

CIUDAD DE MÉXICO, JUNIO 2018



T-045-18

Ciudad de México, a 28 de mayo de 2018.

A los C. Pasantes:

KARLA ESTEFANI CRISTÓBAL SAN JUAN
GUSTAVO ANDRÉS AMAYA BAUTISTA

Boleta:
2014320184
2014320030

Carrera:
IQI
IQI

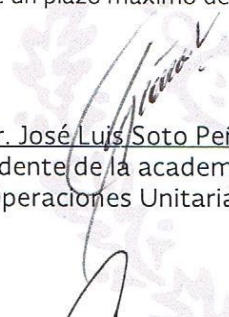
Generación:
2013-2017
2013-2017


Mediante el presente se hace de su conocimiento que la Subdirección Académica a través de este Departamento autoriza que el C. **Ing. Alfredo García De la Cruz** sea asesor en el tema que proponen ustedes desarrollar como prueba escrita en la opción **Tesis Colectiva**, con el título y contenido siguiente:

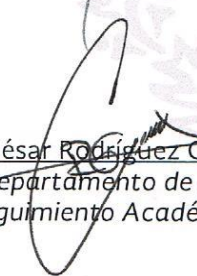
“Estudio de la deshidratación osmótica con una mezcla terciaria (sal, chile y jugo de limón) y la cinética de secado con microondas de rebanadas de papaya (Carga Papaya L.)”

Resumen.
Introducción.
I.- Generalidades.
II.- Materiales y métodos.
III.- Desarrollo experimental.
IV.- Análisis de resultados.
Conclusiones.
Referencias.

Se concede un plazo máximo de un año, a partir de esta fecha, para presentarlo a revisión por el Jurado asignado.


Dr. José Luis Soto Peña
Presidente de la academia de
Operaciones Unitarias


Ing. Alfredo García De la Cruz
Director
Ced. Prof. 2402844


Ing. César Rodríguez Guerrero
Jefe del Departamento de Evaluación y
Seguimiento Académico.


Ing. Víctor Manuel Feregrino Hernández
Subdirector Académico

T-045-18

Ciudad de México, a 15 de junio de 2018.

A los C. Pasantes:

KARLA ESTEFANI CRISTÓBAL SAN JUAN
GUSTAVO ANDRÉS AMAYA BAUTISTA
PRESENTE


Boleta:	Carrera:	Generación:
2014320184	IQI	2013-2017
2014320030	IQI	2013-2017

Los suscritos tenemos el agrado de informar a usted, que habiendo procedido a revisar el borrador de la modalidad de titulación correspondiente denominado:


“Estudio de la deshidratación osmótica con una mezcla terciaria (sal, chile y jugo de limón) y la cinética de secado con microondas de rebanadas de papaya (Carica Papaya L.)”

encontramos que el citado Trabajo escrito de **Tesis Colectiva**, reúne los requisitos para autorizar el Examen Profesional y **PROCEDER A SU IMPRESIÓN** según el caso, debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se le hicieron.


Atentamente
JURADO


Ing. Rubén Castelar Batalla
Presidente


Ing. Ismael Medina Mondragón
Secretario


M. en C. María Elena Jiménez Vieyra
1er. Vocal


Ing. Alfredo García De la Cruz
2º Vocal


Ing. Baldemar Martínez Hernández
3er. Vocal



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E
INDUSTRIAS EXTRACTIVAS





CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad México del día **15** del mes de **junio** del año **2018**, el/la que suscribe: **Karla Estefani Cristóbal San Juan** y **Gustavo Andrés Amaya Bautista**, estudiantes del Programa de: **Ingeniería Química Industrial** con número de Boleta: **2014320184** y **2014320030**, respectivamente manifiestan que es autor/a intelectual del presente trabajo escrito, por la opción: **Tesis Colectiva** bajo la dirección del profesor/a **Ing. Alfredo García De la Cruz** ceden los derechos del trabajo intitulado **Estudio de la deshidratación osmótica con una mezcla terciaria (sal, chile y jugo de limón) y la cinética de secado con microondas de rebanadas de papaya (Carica Papaya L.)**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección de correo electrónico **karla.cristobalsj@hotmail.com**, y **ga_amaya24@hotmail.com** Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Atentamente


Karla Estefani Cristóbal San Juan
Nombre y Firma del/la estudiante


Gustavo Andrés Amaya Bautista
Nombre y Firma del/la estudiante


Alfredo García de la Cruz
Nombre y Firma del profesor/a

Reconocimientos

Al Instituto Politécnico Nacional por darme la oportunidad de desarrollar mis conocimientos, habilidades y actitudes como profesionalista dentro de esta gran institución y permitirme ser parte de ella.

A la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas por todas las enseñanzas y experiencias brindadas, que me permitieron desarrollar mis habilidades y conocimientos como ingeniero químico industrial.

Gustavo Andrés Amaya Bautista

Agradecimientos

Agradezco a mis padres, por darme la oportunidad de realizar mis estudios, por hacerme una persona ética con valores y principios, por todo su amor, apoyo y confianza incondicional que brindaron a lo largo de este camino, que me inspiró a seguir adelante a pesar de todas las dificultades. Deseo que este logro lo sientan como suyo, pues sin ustedes esto no hubiera sido posible.

A mi padre Adelfo Bertín Amaya Peralta, por enseñarme que hay que trabajar duro, ser disciplinado y perseverante para conseguir todo lo que me proponga en la vida, a no estar conforme con lo que he conseguido, sino a luchar por más y superarme constantemente.

A mi madre María Elena Bautista Flores, por enseñarme a no tener miedo de expresar mis emociones y reafirmar que si es necesario trabajar duro pero nunca debo olvidarme de la familia, pareja y amigos, pues son parte importante en mi vida para poder ser feliz.

A mi mejor amiga Karla Estefani Cristobal San Juan, por su apoyo y su amistad desinteresada que me ha brindado desde que la conocí y sobre todo, por aceptar ser parte de este trabajo y acompañarme en esta última etapa de la carrera haciéndola mucho más fácil de superar.

Al profesor Alfredo García de la Cruz, por guiarme en esta difícil etapa de la carrera, por todo su tiempo, paciencia y conocimientos compartidos para el desarrollo de este trabajo.

Gustavo Andrés Amaya Bautista

RECONOCIMIENTOS

AL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Por darme la oportunidad de entrar a sus aulas y brindarme la herramienta más valiosa que es el estudio, por eso soy y seré con mucho orgullo Politécnica.

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
QUÍMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS

Por permitirme ser parte de la comunidad estudiantil, por todas las enseñanzas que a través de los profesores me otorgaron para poder formarme como ingeniero químico, por enseñarme a mantenerme firme, segura y con la cabeza en alto ante cualquier adversidad y por todas las vivencias.

Karla Estefaní Cristóbal San Juan

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, por su apoyo, paciencia, esfuerzo, amor y confianza incondicional, que me inspiró a seguir adelante a pesar de todas las dificultades. Espero que comprendan que mis ideas, esfuerzos y logros han sido suyos e inspirados en ustedes.

A mi padre Juan Carlos Cristobal Loya, por apoyarme y alentarme a seguir adelante a pesar de las dificultades que se me presenten, enseñarme a ser perseverante y confiar en mí para lograr mis objetivos

A mi madre María Inés San Juan Agapito, por inculcarme los valores que ahora poseo, ser mi guía, por sus noches de desvelo acompañándome y ayudándome en todo momento, por su presencia, esencia y amor.

A mi hermana Tania Lizeth Cristobal San Juan que ha sido una pieza clave en mi formación, su apoyo, comprensión y confianza.

A mi mejor amigo Gustavo Andrés Amaya Bautista, por su apoyo durante toda la carrera, por tomarme en cuenta en sus proyectos, sus palabras de ánimo y en general por su amistad.

Al profesor Alfredo García de la Cruz por su labor constante, paciencia, apoyo, experiencia compartida y sabiduría transmitida para el desarrollo de esta tesis.

Karla Estefaní Cristobal San Juan

CONTENIDO

	PAG.
Resumen	
Introducción	1
CAPÍTULO I GENERALIDADES	3
I.1 Papaya	3
I.2 Deshidratación osmótica	10
I.3 Secado	13
I.4 Cinética de secado	15
I.5 Microondas	17
I.6 Secado con microondas	21
I.7 Diseño factorial experimental	22
I.8 Metodología de superficie de respuesta (MSR)	23
CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS	25
II.1 Materia prima	25
II.2 Métodos	25
II.2.1 Determinación de humedad inicial y final	25
II.2.2 Determinación de sólidos totales	25
II.3 Equipo	25
II.4 Diseño experimental	26
CAPÍTULO III EXPERIMENTACIÓN	29
III.1 Procedimiento experimental	29
CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS	31
OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES	49
REFERENCIAS	50

ÍNDICE DE FIGURAS

	PAG.
Figura I.1 Árbol de papaya	3
Figura I.2 Hoja de árbol de Papaya	5
Figura I.3 Floración del árbol de papaya	6
Figura I.4 Fruto de la Papaya Maradol	10
Figura I.5 Magnetrón	18
Figura I.6 Calentamiento convencional	19
Figura I.7 Calentamiento con microondas	20
Figura I.8 Superficie de respuesta del rendimiento esperado en función de la temperatura y la presión	23
Figura I.9 Gráfica de contorno de una superficie de respuesta	24
Figura III.1 Diagrama de bloques del proceso experimental	30
Figura IV.1 Curva de cinética de secado del experimento 7	32
Figura IV.2 Curva de cinética de secado del experimento 15	32
Figura IV.3 Curva de cinética de secado del experimento 16	33
Figura IV.4 Curva de cinética de secado del experimento 17	34
Figura IV.5 Curva de cinética de secado ajustada del experimento 7	35
Figura IV.6 Curva de cinética de secado ajustada del experimento 15	36
Figura IV.7 Curva de cinética de secado ajustada del experimento 16	36
Figura IV.8 Curva de cinética de secado ajustada del experimento 17	37
Figura IV.9 Gráfica de la velocidad de secado del experimento 7	38
Figura IV.10 Gráfica de la velocidad de secado del experimento 15	39
Figura IV.11 Gráfica de la velocidad de secado del experimento 16	39
Figura IV.12 Gráfica de la velocidad de secado del experimento 17	40
Figura IV.13 Fotografías de la rebanada de papaya antes (a) y después (b) de la Deshidratación Osmótica	41
Figura IV.14 Fotografía de producto seco de experimento 7	42

CONTINUACIÓN

Figura IV.15 Fotografía de producto seco de experimento 15	43
Figura IV.16 Fotografía de producto seco de experimento 16	43
Figura IV.17 Fotografía de producto seco de experimento 17	44
Figura IV.18 Gráfica de superficie de respuesta de la humedad después del tiempo de secado en función del nivel de potencia y de la humedad después de la deshidratación osmótica	45
Figura IV.19 Gráfica de superficie de respuesta de la humedad después del tiempo de secado en función del intervalo de tiempo de secado y de la humedad después de la deshidratación osmótica	46
Figura IV.20 Gráfica de superficie de respuesta de la humedad después del tiempo de secado en función del espesor y de la humedad después de la deshidratación osmótica	47
Figura IV.21 Gráfica de superficie de respuesta de la humedad después del tiempo de secado en función del tiempo de la deshidratación osmótica y de la humedad después de la deshidratación osmótica	48

ÍNDICE DE TABLAS

	PAG.
Tabla I.1 Elementos nutritivos contenidos en la papaya (tipo Centro América) por cada 100g	8
Tabla I.2 Modelos matemáticos empleados en la cinética de secado	16
Tabla II.1 Características del horno de microondas utilizado	26
Tabla II.2 Diseño Experimental	27
Tabla II.3 Factores Fijados	28
Tabla IV.1 Mejores resultados	31

RESUMEN

Se realizaron 10 experimentos preliminares para obtener las condiciones de operación de la deshidratación osmótica (espesor de la muestra, concentración de la solución, tiempo y temperatura), así como las condiciones de operación en el secado con microondas (porcentaje del nivel de potencia e intervalos de tiempo).

Con los datos obtenidos de los experimentos preliminares, se procedió a realizar un diseño experimental factorial completo de 2^4 donde se analizaron los siguientes factores: porcentaje del nivel de potencia, intervalo de tiempo de secado, espesor de la muestra y tiempo de deshidratación osmótica dando un total de 16 experimentos y con 4 puntos centrales. Siendo el total de 20 experimentos.

Se utilizó software Origin versión 8.0 para construir, ajustar y derivar las curvas de cinética de secado. Este software también proporciona el coeficiente de regresión (R^2) y poder analizar la curva generada en comparación con la curva ajustada.

También se utilizó el programa Statistica versión 8.0 para generar las gráficas de superficie de respuesta y poder analizar los parámetros que influyen en la deshidratación osmótica y secado con microondas del producto final. Así se pueden optimizar las condiciones de todo el proceso.

Los mejores resultados se muestran en la Tabla IV.1, en la cual se observa la ecuación generada, el coeficiente de correlación y la humedad final del producto seco.

INTRODUCCIÓN

La calidad de los alimentos y el costo de su fabricación son los factores más importantes para ser considerados cuando se escoge un método de preservación de alimentos. El agua, es uno de los principales componentes del alimento, tiene una influencia directa en la calidad y conservación de los alimentos a través de su efecto en los cambios fisicoquímicos y biológicos. La eliminación del agua o dificultar el acceso de esta para el desarrollo microbiano es la principal tarea para preservar los alimentos (Lenart, 1996).

El objetivo principal de los productos sometidos al secado es permitir periodos de almacenamiento prolongados, minimizar los requisitos de embalaje y reducir los pesos de envío (Maroulis y Saravacos, 2003).

Los alimentos secos, especialmente frutas y vegetales, se pueden almacenar y transportar a un costo relativamente bajo. Sin embargo, la eliminación del agua conlleva a una disminución seria en los valores nutritivos y sensoriales (Lenart, 1996). Uno de los objetivos de investigación es alcanzar la mejor calidad posible en el producto final.

La deshidratación osmótica es una técnica útil que involucra la inmersión del producto en una solución acuosa hipertónica llevando a una pérdida de agua a través de las membranas celulares del producto y un flujo subsecuente a lo largo del espacio intercelular antes de la difusión en la solución (Serenio y colaboradores, 2001). Para la deshidratación de frutas, se han usado soluciones de sacarosa con concentraciones de 50 a 70° Bx (Lerici y colaboradores, 1985).

El proceso osmótico ha recibido considerable atención como un pretratamiento de secado, así como para reducir el consumo de energía y mejorar la calidad del alimento (Jayaraman y Das Gupta, 1992; Karathanos y colaboradores, 1995; Serenio y colaboradores, 2001; Torreggiani, 1993). Como parte del proceso de conservación de alimentos y vegetales, después de la deshidratación osmótica, se debe usar un método complementario, tal como secado convencional, congelación o pasteurización (Sankat y colaboradores, 1996).

De acuerdo con Pokharkar y colaboradores (1997), las principales ventajas del proceso de deshidratación osmótica como un pretratamiento son: inhibición del oscurecimiento enzimático, retención del color natural sin adición de sulfitos y alta retención de compuestos volátiles durante el subsecuente secado (El-Aouar y colaboradores, 2003).

El secado es una de las operaciones unitarias más antigua y común, la cual combina la transferencia simultánea de calor y masa. Además, es uno de los procesos que consumen más energía debido a su baja eficiencia en el secado convectivo tradicional con aire caliente. Para los sistemas con velocidad de secado decreciente

característica, se puede requerir tiempo de secado prolongado para ese proceso debido a que la eliminación de la humedad es lenta y su consumo de energía es mayor en esta etapa. Por lo tanto, para superar este problema el secado dieléctrico, en particular, el secado con microondas ha recibido atención significativa en los últimos años (Khodabakhshi y colaboradores, 2015).

Durante el secado con microondas, el calor se puede producir directamente en el volumen total del material a través del 'calentamiento volumétrico'. Por lo tanto, la dirección de la transferencia de calor en el secado con microondas es opuesta a la del secado convectivo tradicional en la cual el calor se transfiere del exterior del medio térmico al producto a secar. El proceso de secado con microondas posee un tiempo de ajuste térmico más corto así que el tiempo de secado se puede reducir significativamente llevando a una eficiencia elevada de energía. (Khodabakhshi y colaboradores, 2015).

Los objetivos del presente trabajo son:

Objetivo general

Estudiar la deshidratación osmótica con una mezcla terciaria (sal, chile y jugo de limón) y la cinética de secado con microondas de rebanadas de papaya.

Objetivos específicos

1. Determinar las condiciones óptimas de operación en la deshidratación osmótica.
2. Analizar cómo influye el espesor de la muestra en la deshidratación osmótica y secado con microondas.
3. Establecer el tiempo de secado y el nivel de potencia de microondas óptimos.
4. Seleccionar las mejores condiciones de operación.
5. Alcanzar la menor humedad en el producto final.
6. Obtener las mejores condiciones de operación en ambos procesos utilizando el Software Statistica versión 8 para su análisis.

Capítulo I: Generalidades

Capítulo I GENERALIDADES

I.1 Papaya [1]

El papayo (*Carica papaya* L.), también conocido como papaya (México), paw paw (Australia) y mamão (Brasil), es una planta (Figura I.1) de rápido crecimiento y tiempo de vida relativamente corto, perteneciente al género *Carica* (dentro de la familia Caricaceae), el cual incluye 14 especies; de las cuales destaca la papaya por su importancia económica.



Figura I.1 Árbol de Papaya.

Su nombre proviene del griego *karike*, que es un tipo de higuera, y fue propuesto por Carlos Linneo, ya que encontró similitud entre las hojas de ambas especies. Por otro lado, el vocablo papaya es probablemente una adaptación de *kapáda*, su nombre nativo caribeño.

En general, se considera que esta planta es originaria del sur de México y Centroamérica, aunque existe cierta controversia ya que algunos investigadores sugieren que podría ser nativa del Caribe, en tanto otros la ubican entre Nicaragua y Honduras, o al Noroeste de América del Sur, en la vertiente oriental de los Andes.

Históricamente, la primera referencia en que aparece mencionada se encuentra en el libro "Historia Natural y General de las Indias" del cronista y conquistador español Gonzalo Fernández de Oviedo (1478-1557), quien en 1535 reportó a los reyes de España haber visto plantas de papaya creciendo en Centroamérica.

Esta planta de tipo herbáceo puede alcanzar una altura que va desde 1.8 m en el caso de ejemplares silvestres, hasta 6.1 metros en los cultivados, y se caracteriza por contar con un solo tallo erecto, grueso, fistuloso, carnoso de 20-30 cm. de diámetro, con una corteza lisa marcada por cicatrices producto del crecimiento foliar. Conforme se va desarrollando, las hojas viejas se van cayendo de manera natural, de manera que solo se conservan funcionales las jóvenes y las adultas en la parte superior, formando una corona.

Las hojas (Figura I.2) son grandes, de color verde oscuro o verde amarillo, brillante, marcadas en forma visible por las nervaduras hundidas de color blanco amarillento y las venas reticuladas; por debajo son de color verde amarillento pálido y opaco con nervaduras y venas prominentes y visibles; con pedúnculos de 1 metro de longitud. La base es profundamente cordada con lóbulos sobrepuestos; generalmente mostrando nueve, aunque esta cifra puede variar entre 7 y 11. Su textura es lisa, más o menos profundamente palmeadas con venas medias robustas, irradiantes. Su promedio de vida oscila entre 4 y 6 meses. En el caso de las hojas maduras, el pecíolo de las mismas generalmente se extiende horizontalmente desde el tallo hasta alcanzar una longitud de 45 a 70 cm y 0.5-1.5 cm de grueso, dependiendo de la variedad. En el caso de especímenes en buen estado normalmente poseen entre 30 y 40 hojas funcionales, por lo que cada hoja representa aproximadamente el 3% del área foliar total.



Figura I.2 Hoja del árbol de papaya

En algunas ocasiones, especialmente en ejemplares de 4 a 5 años de edad, los cuales ya han dejado atrás su etapa productiva, la planta puede producir un brote vegetativo lateral. Para su cultivo, lo más recomendable es que el papayo cuente sólo con un tallo, facilitando el acceso a los frutos, por lo que estas ramas o crecimientos se deben suprimir manualmente antes de que tengan más de 10 centímetros de longitud para que el proceso sea sencillo y no afecte a la planta. De manera natural, el papayo tiene 6 tipos de flores (Figura I.3), de cinco pétalos, carnosos, cerosos y escasamente perfumados cuyo género se clasifica en masculino, femenino y hermafrodita, por lo que se considera que es una planta polígama. Incluso algunas variedades pueden cambiar de sexo de manera temporal por cambios en la temperatura ambiente o después de estar descabezadas. En términos generales, las poblaciones pueden estar constituidas por plantas dioicas (masculinas y femeninas únicamente), ginodioicas (hermafroditas y femeninas) y troicas o polígamas, que presentan las tres formas sexuales.



Figura I.3 Floración del árbol de papaya.

En el caso de plantas masculinas, generalmente tienen flores exclusivas o predominantemente masculinas, en ramilletes de pedúnculo largos, con 10 estambres y un ovario vestigial; y normalmente no produce frutos. Su presencia en los campos se justifica puesto que se requieren entre 5-10% de estas plantas como polinizadores en poblaciones dioicas. En algunas ocasiones pueden llegar a presentarse algunas flores hermafroditas en los ápices de las inflorescencias, pero los frutos resultado de las mismas son pequeños y de bajo o nulo valor comercial.

La flor femenina se forma en árboles hembra, en inflorescencias de pedúnculos cortos con tres a cinco flores y es solitaria, no tiene estambres. El pistilo se compone del estigma sentado en el ovario, el cual es grande y produce frutos redondeados. La planta hermafrodita puede presentar hasta cinco diferentes tipos de flores, las cuales se dan a partir de pedúnculos cortos o de mediana longitud que contienen entre cinco y treinta flores, dependiendo del tipo.

Entre ellos, el más deseable es el conocido como hermafrodita *elongata*, que tiene 10 estambres y ovario alargado, y que produce frutos largos. También resulta deseable el tipo hermafrodita *pentadría*, con cinco estambres y ovario redondo, ya que produce frutos ovales y redondos surcados en la base.

Por otro lado, el tipo de flor hermafrodita intermedio es indeseable, ya que sus frutos son deformes pues algunos filamentos de los estambres se encuentran unidos al ovario. Igualmente, es indeseable el tipo de flor llamado hermafrodita estéril de verano, ya que no tiene ovario. Prácticamente no produce frutos más que los llamados “chillos”, que son muy pequeños y delgados y carecen de valor comercial. Aquellas plantas en las que predomina este tipo de flor son improductivas, aunque las estaciones del año y las variaciones ambientales, especialmente cambios en la temperatura, pueden modificar este comportamiento. Finalmente, estas plantas también pueden presentar flores masculinas.

Comercialmente, el objetivo principal de la producción es la obtención del fruto, una baya conocida como papaya que contiene alrededor de 500 semillas ovoides, negras, de 5 mm de largo y encerradas en un arilo transparente y gelatinoso. Generalmente éstas son descartadas en favor de la pulpa, sin embargo, una vez secas y tamizadas pueden emplearse como condimento por su sabor picante, similar al de la pimienta negra.

En cuanto al tamaño y peso del fruto, éste puede ser de entre 10-25 cm o más de largo y 7-15 cm o más de diámetro, y oscila entre 400 gramos y 6 kilos, dependiendo de la variedad y de su posición en la planta; los más grandes son aquellos ubicados en la parte baja del tallo, y conforme aumenta la altura va disminuyendo el tamaño del mismo, de manera que los ubicados en la zona superior son los más chicos. Para favorecer su desarrollo, se acostumbra realizar *aclareo* de flores y frutos, eliminando los más defectuosos y distribuyéndolos equitativamente para evitar que se dañen entre sí.

La pulpa de una papaya madura es de color amarilla, roja anaranjada o rosada y su consistencia es cremosa pero firme, carente de fibras, dulce y refrescante. Está cargada de nutrientes (Tabla I.1), incluyendo vitamina A, vitamina C, complejo B, potasio, magnesio, fibra, ácido fólico y pequeñas cantidades de calcio y hierro. Contiene entre un 7 y un 9% de azúcares totales, y se consume principalmente como fruta fresca, en postre, licuado o ensalada. Su desarrollo está íntimamente ligado a la cantidad de luz solar que recibe la planta, siendo este el principal factor para su cuidado, por lo que durante los meses de verano el contenido de azúcar en la fruta se eleva. En cuanto a la piel que la envuelve, ésta es suave y delgada, de color verde amarillento, amarillo o anaranjado cuando madura. Algunas variedades siguen siendo verdes cuando ya están maduras, aunque por lo general la piel amarillea con la maduración.

Tabla I.1 Elementos nutritivos contenidos en la papaya (tipo Centro América) por cada 100g.

Calorías	23.1 - 25.8
Humedad	85.9 - 92.6 g
Proteínas	0.081 - 0.34 g
Grasas	0.05 - 0.96 g
Carbohidratos	6.17 - 6.75 g
Fibras	0.5 - 1.3 g
Cenizas	0.31 - 0.66 g
Calcio	12.9 - 40.8 mg
Fósforo	5.3 - 22.0 mg
Hierro	0.25 - 0.78 mg
Carotenos (Cryptoxantina)	0.0045 - 676 mg
Tiamina	0.021 - 0.36 mg
Riboflavina	0.024 - 0.58 mg
Niacina	0.0227- 555 mg
Ácido Ascórbico	35.5 - 71.3 mg
Triptofano	4 - 5 mg
Metionina	1 mg
Lisina	15 - 16 mg
[1]	

El consumo de papaya es ideal para aliviar el estreñimiento debido a que su contenido de fibra le confiere propiedades laxantes. Ejerce un efecto saciante, lo que beneficia a las personas que llevan a cabo una dieta para perder peso. Asimismo, por su aporte de vitamina C y de provitamina A, se recomienda especialmente su consumo a quienes tienen un mayor riesgo de sufrir carencias de dichas vitaminas: personas que no toleran los cítricos, el pimiento u otros vegetales, y para quienes deben llevar a cabo una dieta baja en grasa y por tanto con un contenido escaso de vitamina A o para personas cuyas necesidades nutritivas están aumentadas.

Debido a que la vitamina C aumenta la absorción del hierro de los alimentos, se recomienda también su consumo en casos de anemia ferropénica, acompañando a los alimentos ricos en hierro o a los suplementos de este mineral, ya que esto acelera la recuperación. La vitamina A también es necesaria para la salud de la piel. Además, por su riqueza en potasio y bajo aporte de sodio, es muy recomendable para quienes sufren de hipertensión arterial o afecciones cardiovasculares.

El periodo de producción comienza aproximadamente entre 8 y 10 meses después del trasplante, excepto en algunas variedades como Betty que puede florecer dos o tres meses después de ser plantada, y a partir de ese momento el rendimiento se mantiene constante hasta que la planta alcanza los 20 a 22 meses de edad. Anualmente, un papayo produce unos cincuenta frutos, de los que se deben dejar para cosechar en plena madurez unos veinte y coger los restantes aún verdes. En promedio, la planta produce de 35-40 kg de fruta durante este periodo, lo que representa un rendimiento de 60–80 toneladas por hectárea. Posteriormente, tanto el número de frutos como la calidad de los mismos disminuyen, además de que las plantas alcanzan una altura mucho mayor, lo que eleva los costos de recolección u obtención de látex.

La papaya es una fruta delicada, muy susceptible a dañarse con los golpes, por lo que la cosecha se realiza manualmente, de preferencia con ayuda de una persona encargada de acomodar las frutas protegiéndolas con láminas de espuma o envolviéndolas cuidadosamente.

Se debe verificar que su textura sea firme y libre de aéreas blandas al tacto, así como que no muestre magulladuras, manchas de látex, cicatrices o raspaduras y agujeros. Para desprender el fruto se corta la mitad del pedúnculo con un cuchillo afilado o con tijeras, los cuales deben ser desinfectados con frecuencia, y se debe evitar exponer la fruta al sol.

Debido a que el papayo se reproduce por medio de semillas, se han desarrollado un gran número de variedades y continuamente aparecen nuevas, empleándose en cada zona de cultivo las mejor adaptadas a sus condiciones climatológicas. Las variedades mestizas son poco estables y se debe tener cuidado en obtener semillas de progenitores que pertenezcan a la misma variedad, de lo contrario en dos o tres generaciones una variedad puede perder su identidad. Entre las más conocidas a nivel mundial están: Solo, Bluestem, Graham, Betty, Fairchild, Rissimee, Puna, Hortusgred, Higgins, Wilder, Hortus Gold, Petersen, Zapote, Pusa, Maradol.

Por su importancia para nuestro país, destacan las siguientes variedades:

Solo. Descubierta en Barbados en 1911 y comercializada a partir de 1936, esta variedad hermafrodita produce frutos pequeños de forma aplanada y de cuello corto, con peso entre los 400 y 800 gramos, de buen sabor, color salmón y con buenas características para el transporte. Se le conoce comúnmente como Hawaiana, pues es donde mayor auge ha tenido y en donde se han desarrollado dos grupos para hacer frente al virus de la mancha anular (PRSV, por sus siglas en inglés). Por un lado, se encuentran los tipos genéticamente modificados: Sunset (pulpa firme de color salmón rosado, peso entre 400 y 600 gramos), Rainbow y Sunup;

Por otro lado, están los no modificadas como Kapoho (pulpa color amarillo-naranja de consistencia firme, muy dulce y con peso de 400 a 800 gramos) y Sunrise (pulpa amarillo-naranja, peso entre 425 y 625 gramos).

Maradol. Es un cultivar ginodioico (población compuesta por plantas hermafroditas y femeninas), de origen cubano, introducido a México en 1977 por CONAFRUT. La fruta (Figura I.4) es alargada, cilíndrica, de gran tamaño y pueden llegar a pesar entre 1 y 3 Kg. La piel de la fruta es lisa y delgada, de color verde y no se torna amarilla conforme va madurando. La pulpa es de color roja o amarilla, y su sabor es dulce, aunque no es tan intenso como las variedades Hawaianas. Resultan muy sensibles a enfermedades post-cosecha como la antracnosis.



Figura I.4. Fruto de la Papaya Maradol.

I.2 Deshidratación Osmótica

La deshidratación osmótica (D.O.) es un proceso en contra-difusión simultánea de agua y solutos (Saputra, 2001) donde ocurren tres tipos de transferencia de masa en contracorriente: flujo de agua del producto a la disolución, transferencia de soluto de la disolución al producto y salida de solutos del producto (azúcares, ácidos orgánicos, minerales y vitaminas que forman parte del sabor, el color y el olor) hacia la disolución

(Sablani y Rahman, 2003; Van Nieuwenhuijzen y colaboradores, 2001), este último flujo es muy pequeño comparado con los otros dos, aunque es importante en las características organolépticas del alimento (Genina, 2002; Mendoza y Schmalko, 2002). Generalmente en la D.O. los solutos más empleados en la solución hipertónica son azúcares, sales, polioles y otros sólidos solubles (Matusek y Merész, 2002).

La deshidratación de vegetales por inmersión en soluciones osmóticas ha ido aumentando de interés durante las últimas décadas ya que puede mejorar la calidad del producto, cuando se tiene un proceso combinado de deshidratación osmótica con secado ya sea con aire, liofilizado o a vacío u otras técnicas de conservación. En la D.O. un alimento es inmerso en una solución concentrada conteniendo uno o más solutos. En el proceso la deshidratación parcial y la asimilación de soluto ocurren simultáneamente. Se transfiere más agua que soluto debido a la diferencia de permeabilidad de las membranas celulares (Bidwell, 1979). La D.O. realizada a temperatura ambiente, es un proceso mucho más gradual y suave que el proceso de secado por convección (Sunjka y Raghavan, 2004).

La D.O. es el fenómeno de la eliminación de agua en el tejido celular teniendo una menor concentración de soluto al inicio del proceso y mayor cuando este finaliza, ya que se tiene una membrana semipermeable y tiende al equilibrio entre ella y el medio osmótico (Tiwari, 2005). Además, la D.O. mejora la calidad del producto final, ya que evita el oscurecimiento oxidativo y la pérdida de componentes volátiles, reduce la acidez de la fruta, y puede disminuir el colapso estructural durante el secado posterior con aire (Del Valle y colaboradores, 1998).

La D.O. elimina el agua de la fruta hasta un determinado valor, pero el contenido final de agua es todavía alto para su adecuada conservación. Por lo tanto, estos alimentos no son estables y generalmente se requiere un proceso complementario de secado (Oliveira y colaboradores, 2006; Kumar y colaboradores, 2006). Algunos métodos complementarios de secado para alimentos deshidratados osmóticamente incluyen: secado con aire caliente, secado pulsado a vacío, liofilización, secado al sol y secado con microondas (Venkatachalapathy y Raghavan, 1999). Las características de calidad y la estabilidad de los alimentos deshidratados osmóticamente están fuertemente relacionadas con las condiciones de operación utilizadas en el método complementario de secado (Fito y colaboradores, 2001).

El uso de la D.O. asociado con otras tecnologías ha sido presentado como un proceso para obtener frutas mínimamente procesadas. (Escriche y colaboradores, 2000; Moreno y colaboradores, 2000; Tovar y colaboradores, 2001). La ligera reducción de la actividad del agua promovida por el proceso y la posible incorporación de aditivos tales como conservadores y agentes que disminuyen el pH, asociados con tratamientos térmicos suaves, empaquetado y refrigeración con atmósfera modificada u otras técnicas de

conservación leves, pueden proporcionar productos estables con buena nutrición, calidad sensorial y con características similares a esos productos frescos (Alzamora y colaboradores, 1993; Alzamora y colaboradores, 1997).

La transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de vegetales ha sido descrita por ecuaciones empíricas (Hawkes y Flink, 1978), o más rigurosamente, por el uso de ecuaciones analíticas de la ecuación de Fick para el agua (Beristain y colaboradores, 1990; Conway y colaboradores, 1983), también para ambas especies agua y soluto o por separado (Hough y colaboradores, 1993; Mauro y Menegalli, 1995; Nsonzi y Ramaswamy, 1998). En este último trabajo, el modelo también toma en cuenta el encogimiento. Sin embargo, la mayoría de los modelos supone que el término convectivo en las ecuaciones de transporte para la deshidratación osmótica es cero y que los coeficientes de difusión y la densidad en el sistema permanecen constantes a través del tiempo y la distancia. Además, estos modelos omiten los perfiles de concentración. Por lo tanto, la funcionalidad del coeficiente de concentración no es detectada (Mauro y Menegalli, 2003).

Bohuon y colaboradores (1994), usaron ecuaciones de transporte para cuatro diferentes componentes cuando ellos estudiaron la transferencia de masa en geles inmersos en soluciones ternarias y modelaron usando como referencia la velocidad del sólido en la matriz. Así, el flujo volumétrico en el encogimiento del material fue considerado. Como los geles se deforman considerablemente, los coeficientes promedio medidos son generalmente influenciados por las transformaciones estructurales del polímero. Un modelamiento detallado en este campo fue hecho por Mrani (1997), quién estudió las interacciones entre el transporte de agua y las propiedades elásticas de los geles (Mauro y Menegalli, 2003).

Los tejidos celulares son más complejos que los geles. Consecuentemente, igual cuando las ecuaciones de transporte consideran flujo volumétrico en el encogimiento del material y los coeficientes de difusión son tratados como dependientes de la concentración, la transferencia de masa será afectada por las propiedades celulares y la deformación de la matriz sólida. Un análisis del comportamiento de estos coeficientes a través del tejido en términos de la posición y concentración es muy útil para reconocer el significado de estos factores (Mauro y Menegalli, 2003).

La D.O. de fruta en una solución de azúcar previa al secado disminuye el contenido de agua mientras que simultáneamente aumenta el contenido de material seco. También ofrece algunas ventajas con respecto a la calidad de la fruta incluyendo la retención del color natural y la gran retención de compuestos volátiles durante el secado posterior. La combinación de la deshidratación osmótica con un proceso moderado de secado tal como el secado con microondas es un nuevo concepto que tiene el potencial para mejorar la calidad total de frutas secas en un tiempo más corto que

otros métodos de secado (Ahrne, 2005; Piotrowski y colaboradores, 2004; Venkatachalapathy y Raghavan, 1998). Venkatachalapathy y Raghavan (1998), concluyeron que la D.O. previa al secado con microondas produce un arándano seco que fue comparado con otro liofilizado en un tiempo mucho más corto (Pereira y colaboradores, 2007).

I.3 Secado

El secado es uno de los métodos más antiguos y eficientes para la conservación de alimentos, es una tecnología apropiada y bien conocida de una etapa post-cosecha que podría ser una opción para prologar la vida de anaquel de las frutas o vegetales, conservando su calidad y estabilidad, reduciendo la actividad de agua y el contenido de humedad, evitando así el deterioro y contaminación durante el almacenamiento (Akpınar y Bicer, 2005).

El objetivo de cualquier proceso de secado es producir un producto seco de calidad deseada con un costo mínimo y el máximo rendimiento posible. Un material biológico sufre algunos cambios físicos y químicos que pueden afectar la calidad final del producto deseado. Tradicionalmente, el secado de los materiales biológicos se ha logrado mediante secado por convección, donde el aire caliente actúa como portador de calor y humedad. (Sanga y colaboradores, 2002).

El secado es un proceso complicado, que implica simultáneamente el fenómeno de transferencia calor y masa acoplados (Alves-Filho y colaboradores, 1997; Ranjan y colaboradores, 2001; Ranjan y colaboradores, 2002; Kudra y Efremov, 2003) en la transferencias externa e interna en el material que se está secando (Mulet y colaboradores, 1989; Jayaraman y Das Gupta, 1992; Simal y colaboradores, 1996, 2003). Los factores que gobiernan los mecanismos de transferencia determinan la velocidad de secado. Estos factores son: presión de vapor del material y del aire de secado, temperatura y velocidad de aire, velocidad de difusión de la humedad en el material, espesor y superficie expuesta para el secado (Van Arsdel, 1973).

El secado se ha realizado tradicionalmente con aire caliente, pero este proceso puede producir cierta pérdida de textura, cambios de color y aroma (Novaković colaboradores, 2011). Este proceso tiene lugar generalmente en el periodo de velocidad decreciente donde la velocidad de secado es controlada por la difusión de agua desde el interior del producto a la superficie. En el secado convencional la velocidad de secado es mayor al inicio de él y disminuye gradualmente a medida que el frente de evaporación retrocede dando lugar a un tiempo más largo. La temperatura es más alta en la superficie y más baja en el interior. El proceso de secado se basa únicamente en la conducción de calor desde la superficie hasta el interior resultante en caso de endurecimiento del material. (Sanga y colaboradores, 2002).

En general, el secado de la mayoría del material biológico, sólo se observa un período de velocidad decreciente, en el que la transferencia de masa se ve influenciada por el movimiento de la humedad interna. A menudo, se asume un mecanismo de transporte por difusión, aunque otros mecanismos pueden estar involucrados (Mulet, 1994). Por lo tanto, la velocidad de secado es modelada utilizando el concepto de difusividad efectiva (Phoungchandang y Woods, 2000; Roberts y colaboradores, 2002).

Durante el secado, el transporte de la humedad es fuertemente afectada por cambios en las propiedades estructurales. El espesor, la formación de canales, y distribución de los poros están todos representando un camino preferencial para el transporte de humedad (Van der Zanden, 1995; Aguilera y Stanley, 1999; Aversa y colaboradores, 2011).

Los microcambios en la estructura física y química se producen durante el secado, incluyendo el encogimiento, la porosidad, cambios en la densidad verdadera, cambios en la densidad aparente, y los cambios en la composición química. Estos cambios se han explicado en conformidad con el período durante el proceso de secado en el que se producen período de (velocidad constante, primero y segundo periodos de velocidad decreciente).

1. En los períodos de velocidad constante y primero de decreciente, la estructura celular es elástica, lo que permite el encogimiento en el espacio vacío creado como resultado la evaporación del agua.

2. En el segundo período de velocidad decreciente la estructura celular se vuelve rígida, favorece o limita la formación de poros, así como el encogimiento, en función del contenido de humedad (X), así como el método y las condiciones de secado (Krokida y Maroulis, 2000; Madiouli y colaboradores, 2007).

El método de conservación más común para papayas y otras frutas tropicales en Tailandia es el secado convectivo en secadores de lecho fijo (Nagle y colaboradores, 2010), gabinete (Precoppe y colaboradores, 2011), túnel solar (Janjai y colaboradores, 2009a) o invernadero solar (Janjai y colaboradores, 2009b). La D.O. es llevada a cabo frecuentemente como un pretratamiento antes del secado convectivo, el cual involucra inmersión de piezas de frutas cortadas en soluciones azucaradas de 30-70 °Bx a un pH de 4 e intervalos de temperatura de 30 a 60°C. El proceso es generalmente aplicado en frutas tales como piña, mango, papaya y lichi con el fin de mejorar el sabor y mantener las características estructurales durante el secado (Riva y colaboradores, 2005).

I.4 Cinética de secado

Con el propósito de mantener la calidad del bioproducto, el estudio de la cinética del proceso de secado es de vital importancia para seleccionar la temperatura y el tiempo apropiados requeridos para que el proceso de secado sea satisfactorio. Además, el desarrollo del modelo matemático para el proceso de secado podría ser crucial, ya que permitiría a los ingenieros de diseño no solo elegir las condiciones de funcionamiento más adecuadas para el secado efectivo sino también dimensionar el equipo de secado para cumplir los parámetros de funcionamiento deseados (Perea-Flores y colaboradores, 2012; Gunhan y colaboradores, 2005).

El modelado matemático del fenómeno de secado es necesario para su evaluación, determinación de parámetros y optimización, por ello, los modelos validados deben describir, cuantificar y predecir el proceso de secado (Ferreira y Costa, 2010; Erbay e Icier, 2010; Chen y colaboradores, 2013; Vasic y colaboradores, 2014).

El uso de ecuaciones matemáticas para simulaciones de la cinética de la transferencia de agua ocurrida durante el secado como función de las condiciones empleadas es una herramienta útil con el fin de controlar y considerar un apropiado diseño de proceso (Vega-Galvez y colaboradores, 2008). La fruta seca está también sujeta a una pérdida de compuestos nutricionales y las condiciones cambian continuamente a lo largo del período de secado por lo tanto hace difícil determinar el tiempo de duración del proceso (Corzo y colaboradores, 2008). Esto involucra minimizar la pérdida de compuestos saludables que son responsables de proporcionar valor agregado a estos subproductos. Entonces, el modelado y la optimización llegan a ser una necesidad (Bas y Boyaci, 2007).

La distribución de la humedad o la cinética de secado en un substrato sometido al secado con microondas es complicada y fundamentalmente diferente del secado convectivo tradicional con aire caliente. Significativos esfuerzos de investigación se han dedicado a modelar el proceso de secado con microondas. Los modelos en términos generales se pueden clasificar como modelos de ajuste empíricos, teóricos, y semi-empíricos (Jian y colaboradores, 2017).

Un modelo empírico es una ecuación matemática que tiene parámetros que se ajustan en base a resultados experimentales, y la definición de su forma matemática no requiere la consideración de la teoría describiendo el fenómeno complejo de transferencia de calor y masa, geometría y las características fisicoquímicas del producto a secar. El modelo de Page (Page, 1949) y el modelo de Midilli–Kucuk (Wang y colaboradores, 2016) son los dos modelos de capa delgada empíricos más frecuentemente usados, los cuales efectivamente describen la cinética de secado en sistemas simples. Para un sistema multivariable (multidimensional), red neuronal artificial (RNA) es un método empírico más apropiado (Rodríguez y colaboradores, 2014).

Sin embargo, todos los modelos empíricos son métodos dependientes del material (Jian y colaboradores, 2017).

A diferencia de los métodos empíricos, se han hecho intentos para modificar los métodos teóricos con el fin de incluir todos los mecanismos de transporte posibles para cada fase, y describir los mecanismos de una manera numérica. Ejemplos típicos son el modelo de medios porosos de multifase de Datta (Datta, 2007a, 2007b) y otros modelos en los cuales consideraron la transferencia de calor y masa más detallada (Gulati y colaboradores, 2015; Hassini y colaboradores, 2015; Sun, 2014). Este método puede proporcionar una distribución detallada de la humedad. Sin embargo, además del tratamiento complejo de cada mecanismo, estos modelos exhiben limitaciones para describir el proceso de secado en la cual la difusión de humedad tiene un papel importante durante el proceso de transferencia (Jian y colaboradores, 2017).

En la Tabla I.2 se muestran los modelos matemáticos empleados en la cinética de secado convencional.

Tabla I.2 Modelos matemáticos empleados en la cinética de secado.

Ecuación modelo.	Nombre	Referencia
$MR = \exp(-kt)$	Newton	O'Callaghan y colaboradores (1971)
$MR = \exp(-kt^n)$	Page	Page (1949)
$MR = \exp(-kt)^n$	Modificación de Page	Overhults y colaboradores (1973)
$MR = a \exp(-kt)$	Herdenson y Pabis	Henderson y Pabis (1969)
$MR = a \exp(-kt) + c$	Logaritmica	Yagciolu y colaboradores (1999)
$MR = 1 + at + bt^2$	Wand y Singh	Wang y Singh (1978)
$MR = a \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-kbt)$	"Aproximación de la difusión"	Sharaf-Eldeen y colaboradores (1979)
$MR = a \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-gt)$	Verma	Verma y colaboradores (1985)
$MR = a \exp(-kt) + \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Modificación Herdenson y Pabis	Karathanos (1999)
$MR = a \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-kat)$	Dos términos exponenciales	Sharaf-Eldeen y colaboradores (1980)
$MR = \exp(-k(t/L^2)^n)$	Modificación de ecuación de Page II	Diamante y Munro (1991)
Togrul y Pehlivan, 2004		

Los métodos semi-empíricos tal como la segunda ley de Fick (SLF) y la aproximación de ingeniería de reacción (AIR) son más eficientes comparados a las aproximaciones antes mencionados. En la SLF, las distribuciones de humedad y temperatura son modeladas por las ecuaciones acopladas de balance de transferencia de calor y masa (Jumah y Raghavan, 2001; Souraki y Mowla, 2008) asumiendo que la evaporación ocurre solo en la superficie, la cual no se aplica a la evaporación interna por el 'calentamiento volumétrico' con microondas. La AIR (Putranto y Chen, 2016a, 2016b) es otro método semi-empírico que describe la cinética de secado basado en los principios de ingeniería de las reacciones químicas, donde la actividad de la energía en el secado solo se evalúa experimentalmente (Jian y colaboradores, 2017).

I.5 Microondas

La tecnología de calentamiento por microondas usa ondas electromagnéticas a 915 MHz o 2450 MHz para calentar materiales específicos. Debido a que esto es un método de calentamiento selectivo, volumétrico, e instantáneo, ha sido extensamente utilizado en el secado (Tahmasebi y colaboradores, 2014), en síntesis orgánica (Chuck y colaboradores, 2014), pirolisis de biomasa o residuos (Hussain y colaboradores, 2010), sinterización de materiales (Mahmoud y colaboradores, 2015), soldadura de metales (Dwivedi y Sharma, 2014), procesamiento de plasma (Lin y colaboradores, 2014), procesamiento de materiales poliméricos (Rabby y colaboradores 2015), la eliminación de contaminantes de gas o agua (Sun y colaboradores, 2014).

A pesar de sus distintas ventajas, el calentamiento con microondas es un proceso que convierte la energía de alta calidad en calor de baja calidad y que la eficiencia de la energía utilizada del proceso es una preocupación particular. Sin embargo, muy pocos estudios se han enfocado en pruebas o análisis de la eficiencia de energía en el calentamiento con microondas. La escasa literatura en la medición experimental de algunas síntesis o reacciones orgánicas (Moseley y Kappe, 2011; Razzaq y Kappe, 2008) y las simulaciones usando análisis de energía o exergía (Acevedo y colaboradores, 2015; Ranjbaran y Zare, 2013). Todos estos estudios indicaron que la eficiencia de la energía en el calentamiento con microondas podría ser baja, apenas superando el 20%, pero dirigieron esta cuestión principalmente desde la perspectiva de la utilización de la energía en algunos procesos de aplicación en su totalidad en lugar del calentamiento con microondas en sí mismo. El conocimiento más claro de las eficiencias de energía de la entrada de energía eléctrica a la energía térmica efectiva sigue siendo para obtener otras aplicaciones de calentamiento con microondas (Wang y colaboradores, 2015).

Un proceso de calentamiento con microondas puede ser dividido en dos etapas: la entrada de energía eléctrica es primero convertida a energía de microondas, y después la energía de microondas, en la forma de ondas electromagnéticas, es absorbida por un

medio dieléctrico y convertida a calor efectivo. Una consecuencia macroscópica de todo el proceso es el aumento de la temperatura del medio de calentamiento (Chan y Reader, 2000).

Generalmente, el dispositivo de calentamiento con microondas está compuesto por un generador de microondas (fuente de microondas) y una cavidad. El generador convierte la energía eléctrica de entrada a ondas electromagnéticas a una cierta frecuencia a través de un magnetrón (Figura I.5) y las lanza usando una antena. Subsecuentemente, en la cavidad se direccionan las microondas y pasan repetidamente a través del medio de calentamiento por una reflexión frecuente hasta que sean absorbidas o disipadas completamente. El eventual incremento de temperatura del medio de calentamiento refleja la eficacia del uso de energía eléctrica de entrada (Chan y Reader, 2000).

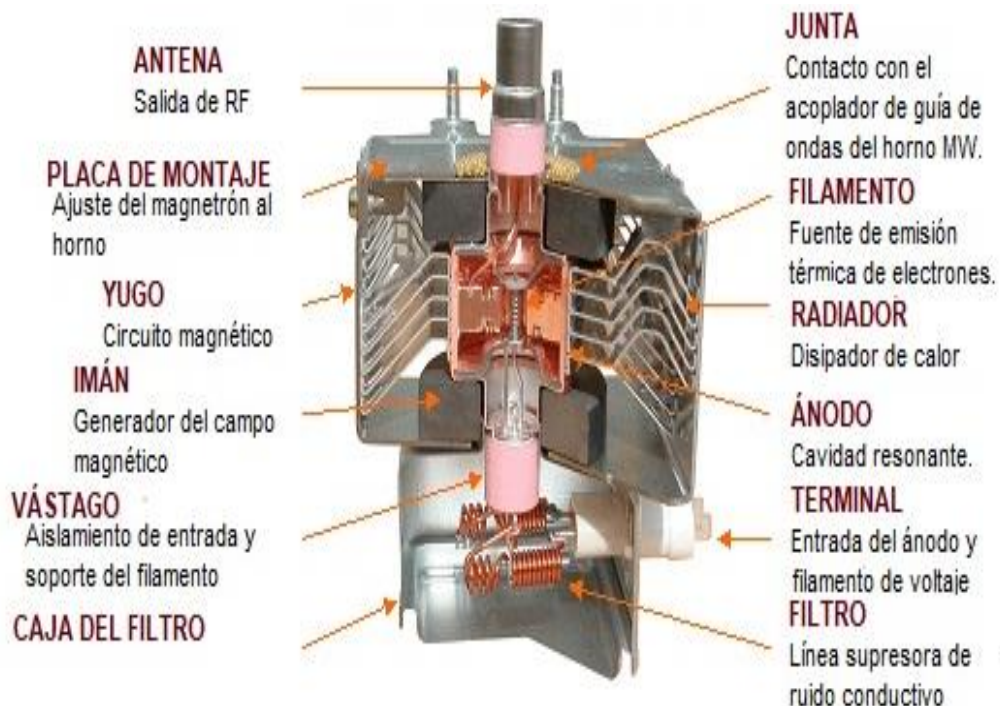


Figura I.5 Magnetron

Las ondas electromagnéticas con frecuencias entre 300 MHz y 300 GHz son conocidas como microondas. Una de las especialidades de las microondas es su capacidad para calentar los materiales basadas en las interacciones de las moléculas con el campo electromagnético. El calentamiento con microondas ocurre internamente y diferente al calentamiento convencional, las velocidades de calentamiento no están limitadas por la transferencia de calor de fuentes de calor externas. Por lo tanto, el calentamiento con microondas es más eficiente que el calentamiento convencional en

términos de velocidad y uniformidad de dicho proceso. Otra importante característica del calentamiento con microondas es la forma como se transfiere el calor comparado con el calentamiento convencional. El calentamiento convencional ocurre vía flujo de calor desde las fuentes externas y el frente de calentamiento se propaga desde la superficie al centro vía conducción o convección. Correspondiendo, a la superficie de la muestra tener la mayor temperatura que en el centro durante el calentamiento convencional, como se muestra en la Figura I.6. En contraste, el calentamiento con microondas ocurre desde el centro cuando la microonda penetra y genera calor en el interior de la muestra. Correspondiendo, al centro de la muestra permanecer generalmente a una mayor temperatura que la superficie durante el calentamiento con microondas, como mostrado esquemáticamente en la Figura I.7. El padrón inverso del calentamiento con microondas puede ser extremadamente benéfico para el proceso, donde el calor ha sido atrapado en el interior del material tal como la reacción de síntesis de combustión. Esto motivó a los investigadores aplicar el calentamiento con microondas como una alternativa al calentamiento convencional y a un tremendo crecimiento del procesamiento del material con microondas ha sido observado en las últimas décadas (Acevedo y colaboradores, 2015; Cano y colaboradores, 2015; Mushtaq y colaboradores, 2014; Liu y colaboradores, 2014; Hasanvand y Golparvar, 2014; Motevali y colaboradores, 2014; Rosa y colaboradores, 2013; Talebian-Kiakalaieh y colaboradores, 2013; Chandrasekaran y colaboradores, 2013).

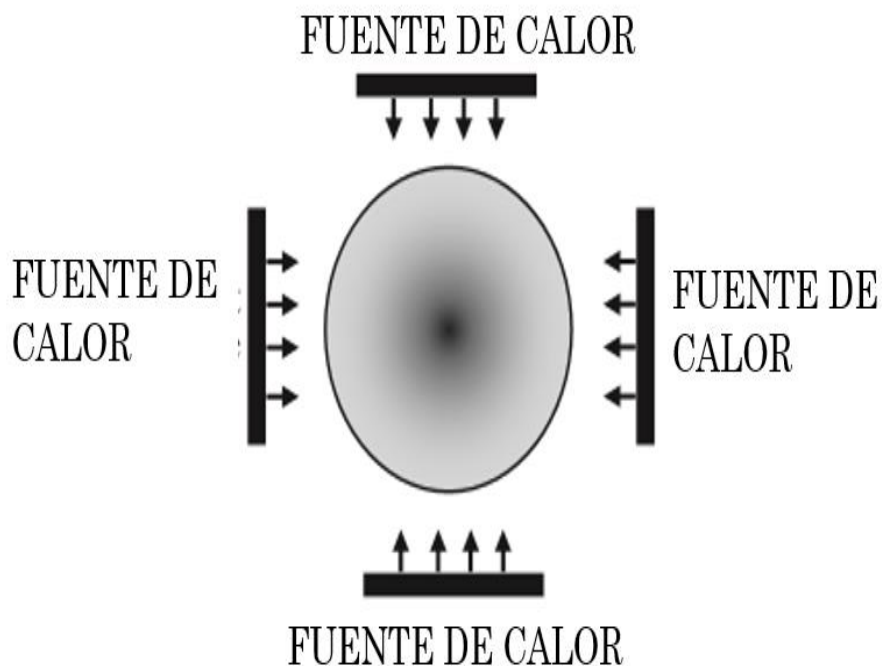


Figura I.6 Calentamiento convencional

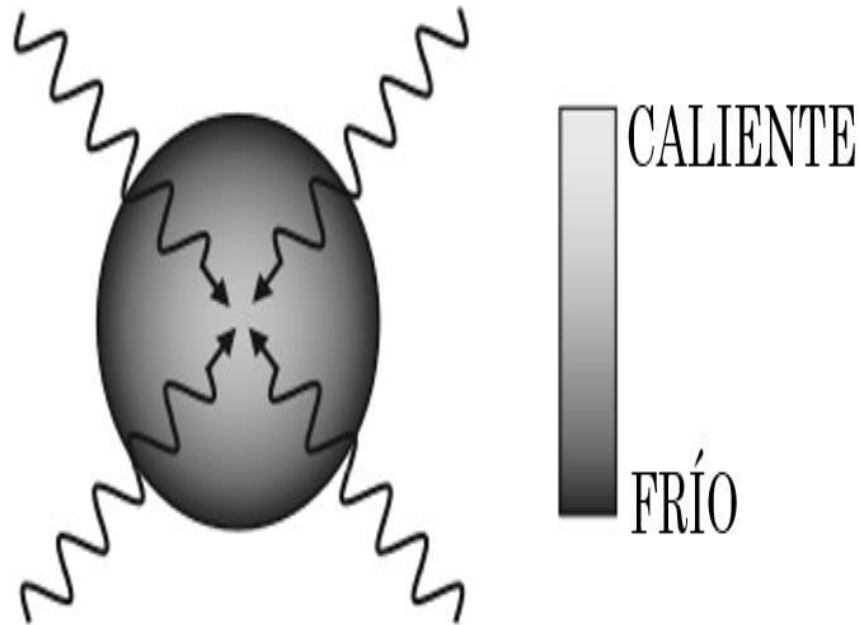


Figura I.7 Calentamiento con microondas

Mientras se lleva a cabo el proceso de microondas, las microondas irradian desde una fuente en todas las direcciones. Estas ondas transportan energía y durante el proceso de secado, el material absorbe esta energía y la convierte en calor mediante moléculas dipolares. El agua es la molécula polar común y un componente de los alimentos. Entonces, durante este proceso, las moléculas de agua convierten la energía de microondas en calor. Por lo tanto, las moléculas de agua comienzan a evaporarse como resultado de este calor, por lo que el material comienza a secarse (Decareau, 1985).

La base del calentamiento con microondas radica en la medida en que un material responde a los campos eléctrico y magnético alternando de las microondas. Las dos propiedades fundamentales que miden la respuesta de un material a un campo eléctrico son la permeabilidad o constante dieléctrica y pérdida dieléctrica. La permeabilidad o constante dieléctrica determina la capacidad de un material para almacenar energía eléctrica, mientras la pérdida dieléctrica determina la capacidad del material para convertir la energía eléctrica a calor. Similarmente, la capacidad de un material para almacenar y convertir la energía magnética a calor es determinada por la permeabilidad y la pérdida magnética, respectivamente. El almacenamiento de la energía eléctrica ocurre vía la polarización de las cargas ligadas, mientras que la conversión de la energía

eléctrica a calor ocurre vía relajación de las moléculas polarizadas (pérdida de polarización) así como la conducción de los electrones libres (pérdida de conducción) (Hippel, 1954; Balanis, 1989).

I.6 Secado con Microondas

Las mayores desventajas del secado de alimentos con aire caliente son la baja eficiencia de energía y el prolongado tiempo de secado durante el periodo de velocidad decreciente. Debido a la baja conductividad térmica de los materiales alimenticios en este período, la transferencia de calor hacia las secciones interiores de los alimentos es limitada durante el calentamiento convencional. Para prevenir las pérdidas significativas en la calidad, alcanzar tratamientos térmicos rápidos y efectivos se utilizan las microondas en el secado de alimentos (Maskan, 2000; Adu y Otten, 1996; Feng y Tang, 1998).

De acuerdo con Erle y Schubert (2001) el pretratamiento osmótico hace el secado con microondas más eficiente en términos de agua removida y actividad de agua alcanzada. Las principales razones de esto pueden ser las pérdidas dieléctricas más grandes causadas por la sacarosa. Padua (1993) observó que geles preparados de soluciones de sacarosa altamente concentrados absorbieron energía de microondas más eficientemente mostrando el calentamiento de la superficie y un centro relativamente frío como opuesto en los geles sin sacarosa, que absorbieron menos energía, mostrando un calentamiento central pronunciado y una superficie relativamente fría (Pereira y colaboradores, 2007).

En secado dieléctrico y con microondas, la generación de calor volumétrico en muestras húmedas debido a la energía electromagnética absorbida directamente por las moléculas de agua, da como resultado una mayor temperatura interior y por lo tanto la velocidad de eliminación de humedad es más rápida que en el secado por convección (Sanga y colaboradores, 2001; Mujumdar, 1995). Las ventajas de la energía de microondas han llevado a intentos de utilizar esta energía en muchas aplicaciones industriales, como calentamiento, secado, sinterización, esterilización, templado, reacciones químicas con microondas, etc, (Ayappa, 1997; Lehne y colaboradores, 1999; Saltiel y Datta, 1999; Tulasidas y colaboradores, 1995a; 1995b).

En comparación con el secado al sol y el secado con aire caliente, el secado con microondas es un método alternativo debido a su energía uniforme y alta conductividad térmica a los lados internos del material, utilización del espacio, saneamiento, ahorro de energía y condiciones de encendido/apagado (forma pulsada). El secado con microondas también reduce el tiempo de secado y evita que el alimento se descomponga enzimáticamente (Decareau 1985, 1992; Soysal y Öztekin, 2001; Zhang y colaboradores, 2006).

El secado con microondas crea un efecto para la transferencia de humedad, lo que lleva a un gradiente de presión de vapor de agua entre la superficie y la parte interna del material, como en los métodos de secado convencionales (Maskan, 2001).

Maskan (2000) estudió el secado final con microondas de rebanadas de plátano y observó buenos resultados en términos de la calidad de la fruta. Souza y colaboradores (2006) estudiaron el efecto de los parámetros del aire sobre el secado con microondas de plátanos enfocándose en la calidad sensorial y encontraron que la calidad sensorial es alta la cual puede ser alcanzada usando temperatura del aire mayor de 40°C (Souza y colaboradores, 2004). Sin embargo, la interacción entre los parámetros del aire y la potencia de las microondas en el secado final con microondas todavía requiere de estudios adicionales (Pereira y colaboradores, 2007).

El secado con microondas es un método eficiente para el procesamiento poscosecha de productos agrícolas. Su menor tiempo, bajo consumo de energía y alta calidad del producto son tres principales factores los cuales pueden ser aprovechados por la industria del secado. Con el desarrollo de nuevas tecnologías, más parámetros pueden ser monitoreados y controlados hoy en día durante el proceso de secado, como la temperatura, el peso, energía, olor, etc. (Bouraoui y colaboradores, 1994; Kowalski y Mielniczuk, 2007; Li y colaboradores, 2010a, 2010b; Li y colaboradores, 2011; Li y colaboradores, 2010c, 2010d; Raghavan y colaboradores, 2010; Seyfarth y colaboradores, 2003).

Este secado es rápido, más uniforme y eficiente en términos de energía comparado con el secado convectivo con aire caliente. En este caso, se acelera la eliminación de humedad, cuando este proceso no se aplica apropiadamente se puede obtener un producto de baja calidad, debido al sobre calentamiento o carbonización (Yongsawatdigul y Gunasekaran, 1996; Adu y Otten, 1996; Drouzas y Schubert, 1996). Tales daños físicos es el resultado de las temperaturas locales aumentando continuamente a pesar de que el factor de pérdida del material que se seca disminuye con la reducción en el contenido de humedad. También se ha sugerido que la energía de microondas debe ser aplicada en el período de velocidad decreciente o con un bajo contenido de humedad para el secado final (Prabhanjan y colaboradores, 1995; Kostaropoulos y Saravacos, 1995; Funebo y Ohlsson, 1998).

I.7 Diseño factorial experimental (Gutiérrez y De la Vara, 2008)

Es el diseño que sirve para estudiar el efecto individual y de interacción de varios factores sobre una o varias respuestas. El objetivo de un diseño factorial es estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas, cuando se tiene el mismo interés sobre todos los factores. Por ejemplo, uno de los objetivos particulares más importantes

que en ocasiones tiene un diseño factorial es determinar una combinación de niveles de los factores en la que el desempeño del proceso sea mejor.

Los factores pueden ser de tipo cualitativo (máquinas, tipos de material, operador, la presencia o ausencia de una operación previa, etc.), o de tipo cuantitativo (temperatura, humedad, velocidad, presión, etc.).

Para estudiar la manera en que influye cada factor sobre la variable de respuesta es necesario elegir al menos dos niveles de prueba para cada uno de ellos. La matriz de diseño o arreglo factorial es el conjunto de puntos experimentales o tratamientos que pueden formarse considerando todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores.

I.8 Metodología de superficie de respuesta (MSR) (Montgomery,2004)

La metodología de superficie de respuesta, o MSR, es una colección de técnicas matemáticas y estadísticas útiles en el modelado y el análisis de problemas en los que una respuesta de interés recibe la influencia de diferentes variables y donde el objetivo es optimizar esta respuesta. Por lo general la superficie de respuesta se representa gráficamente como en la Figura I.8 donde η (Rendimiento esperado) se grafica contra los niveles x_1 (Temperatura) y x_2 (Presión).

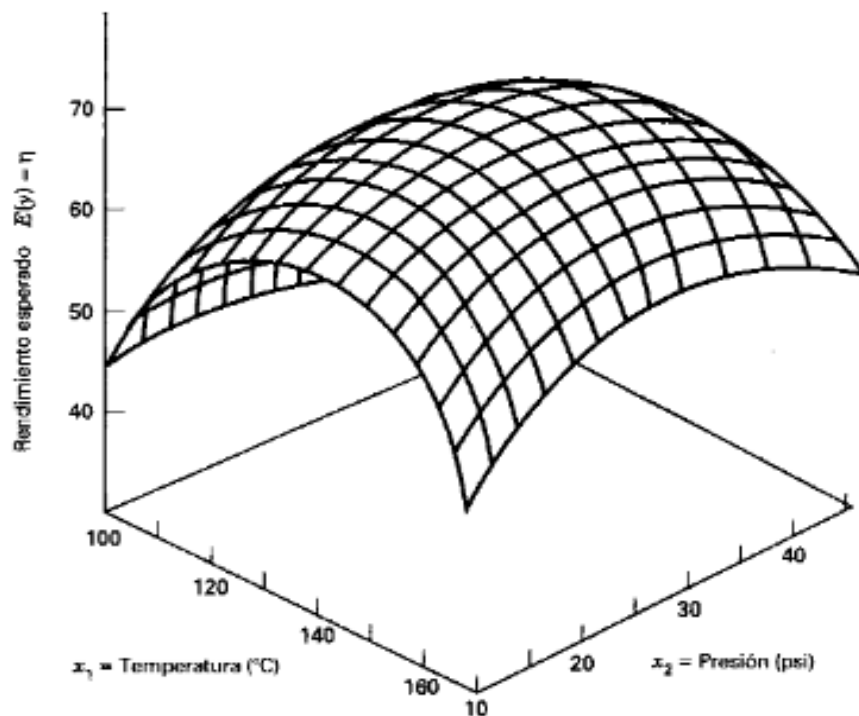


Figura I.8 Superficie de respuesta del rendimiento esperado en función de la temperatura y la presión.

Para ayudar a visualizar la forma de una superficie de respuesta, con frecuencia se grafican los contornos de la superficie de la respuesta, como se muestra en la Figura I.9. En la gráfica de contorno se trazan las líneas de respuesta constantes en el plano x_1, x_2 . Cada contorno corresponde a una altura particular de la superficie de respuesta.

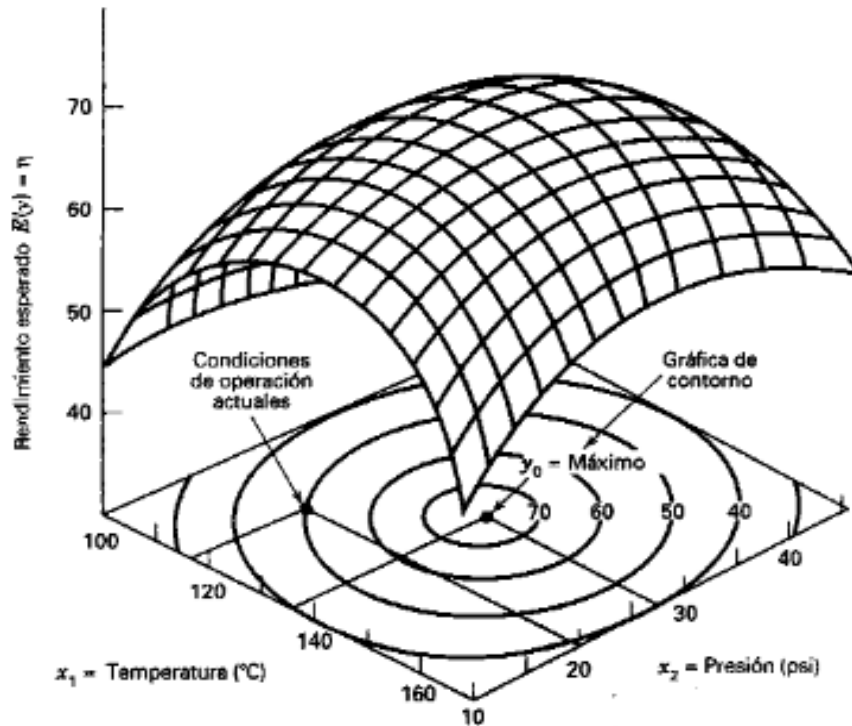


Figura I.9 Gráfica de contorno de una superficie de respuesta.

Las gráficas de contorno desempeñan un papel muy importante en el estudio de las superficies de respuesta. Mediante la generación de gráficas de contorno utilizando software de computadora para el análisis de superficie de respuesta, el experimentador puede por lo general caracterizar la forma de la superficie y localizar el óptimo con una precisión razonable.

Capítulo II: Materiales y Métodos

Capítulo II MATERIALES Y MÉTODOS

II.1 Materia prima

La Papaya variedad Maradol fue comprada en un mercado de la Ciudad de México la cual se seleccionó que tuviera la cascara lisa y de buen aspecto, con madurez punto medio sin magulladuras. Se lava para eliminar cualquier tipo de suciedad, se descascara, se corta en rebanadas de un determinado espesor. Se preparo una solución osmótica de cloruro de sodio-chile-jugo de limón (terciaria) al 2.5% p/p a 40°C.

II.2 Métodos

II.2.1 Determinación de humedad inicial y final

Esta determinación se realizó en la papaya después de la deshidratación osmótica y cuando finalizo el proceso de secado en una termobalanza hasta obtener peso constante, empleándose la técnica de termogravimetría.

II.2.2 Determinación de sólidos totales

Se utiliza el método gravimétrico, el cual consiste en eliminar el contenido de la humedad de la materia prima por un tratamiento térmico y se calcula por medio de la siguiente diferencia:

$$\text{Sólidos totales} = \text{masa de la muestra} - \text{masa de la humedad}$$

II.3 Equipo

El horno de microondas utilizado en esta experimentación es de marca LG, modelo: MS – 0745V, sin modificaciones, en la Tabla II.1 se muestran sus características técnicas.

Tabla II.1 Características del horno de microondas utilizado.

Poder requerido	120 V – 60 Hz
Consumo de energía	950 W
Potencia del microondas	700 W
Frecuencia	2450 MHz
Clasificación de energía	9 A
Dim. externas (AN x AL x PX) en pulgadas	17 ⁷ / ₈ x 10 ³ / ₈ x 13
Dim. Internas (AN x AL x P) en pulgadas	12 ³ / ₈ x 8 x 11 ⁵ / ₈
Capacidad efectiva del horno	0.7 Cu. Ft.
[2]	

II.4 Diseño Experimental

Para llevar a cabo la experimentación de este estudio se utilizó un diseño factorial donde se analizaron los siguientes factores: nivel de potencia de microondas, intervalos de tiempo de secado, espesor de la muestra y tiempo de deshidratación osmótica (tiempo D. O.). Se realizaron 16 experimentos y 4 puntos centrales obteniendo un total de 20 experimentos que se muestran en la Tabla II.2.

Tabla II.2 Diseño Experimental

No. de Experimento	Nivel de Potencia	Tiempo de secado	Espesor	Tiempo D.O.
1	-	-	-	-
2	+	-	-	-
3	-	+	-	-
4	+	+	-	-
5	-	-	+	-
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	-
9	-	-	-	+
10	+	-	-	+
11	-	+	-	+
12	+	+	-	+
13	-	-	+	+
14	+	-	+	+
15	-	+	+	+
16	+	+	+	+
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0

Debe observarse aquí que el cambio de condiciones en el primer factor analizado se varía en cada experimento; en el segundo factor las combinaciones varían cada dos experimentos y así sucesivamente hasta el cuarto factor. De esta manera obtenemos 16 experimentos donde se realizan las combinaciones posibles de los factores sin repetirse en ningún caso.

Para poder comprender el diseño mostrado anteriormente se deben conocer los valores que fueron utilizados en cada una de las variables. Estos se muestran en la Tabla II.3.

Tabla II.3 Factores Fijados

Niveles	Nivel de potencia (por ciento)	Tiempo de secado (s)	Espesor (cm)	Tiempo D.O. (min)
-1	20	30	0.6	20
0	30	40	0.8	25
1	40	50	1	30

Capítulo III: Experimentación

Capítulo III EXPERIMENTACIÓN

III.1 Procedimiento Experimental

Para el desarrollo experimental se recomienda seleccionar una papaya de buen aspecto sin magulladuras, lavarla y retirar la cáscara. Posteriormente se corta en rebanadas con un espesor determinado conforme a la Tabla II.3, se sumergen las rebanadas en la solución terciaria al 2.5% peso a una temperatura de 40°C durante un tiempo determinado, se colocan en papel absorbente para retirar el exceso de solución osmótica.

Se deben lavar, secar y pesar las cajas de Petri vacías registrando el peso de cada una. Las rebanas se colocan en las cajas Petri para registrar su peso, se prosigue a introducir las cajas de Petri en el horno de microondas, se selecciona el nivel de potencia e intervalo de tiempo de secado previamente determinados para iniciar el proceso. Al término de cada intervalo de tiempo se retiran las cajas de Petri para registrar los pesos, se repite hasta obtener peso constante cuidando que no se queme el producto.

A continuación, se muestra en la Figura III.1 Diagrama de bloques del proceso experimental.

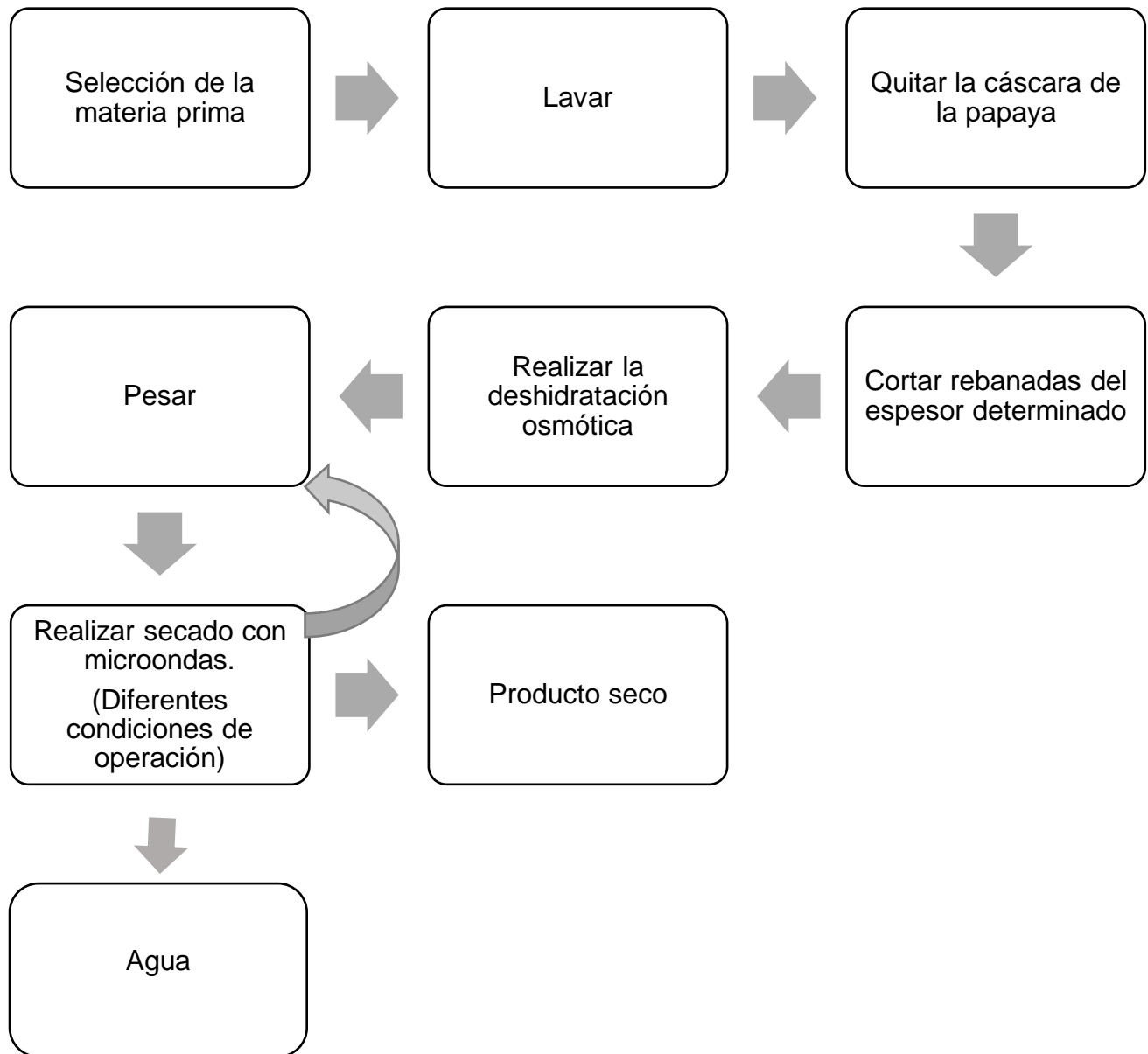


Figura III.1 Diagrama de bloques del proceso experimental.

Capítulo IV: Análisis de resultados

Capítulo IV ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los mejores resultados de la experimentación se muestran en la Tabla IV.1, en la primera columna se tiene el número de experimento, en la segunda la ecuación generada de la humedad en función del tiempo, utilizando el software Origin versión 8.0, en la tercera se tiene el coeficiente de correlación obtenido del ajuste de la curva de cinética de secado, utilizando el programa antes mencionado y en la última columna el porcentaje de humedad del producto seco.

Tabla IV.1. Mejores resultados

No. de exp.	Ecuación de la regresión	R ²	Humedad final
7	$y = 5.98x10^{-18}t^5 - 8.1x10^{-14}t^4 + 4.18x10^{-10}t^3 - 9.5x10^{-7}t^2 - 7.18x10^{-4}t + 7.13$	0.99995	2.35 %
15	$y = 1.55x10^{-18}t^5 - 2.76x10^{-14}t^4 + 1.92x10^{-10}t^3 - 5.37x10^{-7}t^2 - 0.00104x10^{-4}t + 7.77$	0.99991	2.03 %
16	$y = 3.79x10^{-16}t^5 - 2.38x10^{-12}t^4 + 5.76x10^{-9}t^3 - 6.43x10^{-6}t^2 - 8.21x10^{-4}t + 8.1$	0.99994	3.89 %
17	$y = 9.04x10^{-16}t^5 - 4.54x10^{-12}t^4 + 9.03x10^{-9}t^3 - 8.5x10^{-6}t^2 - .0012 t + 7.88$	0.99997	4.72 %

En las Figuras IV.1, 2, 3 y 4 se muestran las curvas de cinética de secado. En las Figuras IV.5, 6, 7 y 8 se muestran las curvas de cinética de secado ajustadas. En las Figuras IV.9, 10, 11 y 12 se muestran las curvas de velocidad de secado. En la Figura IV.13 se muestran las fotografías de la rebanada de papaya antes (a) y después (b) de la D.O. En las Figuras IV.14, 15, 16 y 17 se muestran las fotografías del producto seco. En las Figuras IV.18, 19, 20 y 21 se muestran las gráficas de superficie de respuesta.

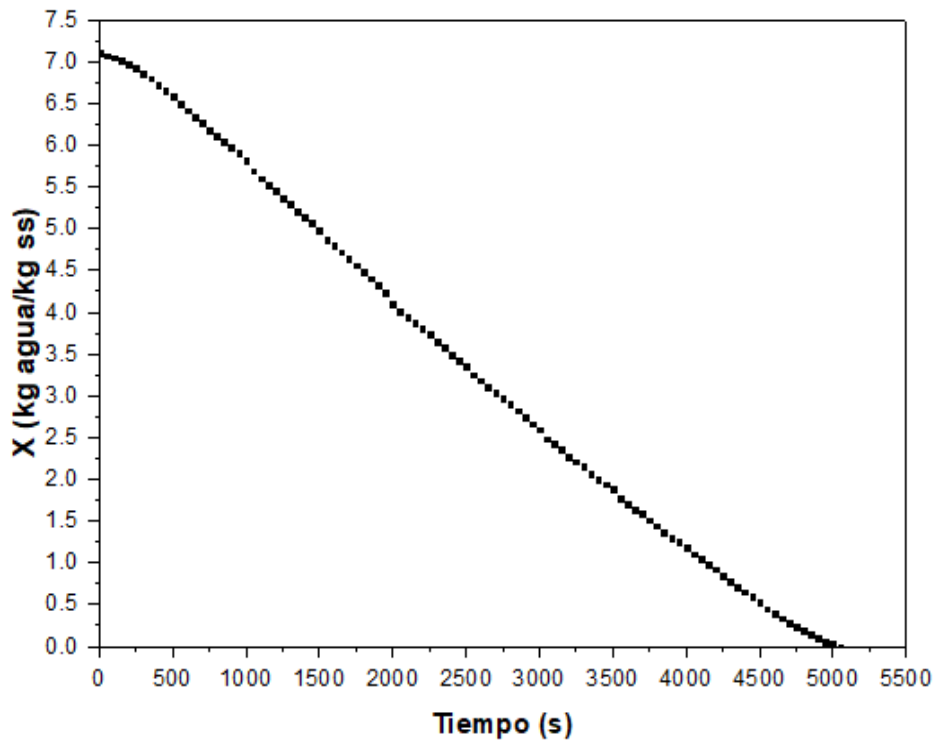


Figura IV.1. Curva de cinética de secado del experimento 7

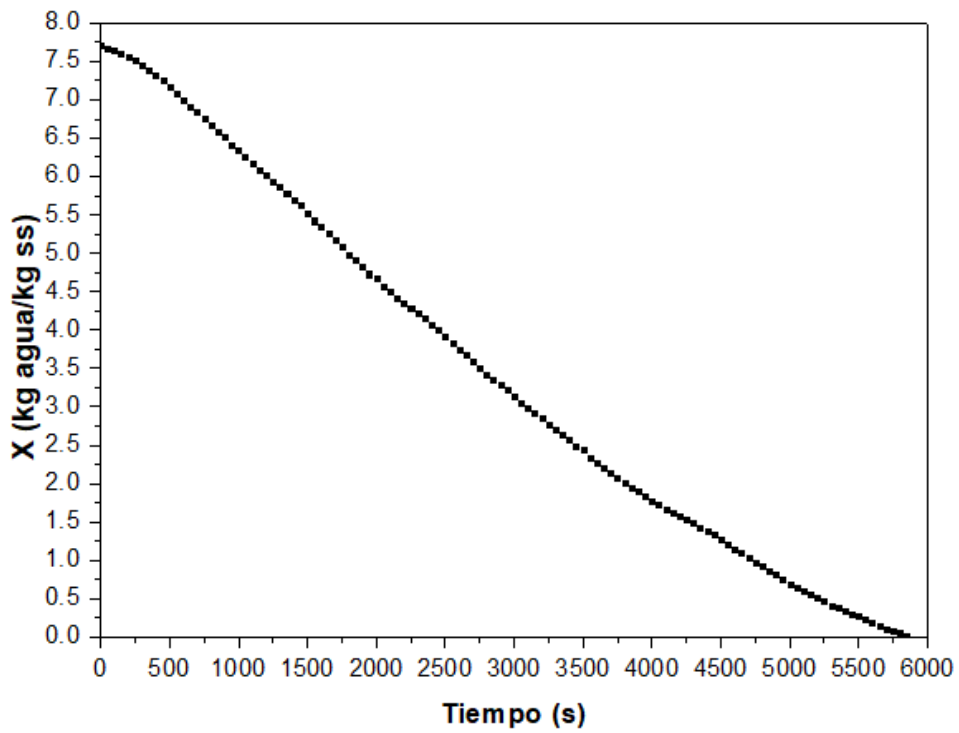


Figura IV.2. Curva de cinética de secado del experimento 15

En las Figuras IV.1 y 2 se empleó el mismo nivel de potencia y espesor de la muestra, debido a eso se obtuvieron los mayores tiempos durante la cinética de secado. También se observan los períodos característicos de velocidad de secado (inestable, constante y decreciente).

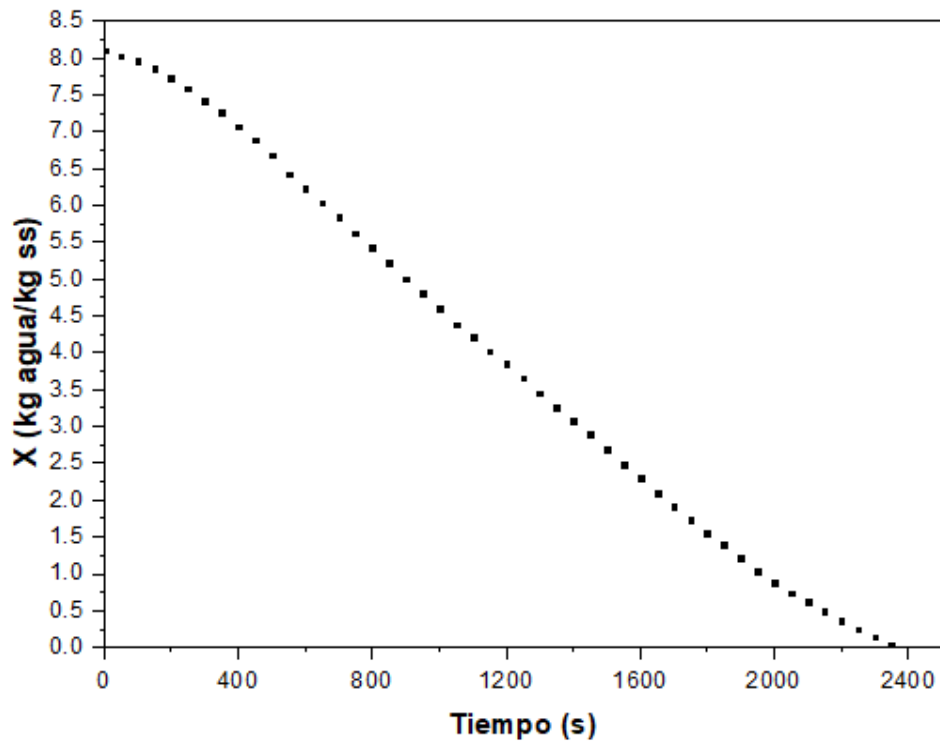


Figura IV.3. Curva de cinética de secado del experimento 16.

En la Figura IV.3 comparada con las Figuras IV.1 y 2, se obtuvo un menor tiempo en la cinética de secado debido a que se modificó el nivel de potencia, generándose una temperatura mayor en el interior de la cavidad de horno.

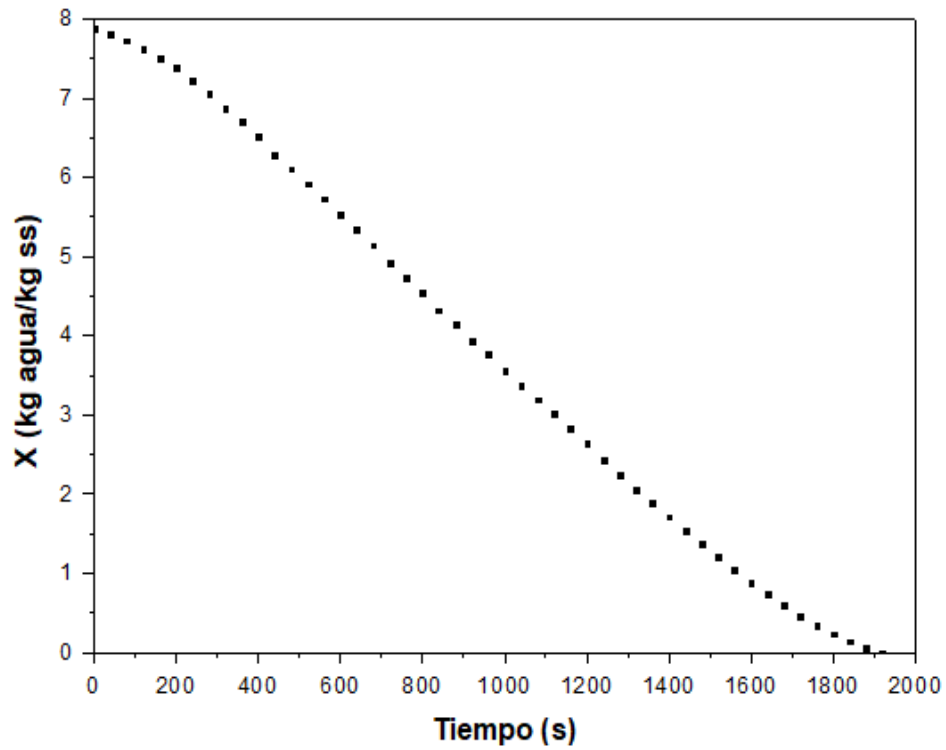


Figura IV.4. Curva de cinética de secado del experimento 17.

En la Figura IV.4 se obtuvo un menor tiempo del proceso de secado debido al espesor de la muestra empleada de acuerdo con la Tabla II.2.

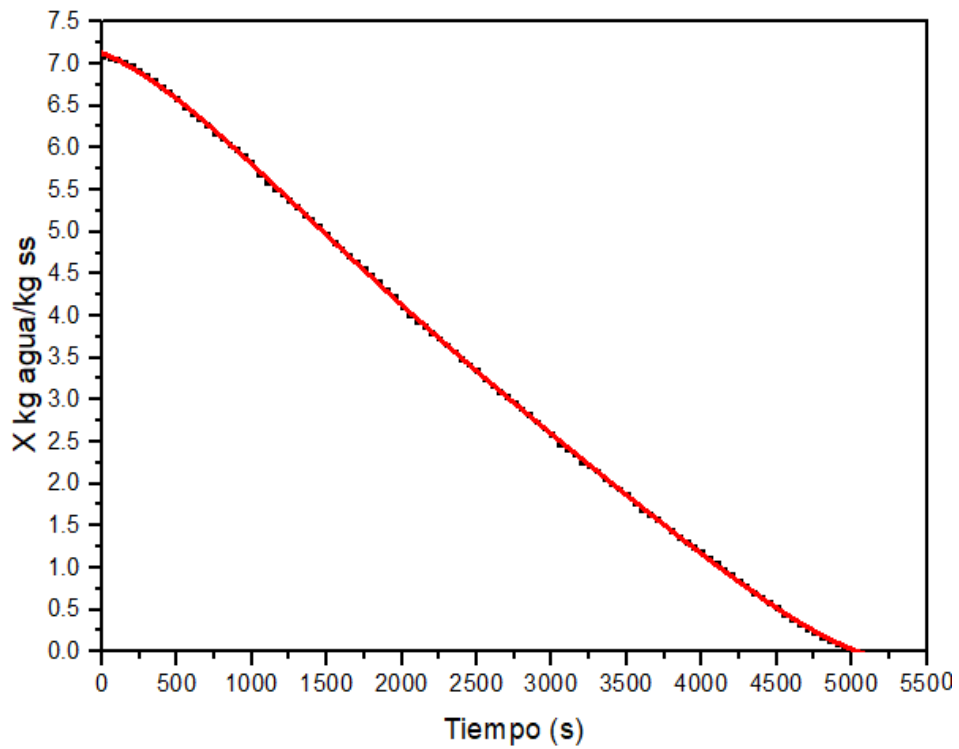


Figura IV.5. Curva de cinética de secado ajustada del experimento 7.

En la Figura IV.5 se consiguió un buen ajuste ya que el coeficiente de correlación (R^2) fue de 0.99995, es por esto que la curva de cinética de secado y la del ajuste quedan sobrepuestas.

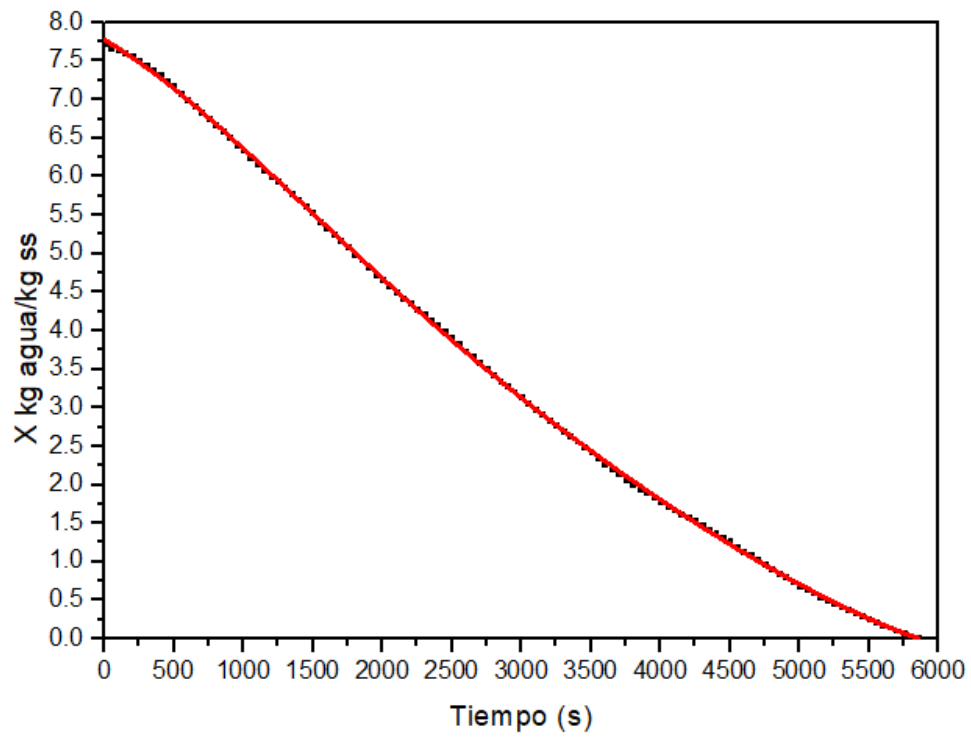


Figura IV.6. Curva de cinética de secado ajustada del experimento 15.

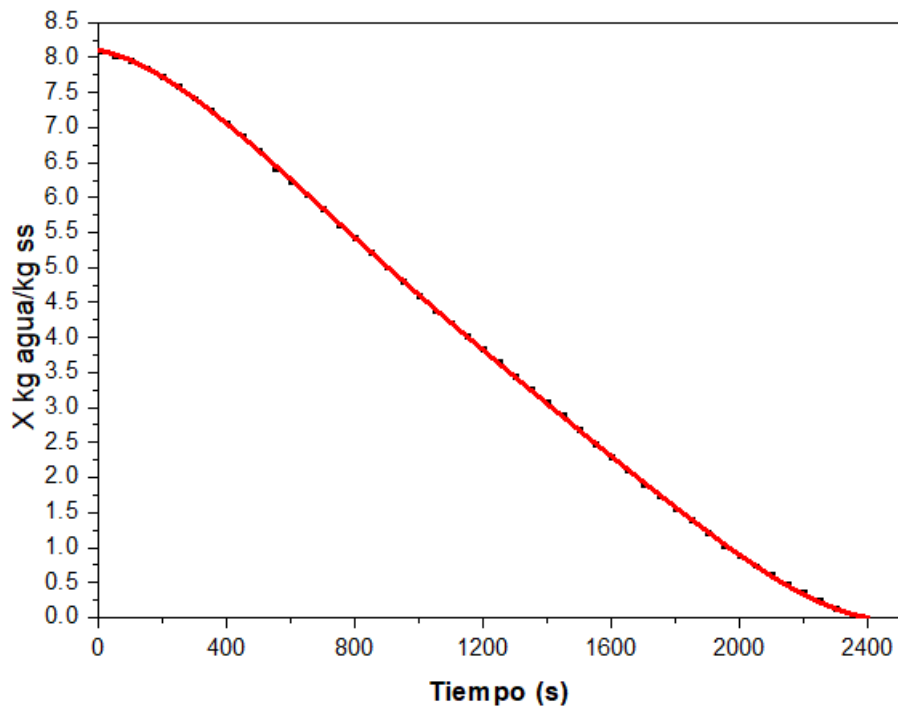


Figura IV.7. Curva de cinética de secado ajustada del experimento 16

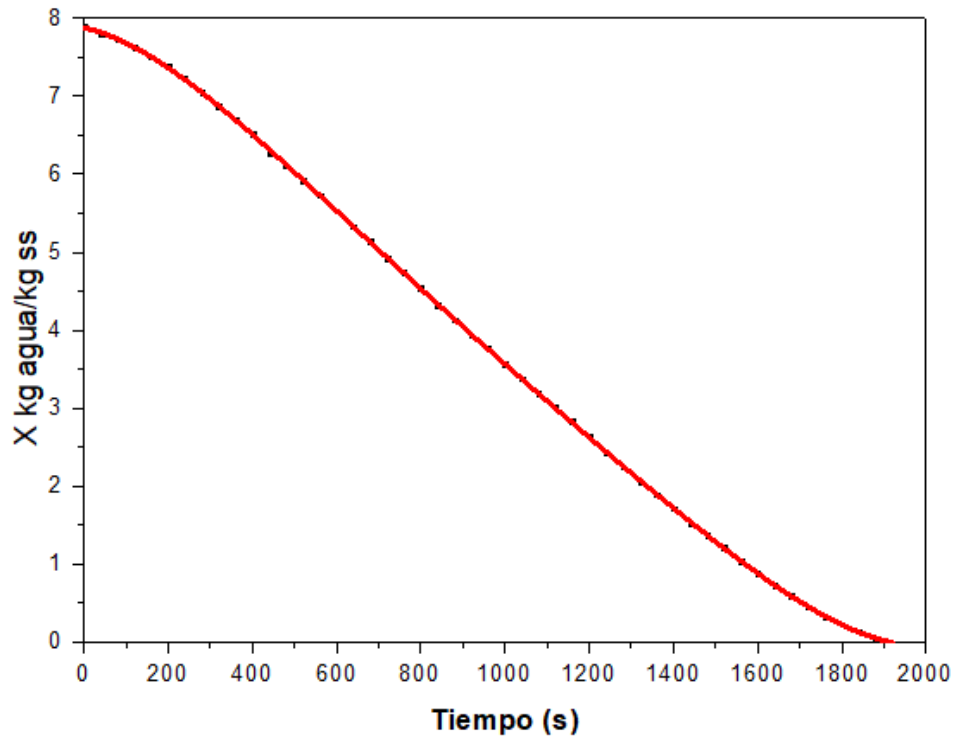


Figura IV.8. Curva de cinética de secado ajustada del experimento 17.

En las Figuras IV.6, 7 y 8 los valores de R^2 fueron 0.99991, 0.99994, 0.99997 respectivamente, logrando un buen ajuste en cada una de las curvas de cinética de secado.

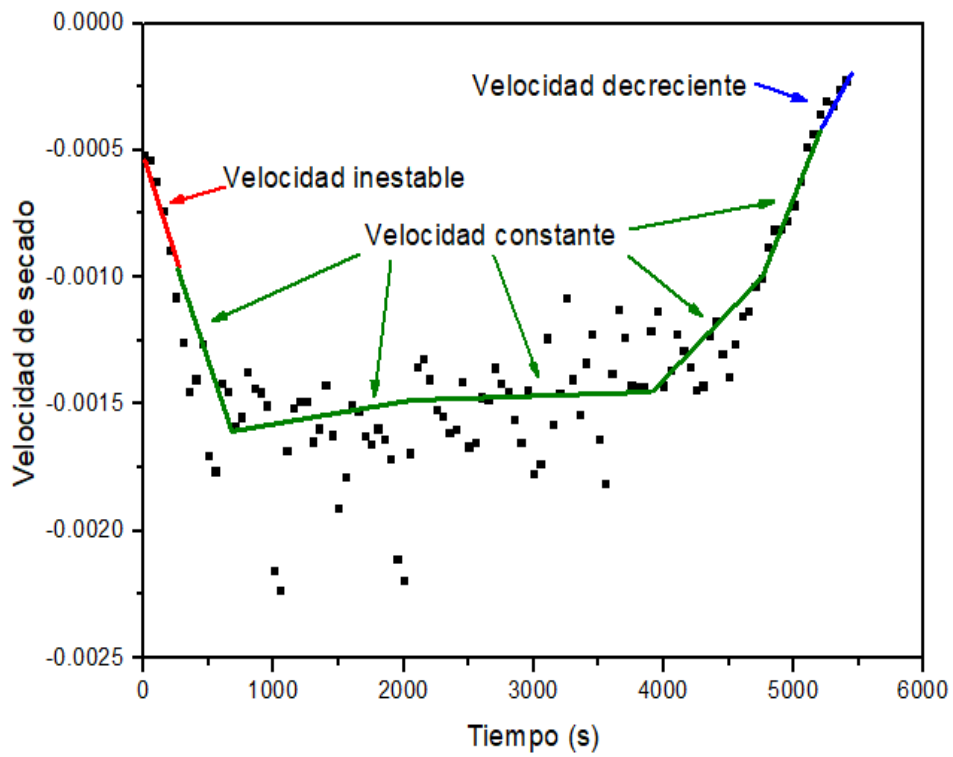


Figura IV. 9 Gráfica de la velocidad de secado del experimento 7.

En la Figura IV.9 se observa de forma más clara los tres periodos característicos del proceso de secado, obteniéndose más de un periodo de velocidad constante debido a que es una característica propia de los alimentos.

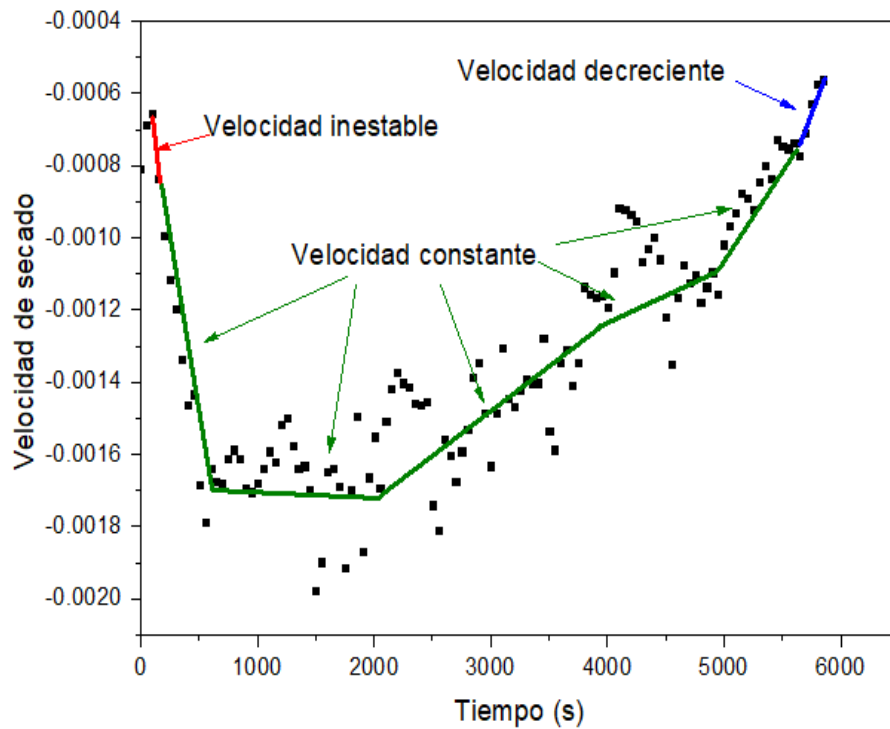


Figura IV. 10 Gráfica de la velocidad de secado del experimento 15.

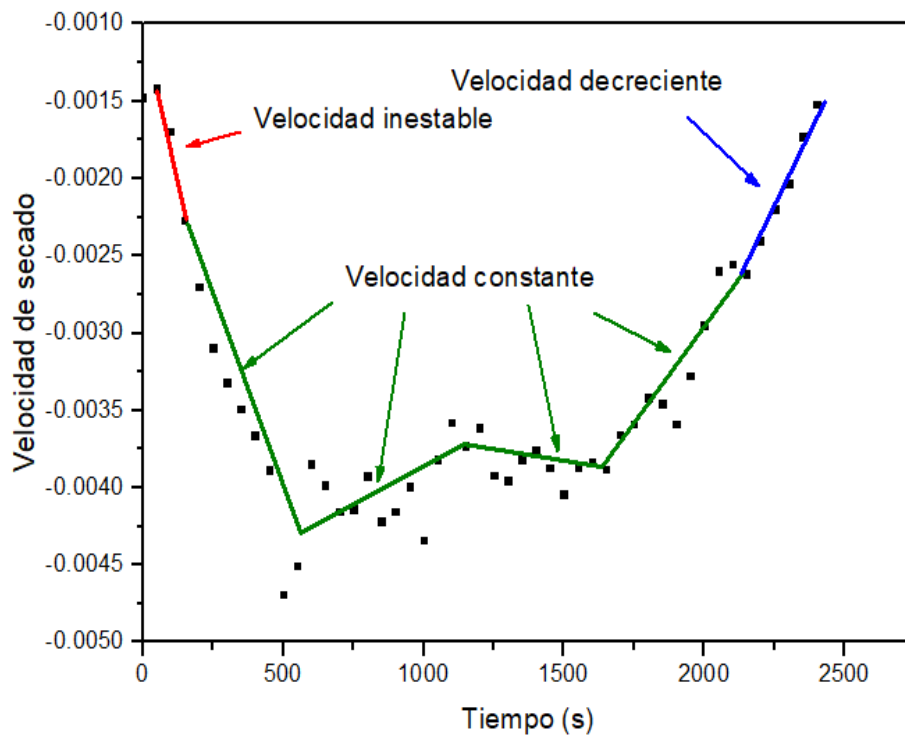


Figura IV. 11. Gráfica de la velocidad de secado del experimento 16.

En las Figuras IV.10 y 11 se obtuvieron 4 períodos de velocidad constante debido a que las características de las muestras son similares.

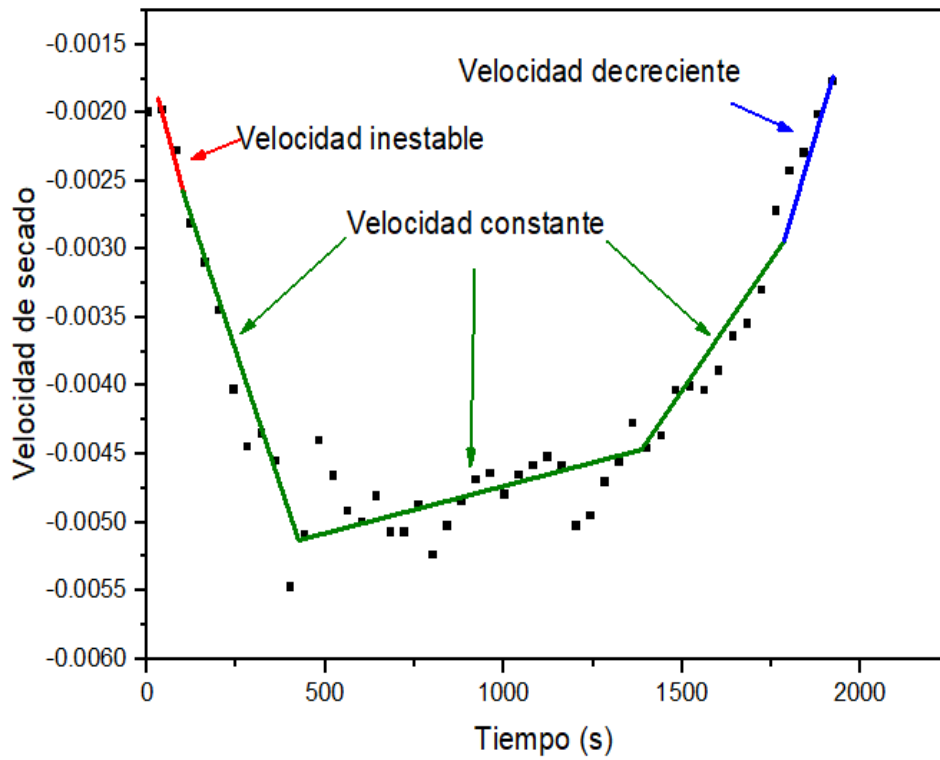


Figura IV.12. Gráfica de la velocidad de secado del experimento 17.

En la Figura IV.12 se tiene menos períodos de velocidad constante comparada con las obtenidas en las Figuras IV. 9, 10 y 11, ya que el espesor de la muestra es menor.



(a)



(b)

Figura IV. 13 Fotografías de la rebanada de papaya antes (a) y después (b) de la Deshidratación Osmótica.

En la Figura IV.13 se muestran las fotografías de la rebanada de papaya antes (a) y después (b) de la D.O, se observa que la coloración en dichas muestras no sufre cambio al ser una de las ventajas que tiene este proceso.



Figura IV.14. Fotografía de producto seco de experimento 7



Figura IV.15. Fotografía de producto seco de experimento 15



Figura IV.16. Fotografía de producto seco de experimento 16.



Figura IV.17. Fotografía de producto seco de experimento 17.

En las Figuras IV. 14, 15, 16 y 17 se muestran las fotografías de los experimentos 7, 15, 16 y 17 se tiene el producto seco de cada experimento en las cuales se observa que no hubo cambio de coloración significativo debido al pretratamiento empleado. Sin embargo, se puede apreciar que entre las muestras de cada experimento hay una diferencia en la intensidad del color, esto se debe a la naturaleza de la papaya, la cual no tiene un color homogéneo. Además, el producto está inflado porque queda aire atrapado durante el proceso ya que parte de los carbohidratos se gelifican impidiendo su eliminación.

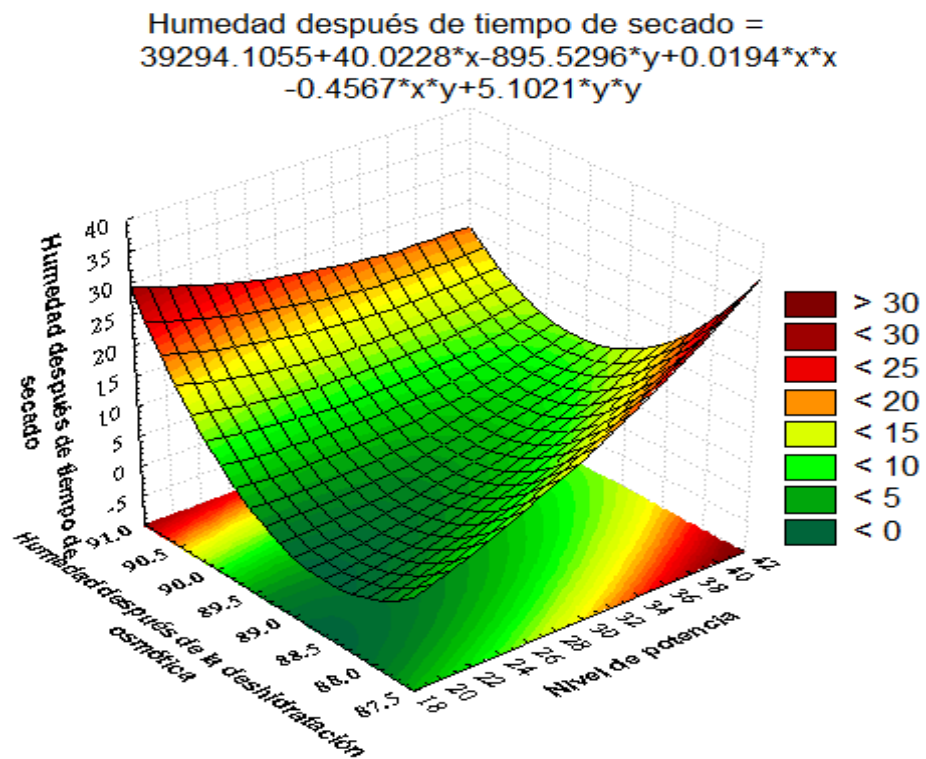


Figura IV.18. Gráfica de superficie de respuesta de la humedad después del tiempo de secado en función del nivel de potencia y de la humedad después de la deshidratación osmótica.

De acuerdo con la Figura IV.18, para obtener una humedad en el producto final menor al 5 % se requiere trabajar a un nivel de potencia entre 18 y 26 % y una humedad después de la deshidratación osmótica entre 88 y 89.5%.

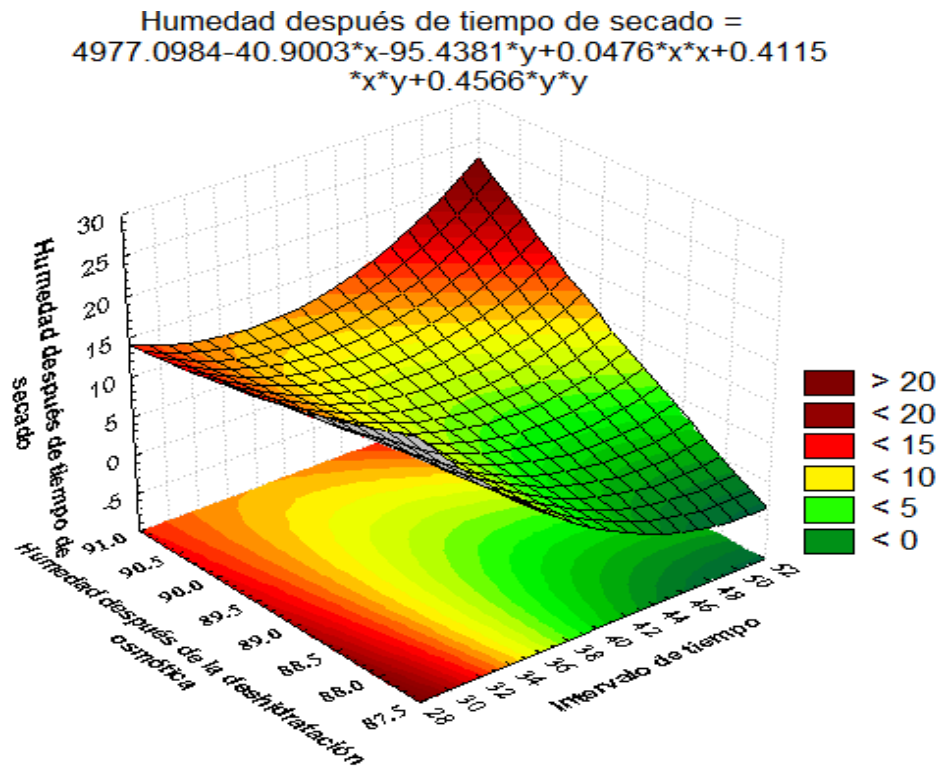


Figura IV.19. Gráfica de superficie de respuesta de la humedad después del tiempo de secado en función del intervalo de tiempo de secado y de la humedad después de la deshidratación osmótica.

De acuerdo con la Figura IV.18 para obtener una humedad en el producto final menor al 5 % se requiere trabajar a un intervalo de tiempo entre 37 y 40 segundos y una humedad después de la deshidratación osmótica entre 87.5 y 89%.

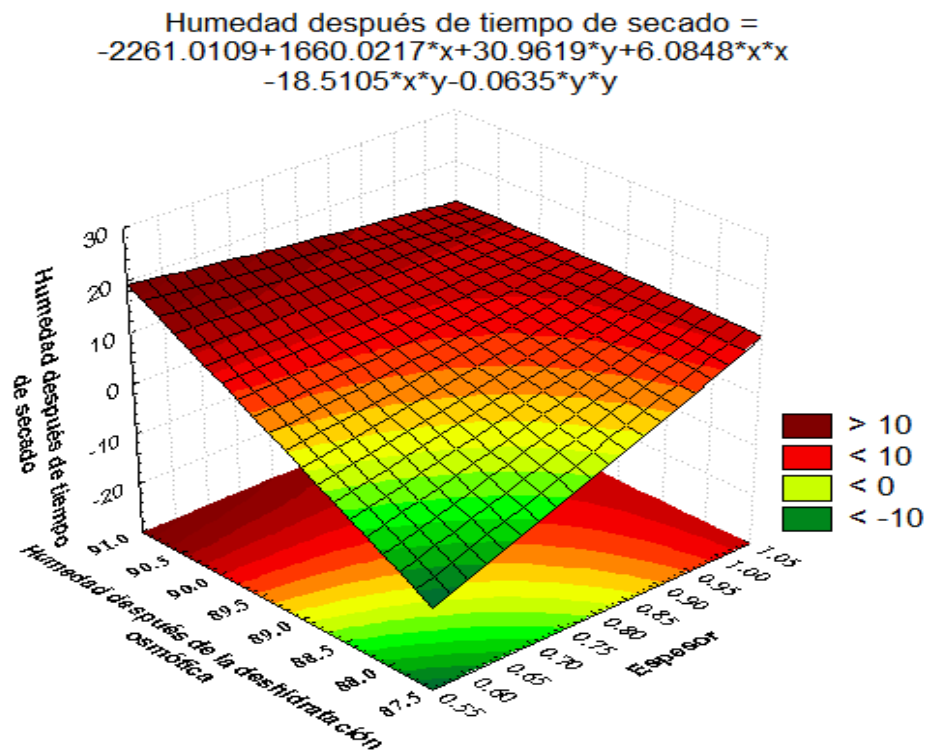


Figura IV.20. Gráfica de superficie de respuesta de la humedad después del tiempo de secado en función del espesor y de la humedad después de la deshidratación osmótica.

De acuerdo con la Figura IV.20, para obtener una humedad en el producto final menor al 10 % se requiere trabajar con un espesor de 1 cm y una humedad después de la deshidratación osmótica del 90%.

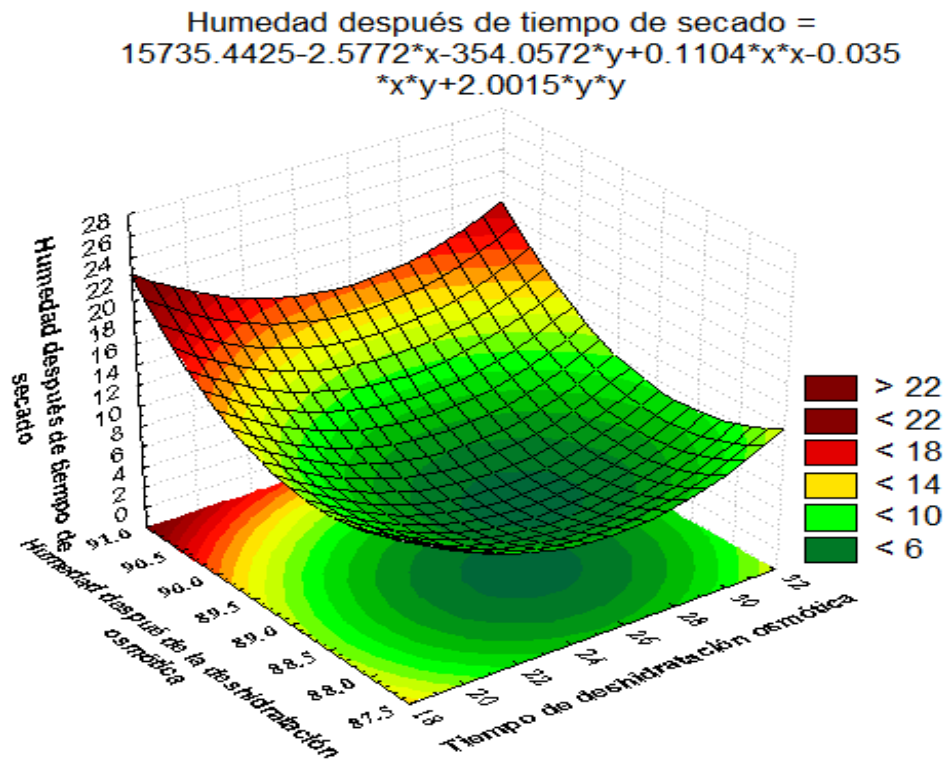


Figura IV.21. Gráfica de superficie de respuesta de la humedad después del tiempo de secado en función del tiempo de deshidratación osmótica y de la humedad después de la deshidratación osmótica.

De acuerdo con la Figura IV.21, para obtener una humedad en el producto final menor al 6 % se requiere trabajar a un tiempo de deshidratación osmótica entre 24 y 27 minutos y una humedad después de la deshidratación osmótica entre 88.5 y 89.5%.

OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

- ✓ Con la deshidratación osmótica el color del producto se conserva.
- ✓ En todos los experimentos la curva de cinética de secado se presentan los periodos de velocidad inestable, constante y decreciente.
- ✓ En la curva de velocidad de secado se tiene tres o más periodos de velocidad constante, lo cual es característico de alimentos.
- ✓ En la mayoría de los productos secos se obtuvo una humedad menor al 10%.
- ✓ Se obtuvieron buenos ajustes en las curvas de cinética de secado ya que el coeficiente de correlación (R^2) tuvo valores mayores de 0.9999
- ✓ Las mejores condiciones de operación fueron las del experimento 15, ya que se obtuvo una humedad del 2.03% y la mejor apariencia del producto seco.
- ✓ Los tiempos de deshidratación osmótica óptimos para obtener una humedad después del secado menor al 6% son de 24-27 minutos y con una humedad después de la deshidratación osmótica del 88.5-89.5%.
- ✓ Para obtener una humedad en el producto final menor al 10 % se requiere trabajar con un espesor de 1 cm y una humedad después de la deshidratación osmótica del 90%.
- ✓ Para obtener una humedad en el producto final menor al 5 % se requiere trabajar a un intervalo de tiempo entre 37 y 40 segundos y una humedad después de la deshidratación osmótica entre 87.5 y 89%.
- ✓ Para obtener una humedad en el producto final menor al 5 % se requiere trabajar a un nivel de potencia entre 18 y 26 % y una humedad después de la deshidratación osmótica entre 88 y 89.5%.

REFERENCIAS

- Acevedo L.; Usón, S.; Uche, J. 2015. Local exergy cost analysis of microwave heating systems. *Energy*, 80, pp. 437-451.
- Adu, B.; Otten, L. 1996. Effect of increasing hygroscopicity on the microwave heating of solid foods. *Journal of Food Engineering*, 27(1), pp.35-44.
- Aguilera, J.; Stanley, D. 1999. *Microstructural principles of food processing and engineering*. Aspen Publisher, Inc., (2nd Edition), London and New York, pp. 432.
- Ahrne, L. 2005. CombiDry first annual report. European INCO-DEV project reference ICA4-CT-2002-10034.
- Akpinar, E.; Bicer, Y. 2005. Modelling of the drying of eggplants in thin-layers. *International Journal of Food Science and Technology*, 40(3), pp.273-281.
- Alves-Filho O.; Strommen I.; Thorbergsen E. 1997. A simulation model for heat pump dryer plants for fruits and roots. *Drying Technology*, 15(5), pp.1369-1398.
- Alzamora, S.; Gerschenson, L.; Vidales, S.; Nieto, A. 1997. *Structural changes in the minimal processing of fruits: Some effects of blanching and sugar impregnation*. In: Fito P, Ortega-Rodriguez E, Barbosa-Canovas G. Food engineering 2000. Chapman and Hall. New York, pp. 117–139.
- Alzamora, S.; Tapia, M.; Argaíz, A.; Welti J. 1993. Application of combined methods technology in minimally processed fruits. *Food Research International*, 26(2), pp.125-130.
- Aversa M.; Curcio S.; Calabro V.; Lorio G. 2011. Measurement of the water-diffusion coefficient, apparent density changes and shrinkage during the drying of eggplant (*Solanum melongena*). *International Journal of Food Properties*, 14(3), pp. 523-537.
- Ayappa, K. 1997. Modeling transport processes during microwave heating: a review, *Reviews in Chemical Engineering*, 13(2), pp. 1-69.
- Balanis, C. 1989. *Advanced engineering electromagnetics*, John Wiley & Sons (1st Edition), New York, USA, pp. 1008.
- Bas, D.; Boyacı, I. 2007. Modelling and optimization I: Usability of response surface methodology. *Journal of Food Engineering* 78(3), pp. 836-845.
- Beristain, C.; Azuara, E.; Cortés, R.; Garcia, H. 1990. Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple rings. *International Journal of Food Science and Technology*, 25(5), pp. 576–582.

Bidwell, R. 1979. *Plant physiology*. Macmillan Publishing Co. Inc. (2nd edition). New York, pp. 672.

Bohuon, P.; Collignan, A.; Raoult-Wack, A.; Flick, D. 1994. Étude et modelisation des transferts de matiere en deshydratation-impregnation par immersion: cas des liquides ternaires a basse temperature. Cahier de l'AFSIA, no. 10: *La Deshydratation-impregnation par Immersion*. (pp. 31–36). Montpellier: Centre de Coopeeration Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement.

Bouraoui, M.; Richard, P.; Durance, T. 1994. Microwave and convective drying of potato slices. *Journal of Food Process Engineering*, 17(3), pp. 353-363.

Cano, R.; Perez-Elvira, S.; Fdz-Polanco, F. 2015. Energy feasibility study of sludge pretreatments: a review. *Applied Energy*, 149, pp. 176-185.

Chan, T.; Reader, H. 2000. *Understanding microwave heating cavities.:* Artech House Publishers (1st Edition), Boston and London, pp. 304.

Chandrasekaran, S.; Ramanathan, S.; Basak, T. 2013. Microwave food processing-a review. *Food Research International*, 52(1), pp.243-261.

Chen, D.; Zheng Y.; Zhu, X. 2013. In-depth investigation on the pyrolysis kinetics of raw biomass. Part I: Kinetic analysis for the drying and devolatilization stages. *Bioresource Technology*, 131, pp. 40-46.

Chuck, C. J, Lou-Hing, D.; Dean, R.; Sargeant, L.; Scott, R. J.; Jenkins, R. W. 2014. Simultaneous microwave extraction and synthesis of fatty acid methyl ester from the oleaginous yeast *Rhodotorula glutinis*. *Energy*, 69, pp. 446-454.

Conway, J.; Castaigne, F.; Picard, G.; Vovan, X. 1983. Mass transfer considerations in the osmotic dehydration of apples. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, 16(1), pp. 25–29.

Corzo, O.; Bracho, N.; Vásquez, A.; Pereira, A. 2008. Optimization of a thin layer drying process for coroba slices. *Journal of Food Engineering*, 85(3), pp. 372-380.

Datta, A. 2007a. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations. *Journal of Food Engineering*, 80(1), pp. 80–95.

Datta, A. 2007b. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. II: Property data and representative results. *Journal of Food Engineering*, 80(1), pp. 96–110.

Decareau, R. 1985. *Microwaves in the Food Processing Industry*, Academic Press (1st Edition), Orlando, Fla., pp. 234.

Decareau, R. 1992. *Encyclopedia of Food Science and Technology*, John Wiley & Sons, (3rd Edition), New York, NY, pp. 1772–1778.

Del Valle J.; Cuadros T.; Aguilera J. 1998. Glass transition and shrinkage during drying and storage of osmosed apple pieces. *Food Research International*, 31(3), pp. 191-204.

Diamante, L.; Munro, P. 1991. Mathematical modelling of hot air drying of sweet potato slices. *International Journal of Food Science and Technology*, 26(1), pp. 99-109.

Drouzas, A.; Schubert, H. 1996. Microwave application in vacuum drying of fruits. *Journal of Food Engineering*, 28(2), pp. 203-209.

Dwivedi, S.; Sharma, S. 2014. Effect of process parameters on tensile strength of 1018 mild steel joints fabricated by microwave welding. *Metallography Microstructure and Analysis*, 3(1), pp. 58-69.

El-Aouar, A.; Moreira, A.; Xidieh, F. 2003. Effect of microwave power, air velocity and temperature on the final drying of osmotically dehydrated bananas. *Journal of Food Engineering*, 59, pp. 85-91.

Erbay, Z.; Icier, F. 2010. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), pp. 441-464

Erle, U.; Schubert, H. 2001. Combined osmotic and microwave-vacuum dehydration of apples and strawberries. *Journal of Food Engineering*, 49(2–3), pp. 193-199.

Escriche, I.; Chiralt A.; Moreno J.; Serra J. 2000. Influence of blanching-osmotic dehydration treatments on volatile fraction of strawberries. *Journal of Food Science*, 65(7), pp.1107–1111.

Feng, H.; Tang, J. 1998. Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed. *Journal of Food Science*, 63(4), pp. 679-683.

Ferreira, S.; Costa, A. 2010. Parámetros de Transferencia de Materia en el Secado de Frutas, sin Necesidad de Datos de Disminución de Volumen. *Información Tecnológica*, 21(5), pp. 87-98

Fito, P.; Chiralt, A.; Barat, J.; Andrés, A.; Martínez, M.; Martínez, N. 2001. Vacuum impregnation for development of new dehydrated products. *Journal of Food Engineering*, 49(4), pp. 297-302.

- Funebo, T.; Ohlsson, T. 1998. Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom. *Journal of Food Engineering*, 38(3), pp. 353-367.
- Genina, P. 2002. Deshidratación osmótica: Alternativa para conservación de frutas tropicales. *Avance y Perspectiva*, 21, pp. 321-324.
- Gulati, T.; Zhu, H.; Datta, A.; Huang, K. 2015. Microwave drying of spheres: coupled electromagnetics-multiphase transport modeling with experimentation. Part II: Model validation and simulation results. *Food and Bioproducts Processing*, 96, pp. 326-337.
- Gunhan, T.; Demir, V.; Hancioglu, E.; Hepbasli, A. 2005. Mathematical modelling of drying of bay leaves. *Energy Conversion and Management*, 46(11-12), pp. 1667-1679.
- Gutiérrez, H.; De la Vara, R. 2008. *Análisis y diseño de experimentos*. Mc Graw Hill (2da. Edición), México, D.F., pp. 545.
- Hasanvand M.; Golparvar A. 2014. A critical review of improved oil recovery by electromagnetic heating. *Petroleum Science and Technology*, 32(6), pp. 631-637.
- Hassini, L.; Peczalski, R.; Gelet, J. 2015. Drying of granular medium by hot air and microwaves. Modeling and prediction of internal gas pressure and binder distribution. *Powder Technology*, 286, pp. 636-644.
- Hawkes, J.; Flink, J. 1978. Osmotic concentration of fruit slices prior to freeze dehydration. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2(4), pp. 265-284.
- Henderson, S.; Pabis, S. 1969. Grain drying theory – temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agriculture Engineering Research*, 6(3), pp. 169-174.
- Hippel A. 1954. *Dielectrics and waves*. Wiley and Sons, (1st Edition), New York, pp. 284.
- Hough, G.; Chirife, J.; Marini, C. 1993. A simple model for osmotic dehydration of apples. *LWT- Food Science and Technology*, 26(2), pp. 151–156.
- Hussain, Z.; Khan, K.; Hussain, K. 2010. Microwave-metal interaction pyrolysis of polystyrene. *Journal Analytical and Applied Pyrolysis*, 89(1), pp. 39-43.
- Janjai, S.; Lamlert, N.; Intawee, P.; Mahayothee, B.; Bala, B. K.; Nagle, M.; Müller, J. 2009a. Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana. *Solar Energy*, 83(9), pp. 1550-1565.
- Janjai, S.; Lamlert, N.; Intawee, P.; Mahayothee, B.; Haewsungcharern, M.; Bala, B. K.; Nagle, M.; Leis, H.; Müller, J.; 2009b. Solar drying of peeled longan using a side loading type solar tunnel dryer: experimental and simulated performance. *Drying Technology*, 27(4), pp.595-605.

- Jayaraman, K.; Das Gupta, D. 1992. Dehydration of fruits and vegetables: recent developments in principles and techniques. *Drying Technology*, 10(1), pp. 1–50.
- Jiang J.; Dang L.; Yuensin C.; Tan H.; Pan B.; Wei H. 2017. Simulation of microwave thin layer drying process by a new theoretical model. *Chemical Engineering Science*, 162, pp. 69–76.
- Jumah, R.; Raghavan, G. 2001. Analysis of heat and mass transfer during combined microwave convective spouted-bed drying. *Drying Technology*, 19(3-4), pp. 485-506.
- Karathanos, V. 1999. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 39(4), pp. 337-344.
- Karathanos, V.; Kostaropoulos, A.; Saravacos, G. 1995. Air-drying of osmotically dehydrated fruits. *Drying Technology*, 13(5-7), pp. 1503-1521.
- Khodabakhshi, A.; Mahfeli, M.; Zarein, M. 2015. Investigation of microwave power effects on drying kinetics and energy efficiency of banana samples. *Global Journal of Science Frontier Research: Agriculture and Veterinary*. 15(4), pp. 40-46.
- Kostaropoulos, A.; Saravacos, G. 1995. Microwave pre-treatment for sun-dried raisins. *Journal of Food Science*, 60(2), pp. 344-347.
- Kowalski, S.; Mielniczuk, B. 2007. Analysis of effectiveness and stress development during convective and microwave drying. *Drying Technology*, 26(1), pp. 64-77.
- Krokida, M.; Maroulis, Z. 2000. Quality changes during drying of food materials. In: Mujumdar AS, editor. Drying technology in agriculture and food sciences. *Enfield, N.H.: Science*, pp. 313.
- Kudra T.; Efremov G. 2003. A quasi-stationary approach to drying kinetics of fluidized particulate materials. *Drying Technology*, 21(6), pp.1077–1090.
- Kumar, P.; Sagar, V.; Singh, U. 2006. Effect of tray load on drying kinetics of mango, guava and aonla. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 65(8), pp. 659-664.
- Lehne, M.; Barton, G.; Langrish, T. 1999. Comparison of experimental and modeling studies for the microwave drying of ironbark timber. *Drying Technology*, 17(10), pp. 2219-2235.
- Lenart, A. 1996. Osmo-convective drying of fruits and vegetables: technology and application. *Drying Technology*, 14(2), pp. 391–413.

- Lerici, C.; Pinnavaia, T.; Dalla Rosa, M.; Bartolucci, L. 1985. Osmotic dehydration of fruit: influence of osmotic agents on drying behaviour and product quality. *Journal of Food Science*, 50(5), pp.1217–1219.
- Li, Z.; Raghavan, G.; Orsat, V. 2010a. Optimal power control strategies in microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 99(3), pp. 263-268.
- Li, Z.; Raghavan, G.; Orsat, V.; 2010b. Temperature and power control in microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 97(4), pp. 478-483.
- Li, Z.; Raghavan, G.; Wang, N. 2010c. Apple volatiles monitoring and control in microwave drying. *LWT-Food Science and Technology*. 43(4), pp. 684-689.
- Li, Z.; Raghavan, G.; Wang, N. 2010d. Carrot volatiles monitoring and control in microwave drying. *LWT-Food Science and Technology*. 43(2), pp. 291-297.
- Li, Z.; Raghavan, G.; Wang, N.; Vigneault, C. 2011. Drying rate control in the middle stage of microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 104(2), pp. 234-238.
- Lin, K.; Lin, Y.; Hsiao, Y. 2014. Microwave plasma studies of Spirulina algae pyrolysis with relevance to hydrogen production. *Energy*, 64, pp. 567-574.
- Liu M.; Woudstra T.; Promes E.; Restrepo S.; Aravind P. 2014. System development and self-sustainability analysis for upgrading human waste to power. *Energy*, 68(C), pp. 377-384.
- Madiouli, J.; Lecomte, D.; Nganya, T.; Chavez, S.; Sghaier, J. 2007. A method for determination of porosity change from shrinkage curves of deformable materials. *Drying Technology*, 25(4), pp. 621–628.
- Mahmoud, M.; Link, G.; Thumm, M. 2015. The role of the native oxide shell on the microwave sintering of copper metal powder compacts. *Journal of Alloy and Compounds*, 627, pp. 231-237.
- Maroulis, Z.; Saravacos, G. 2003. *Food Process Design*, Marcel Dekker, Inc., (1st Edition), New York, NY. pp. 531.
- Maskan, M. 2000. Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, 44(2), pp. 71–78.
- Maskan, M. 2001. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48(2), pp. 177–182.
- Matusek, A.; Merész, P. 2002. Modelling of sugar transfer during osmotic dehydration of carrots. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 46(1-2), pp. 83-92.

- Mauro, M.; Menegalli, F. 1995. Evaluation of diffusion coefficients in osmotic concentration of bananas (*Musa Cavendish Lambert*). *International Journal of Food Science and Technology*, 30(2), pp.99–213.
- Mauro, M.; Menegalli, F. 2003. Evaluation of water and sucrose diffusion coefficients in potato tissue during osmotic concentration. *Journal of Food Engineering*, 57, pp. 367-374.
- Mendoza, R.; Schmalko, M. 2002. Diffusion coefficients of water and sucrose in osmotic dehydration of papaya. *International Journal of Food Properties*, 5(3), pp. 537-546.
- Montgomery, D. 2004. *Diseño y análisis de experimentos*. Limusa Wiley, (2da. Edición), México, D.F., pp. 686.
- Moreno, J.; Chiralt, A.; Escriche, I.; Serra, J. 2000. Effect of blanching/osmotic dehydration combined methods on quality and stability of minimally processed strawberries. *Food Research International*, 33(7), pp. 609-616.
- Moseley, J.; Kappe, C. 2011. A critical assessment of the greenness and energy efficiency of microwave-assisted organic synthesis. *Green Chemistry*, 13(4), pp. 794-806.
- Motevali A.; Minaei S.; Banakar A.; Ghobadian B.; Khoshtaghaza M. 2014. Comparison of energy parameters in various dryers. *Energy Conversion Management*, 87, pp. 711-725.
- Mrani, I. 1997. *Comportement thermo-hygro-mécanique de produits fortement déformables. Application à la maîtrise de la qualité lors du séchage*. Ph.D. Thesis. Université Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc, France.
- Mujumdar, A. 1995. *Handbook of Industrial Drying*, Marcel Dekker, (2a. Edition), New York, pp.1423.
- Mulet A. 1994. Drying modelling and water diffusivity in carrots and potatoes. *Journal of Food Engineering*, 22(1-4), pp.329-348.
- Mulet A.; Berna A.; Rosselló, C. 1989. Drying of carrots. I. Drying models. *Drying Technology*, 7(3), pp. 537–557.
- Mushtaq F.; Mat R.; Ani F. 2014. A review on microwave assisted pyrolysis of coal and biomass for fuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39(C), pp. 555-574.
- Nagle, M.; Azcárraga, J.; Mahayothee, B.; Haewsungcharern, M.; Janjai, S.; Müller J. 2010. Improved quality and energy performance of a fixed-bed longan drier by thermodynamic modifications. *Journal of Food Engineering*, 99(3), pp. 392-399.

- Novaković M.; Stevanović S.; Gorjanović S.; Jovanovic P.; Tešević V.; Janković M.; Sužnjević D. 2011. Changes of Hydrogen Peroxide and Radical-Scavenging Activity of Raspberry during Osmotic, Convective, and Freeze-Drying. *Journal of Food Science*, 76(4), pp. C663-C668.
- Nsonzi, F.; Ramaswamy, S. 1998. Osmotic dehydration kinetics of blueberries. *Drying Technology*, 16(3-5), pp.725-741.
- O'Callaghan, J.; Menzies, D.; Bailey, P. 1971. Digital simulation of agricultural dryer performance. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 16(3), pp. 223–244.
- Oliveira, I.; Fernandes, F.; Rodrigues, S.; Sousa, P.; Maia, G.; Figueiredo, R. 2006. Modelling and optimization of osmotic dehydration of banana followed by air drying. *Journal of Food Process Engineering*, 29(4), pp. 400-413.
- Overhults, D.; White, G.; Hamilton, M.; Ross, I. 1973. Drying soybeans with heated air. *Transactions of the ASAE*, 16(1), pp. 112-113.
- Padua, G. 1993. Microwave heating of agar gels containing sucrose. *Journal of Food Science*, 58(6), pp. 1426-1428.
- Page, G. (1949). *Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers* (tesis). Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Perea-Flores, M.; Garibay-Febles, V.; Chanona-Pérez, J.; Calderón-Domínguez, G.; Méndez-Méndez, J.; Palacios-González, E.; Gutiérrez-López, G. 2012. Mathematical modelling of castor oil seeds (*Ricinus communis*) drying kinetics in fluidized bed at high temperatures. *Industrial Crops and Products*, 38(1), pp. 64-71.
- Pereira, R.; Marsaioli, A.; Ahrné, L. 2007. Effect of microwave power, air velocity and temperature on the final drying of osmotically dehydrated bananas. *Journal of Food Engineering*, 81, pp. 79-87.
- Phoungchandang, S.; Woods, J. 2000. Moisture diffusion and desorption isotherms for banana. *Journal of Food Science*, 65(4), pp.651-657.
- Piotrowski, D.; Lenart, A.; Wardzyski, A. 2004. Influence of osmotic dehydration on microwave-convective drying of frozen strawberries. *Journal of Food Engineering*, 65(4), pp. 519–525.
- Pokharkar, S.; Prasad, S.; Das, H. 1997. A model for osmotic concentration of banana slices. *Journal Food Science Technology*, 34(3), pp. 230–232.
- Prabhanjan, D.; Ramaswamy, H.; Raghavan, G. 1995. Microwave-assisted convective air drying of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 25(2), pp. 283-293.

- Precoppe, M.; Nagle, M.; Janjai, S.; Mahayothee, B.; Müller, J. 2011. Analysis of dryer performance for the improvement of small-scale litchi processing. *International Journal of Food Science and Technology*, 46(3), pp. 561-569.
- Putranto, A.; Chen, X. 2016a. Drying of a system of multiple solvents: modeling by the reaction engineering approach. *AIChE Journal*, 62(6), pp. 2144-2153.
- Putranto, A.; Chen, X. 2016b. Microwave drying at various conditions modeled using the reaction engineering approach. *Drying Technology*, 34(14), pp. 1654-1663.
- Rabby, M.; Jeelani, S.; Rangari V. 2015. Microwave processing of SiC nanoparticles infused polymer composites: comparison of thermal and mechanical properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(12), pp. 1-11.
- Raghavan, G.; Li, Z.; Wang, N.; Garipey, Y. 2010. Control of microwave drying process through aroma monitoring. *Drying Technology*, 28(5), pp. 591-599.
- Ranjan R.; Irudayaraj J.; Jun S. 2001. A three-dimensional control volume approach to modeling heat and mass transfer in foods materials. *Trans ASAE*, 44(6), pp. 1975–1982.
- Ranjan R.; Irudayaraj J.; Jun S. 2002. Simulation of infrared drying process. *Drying Technology*, 20(2), pp. 363–379.
- Ranjbaran M.; Zare D. 2013. Simulation of energetic-and exergetic performance of microwave-assisted fluidized bed drying of soybeans. *Energy*, 59, pp. 484-493.
- Razzaq, T.; Kappe, C. 2008. On the energy efficiency of microwave-assisted organic reactions. *Chemistry & Sustainability Energy & Materials*, 1(1-2), pp.123-132.
- Riva, M.; Campolongo, S.; Leva, A.; Maestrelli, A.; Torreggiani, D. 2005. Structure-property relationships in osmo-air-dehydrated apricot cubes. *Food Research International*, 38(5), pp. 533–542
- Roberts, J.; Tong, C.; Lund, D. 2002. Drying kinetics and time-temperature distribution of pregelatinized bread. *Journal of Food Science*, 67(3), pp. 1080–1087.
- Rodríguez, J.; Clemente, G.; Sanjuán, N.; Bon, J. 2014. Modelling drying kinetics of thyme (*Thymus vulgaris* L.): theoretical and empirical models, and neural networks. *Food Science and Technology International*, 20(1), pp.13–22.
- Rosa R.; Veronesi P.; Leonelli C. 2013. A review on combustion synthesis intensification by means of microwave energy. *Chemistry Engineering and Processing: Process Intensification*;71(1), pp. 2-18.

Sablani, S.; Rahman, M. 2003. Effect of syrup concentration, temperature and sample geometry on equilibrium distribution coefficients during osmotic dehydration of mango. *Food Research International*, 36(1), pp. 65-71.

Saltiel, C.; Datta, A. 1999. Heat and mass transfer in microwave processing. *Advances in Heat Transfer*, 33, pp.1-94.

Sanga E.; Mujumdar A.; Raghavan G. 2001. Principles and applications of microwave drying, in: A.S. Mujumdar (Ed.) *Drying Technology in Agriculture and Food Sciences*, Oxford IBH, Delhi, India 2001. Published simultaneously by Science Publishers, Enfield, USA, pp. 253– 289.

Sanga, E.; Mujumdar, A.; Raghavan, G. 2002. Simulation of convection-microwaves drying for a shrinking material. *Chemical Engineering and Processing*, 41(6), pp. 487-499.

Sankat, C.; Castaigne, F.; Maharaj, R. 1996. The air drying behaviour of fresh and osmotically dehydrated banana slices. *International Journal of Food Science and Technology*, 31(2), pp. 123–135.

Saputra, D. 2001. Osmotic dehydration of pineapple. *Drying Technology*. 19(2), pp. 415-425.

Sereno, A.; Moreira, R.; Martinez, E. 2001. Mass transfer coefficients during osmotic dehydration of apple in single and combined aqueous solutions of sugar and salt. *Journal of Food Engineering*, 47(1), pp. 43-49.

Seyfarth, R.; Leiker, M.; Mollekopf, N. 2003. In: *Continuous Drying of Lumber in a Microwave Vacuum Kiln*, 8th International IUFRO Wood Drying Conference, pp. 159-163.

Sharaf-Eldeen, Y. I.; Hamdy, M. Y.; Blaisdell, J. L. 1979. *Mathematical description of drying fully exposed grains*. ASAE Paper No: 793034, St. Joseph, MI: ASAE.

Sharaf-Eldeen, Y. L.; Hamdy, M. Y.; Blaisdell, J. L. 1980. A model for ear corn drying. *Transactions of the ASAE*, 23(5), pp. 1261-1265.

Simal S.; Femenia A.; García-Pascual P.; Rosselló, C. 2003. Simulation of the drying curves of a meat-based product: effect of the external resistance to mass transfer. *Journal of Food Engineering*, 58(2), pp. 193-199.

Simal S.; Mulet A.; Tarrazó J.; Rosselló C. 1996. Drying models for green peas. *Food Chemistry*, 55(2), pp. 121-128.

Souraki, B.; Mowla, D. 2008. Experimental and theoretical investigation of drying behaviour of garlic in an inert medium fluidized bed assisted by microwave. *Journal of Food Engineering*, 88(4), pp. 438-449.

- Sousa, W.; Marsaioli Jr, A.; Rodrigues, M. 2004. *Optimizing a microwave assisted banana drying process*. In: Silva, M.A. & Rocha, S.C.S. (Eds.), Proceedings of the 14th International Drying Symposium. São Paulo, Brazil, Vol. C, 1938-1945.
- Souza, W.; Pitombo, R.; Da Silva, M.; Marsaioli, A. 2006. *Sensory evaluation of dried bananas obtained from air dehydration assisted by microwaves*. In M. Willert-Porada (Ed.), Advances in microwave and radio frequency processing. Report from the 8th International conference on microwave and high-frequency heating held, Germany: Bayreuth, pp. 289–302.
- Soysal, Y.; Öztekin, S. 2001. PH-Postharvest Technology: Comparison of seven equilibrium moisture content equations for some medicinal and aromatic plants. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 78(1), pp 57-63.
- Sun, J.; Bo, L.; Yang, L.; Liang, X.; Hu, X. 2014. A carbon nanodot modified Cu-Mn-Ce/ZSM catalyst for the enhanced microwave-assisted degradation of gaseous toluene. *RSC Advances*, 4(28), pp. 14385-14391.
- Sun, T. 2014. Key models of heat and mass transfer of asphalt mixtures based on microwave heating. *Drying Technology*, 32(13), pp. 1568-1574
- Sunjka P.; Raghavan G. 2004. Assessment of pre-treatment methods and osmotic dehydration for cranberries. *Canadian Biosystem Engineering Journal*, 46, pp. 3.35–3.40.
- Tahmasebi, A.; Yu, J.; Han, Y.; Zhao, H.; Bhattacharya, S. 2014. A kinetic study of microwave and fluidized-bed drying of a Chinese lignite. *Chemical Engineering Research and Design*, 92(1), pp. 54-65.
- Talebian-Kiakalaieh, A.; Amin, N.; Mazaheri, H. 2013. review on novel processes of biodiesel production from waste cooking oil. *Applied Energy*, 104, pp. 683-710.
- Tiwari, R. 2005. Application of osmo-air dehydration for processing of tropical fruits in rural areas. *Indian Food Industry*, 24(6), pp. 62–69.
- Togrul, I.; Pehlivan, D. 2004. Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering*, 65(3), pp. 413-425.
- Torreggiani, D. 1993. Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. *Food Research International*, 26(1), pp. 59-68.
- Tovar B.; García H.; Mata M. 2001. Physiology of pre-cut mango. I. ACC and ACC oxidase activity of slices subjected to osmotic dehydration. *Food Research International*, 34(2-3), pp. 207– 215.

- Tulasidas, T.; Raghavan, G.; Mujumdar, A. 1995a. Microwave drying of grapes in a single mode cavity at 2450 MHz- I: drying kinetics. *Drying Technology* 13(8-9), pp. 1949-1971
- Tulasidas, T.; Raghavan, G.; Mujumdar, A. 1995b. Microwave drying of grapes in a single mode cavity at 2450 MHz- II: quality and energy aspects, *Drying Technology* 13(8-9), pp.1973-1992
- Van Arsdel, W. 1973. *Drying phenomena*. In W. B. Van Arsdel, M. J. Copley, A. I. Morgan Jr., Food dehydration (2nd ed.), vol. 1(3), AVI publishing Co., Westport, pp. 22–57.
- Van der Zanden, A. 1995. A possible revision of the results of a model for moisture transport in partially saturated porous media. *Drying Technology*, 13 (8-9), pp. 2227-2231.
- Van Nieuwenhuijzen, N.; Zareifard, M.; Ramaswamy, H. 2001. Osmotic drying kinetics of cylindrical apple slices of different sizes. *Drying Technology*. 19(3-4), pp. 525-545.
- Vasic, M.; Grbavcic, Z.; Radojevic, Z. 2014. Determination of the moisture diffusivity coefficient and mathematical modeling of drying. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 76, pp. 33-44.
- Vega-Gálvez, A.; Lemus-Mondaca, R.; Bilbao-Sáinz, C.; Fito, P.; Andrés, A. 2008. Effect of air drying temperature on the quality of rehydrated dried red bell pepper (var. Lamuyo). *Journal of Food Engineering*, 85(1), pp. 42-50.
- Venkatachalapathy, K.; Raghavan, G. 1998. Microwave drying of osmotically dehydrated blueberries. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 33(2), pp. 95–102.
- Venkatachalapathy, K.; Raghavan, G. 1999. Combined osmotic and microwave drying of strawberry. *Drying Technology*, 17(4-5), pp. 837-853.
- Verma, L.; Bucklin, R.; Endan, J.; Wratten, F. 1985. Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of the ASAE*, 28(1), pp. 296-301.
- Wang, C.; Singh, R. 1978. *A single layer drying equation for rough rice*. ASAE Paper No: 78-3001. St. Joseph, MI: ASAE.
- Wang, H.; Li, P.; Guo, K. 2016. Mathematical modeling of microwave drying of crashed cotton stalks for man-made composite material. *International Journal of Agricultural. Biological. Engineering*, 9(2), pp. 171-178.
- Wang, W.; Zhao, C.; Sun, J.; Wang, X.; Zhao, X.; Mao, Y.; Li, X.; Song, Z. 2015. Quantitative measurement of energy utilization efficiency and study of influence factors in typical microwave heating process. *Energy*, 87, pp. 678-685

Yagciolu, A.; Degirmencioglu, A.; Cagatay, F. 1999. *Drying characteristics of laurel leaves under different conditions*. In Proceedings of the 7th international congress on agricultural mechanization and energy, 26–27 May, Adana, Turkey.

Yongsawatdigul, J.; Gunasekaran, S. 1996. Microwave-vacuum drying of cranberries: Part II. Quality evaluation. *Journal of Food Processing and Preservation*, 20(2), pp.145-156.

Zhang, M.; Tang, J.; Mujumdar, A.; Wang, S. 2006. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 17(10), pp. 524-534.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

[1]http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/Estudios_promercado/PAPAYA_2009.pdf consultado 2 de julio de 2017.

[2] <http://www.lg.com/mx/soporte/soporte-producto/lg-MS-0745V>. consultado el 6 de noviembre del 2017