

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE
INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



TESIS

“OPTIMIZACIÓN DEL SECADO DE RODAJAS DE MANGO VARIEDAD HADEN (*Mangífera indica L.*) POR COMBINACION DE MICROONDAS Y AIRE CALIENTE”

AUTOR : Br. ANTHONY WILLIAM BARRANZUELA MENDOCILLA

ASESOR : M.Sc. PAULINO NINAQUISPE ZARE

TRUJILLO – PERÚ

2014

DEDICATORIA

A Dios que me ha dado la vida, la fortaleza y por poner en mi camino a personas valiosas que han contribuído significativamente en este trabajo;

A mis queridos Padres William y Violeta por su amor, cariño, consejos, formación e influyeron en mí la madurez para lograr todos los objetivos en la vida, es para ustedes ésta tesis en agradecimiento por todo su amor y confianza;

A mis queridos hermanos Alice y Adrian por lo cual me esfuerzo para brindarles un buen camino y superación;

A mis queridos Abuelos César y Alicia, Alberto y Juana que estuvieron conmigo y me guiaron ofreciéndome su paciencia, comprensión, bondad y sacrificio me inspiraron a seguir superándome;

A mis maestros que en este andar por la vida, influyeron con sus lecciones y experiencias en formarme como una persona de bien y preparada para los retos que pone la vida, a todos y cada uno de ellos les dedico cada una de estas páginas de mi tesis.

AGRADECIMIENTO

A mi asesor Mg. Sc. Ing. Paulino Ninaquispe Zare por el apoyo, orientación, sugerencias y entusiasmo dedicado a este trabajo de tesis, fruto de sus conocimientos y experiencias. Le agradezco de manera especial el tiempo que me dedicó.

Al Dr. Raúl Benito Siche Jara por su valiosa asesoría, comentarios vitales para llevar a cabo la ejecución de este trabajo de tesis, hago extensivo mi más sincero agradecimiento

A mis estimados amigos Br. Amnorer Alvarado Paredes al cual aprecio mucho, y que de donde está ilumina el paso de sus seres queridos, a mi estimado amigo Pepe Acevedo Blanco por brindarme sus conocimientos de emprendimiento empresarial y Comercio Exterior.

Y a todas aquellas personas e instituciones que de una u otra forma, colaboraron o participaron en la realización de esta investigación, hago extensivo mi más sincero agradecimiento.

INDICE GENERAL

PORTADA	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
INDICE GENERAL	v
INDICE DE CUADROS	vi
INDICE DE FIGURAS	7
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
I. INTRODUCCION	11
II. REVISION DE LITERATURA	11
2.1. Mango (<i>Mangífera indica L.</i>)	14
2.2. Secado	15
2.2.1. Mecanismos de secado	17
2.2.2. Secado por microondas	21
2.2.2. Secado combinado	22
2.3. Espacio CIELAB	23
2.4. Pigmentos Vegetales	23
2.4.1. Carotenoides	24
2.5. Superficie de respuesta	24
2.5.1. Diseño Compuesto Central	26
III. MATERIALES Y METODOLOGIA	26
3.1. Material	26
3.1.1. Material biológico	26
3.1.2. Materiales e insumos de experimentación	26
3.1.3. Equipos e instrumentos	26
3.2. Metodología	26
3.2.1. Proceso de obtención de rodajas de mango deshidratado (<i>Mangífera indica L.</i>)	27
3.2.2. Diseño experimental	30
3.2.3. Análisis estadístico	32
3.2.4. Validación del modelo matemático	33
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	38
V. CONCLUSIONES	39
VI. RECOMENDACIONES	40
VII. BIBLIOGRAFIA	45
VIII. ANEXOS	

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Composición del mango Haden en 100 gramos de fruto.	14
Cuadro 2. Niveles de las variables de estudio para los ensayos en un DCCR.	29
Cuadro 3. Variables codificadas y ensayos para un diseño central compuesto rotacional.	30
Cuadro 4. Coeficientes de Regresión para las Respuestas Y.	31
Cuadro 5. ANVA para las respuestas Y.	31

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mango variedad Haden.	12
Figura 2. Bandeja apiladora.	13
Figura 3. Calentamiento de un sólido por microondas.	18
Figura 4. Espacio Color CIELAB.	22
Figura 5. Biosíntesis de los carotenoides.	24
Figura 6. Diagrama de flujo para la elaboración de rodajas de mango deshidratado.	26
Figura 7. Equipo de secado por combinación de microondas y aire caliente.	28
Figura 8. Esquema de la potencia del microondas y la temperatura del aire caliente en la humedad final y la variación del color de las rodajas de mango.	26
Figura 9. Rodajas de mango Variedad Haden.	33
Figura 10. Hojuelas Mangos deshidratados por método de combinación de aire caliente y microondas.	34
Figura 11. Superficie respuesta y de contorno para la humedad.	36
Figura 12. Superficie respuesta y de contorno para la variación del color.	36
Figura 13. Optimización del proceso de secado por combinación de microondas y aire caliente de rodajas de mango Variedad Haden (<i>Mangífera indica L.</i>)	37

RESUMEN

En el presente trabajo denominado “Optimización del secado de rodajas de mango Variedad Haden (*Mangífera indica L.*) por combinación de microondas y aire caliente” se estudió el efecto de la potencia del microondas y de la temperatura de aire caliente sobre la humedad y la variación de color de las rodajas de mango. Se tuvieron en cuenta el tiempo de permanencia, espesor del mango.

Se realizó un planeamiento factorial completo 2^k , incluido 4 puntos axiales y un número arbitrario de puntos centrales (3 en este trabajo), lo que nos dio el número total de 11 ensayos, el cual permitió obtener los modelos que definen el comportamiento de las variables para las respuestas de la humedad y variación de color. Los modelos fueron altamente significativos con un $p < 0,05$ y por presentar un coeficiente de determinación R^2 altos, fue posible construir las superficies de respuesta.

Fue utilizado un Diseño Compuesto Central Rotacional para evaluar las zonas óptimas de humedad y la variación de color que ocasionaría, buscando en todo momento optimizar las humedades de acuerdo a las especificaciones y disminuir la variación de color. Según este diseño, la humedades óptimas entre 9-13% con menor variación de color se alcanza cuando la temperatura de aire caliente está entre 60 °C y 70 °C y se combina con una potencia de microondas entre 500 y 700 Watts.

ABSTRACT

In the present work entitled "Optimizing drying Variety Haden mango slices (*Mangifera indica* L.) by combining microwave and hot air" the effect of microwave power and hot air temperature on moisture and color variation of the mango slices were studied. Were considered the residence time, thickness of the handle.

It was a full 2k factorial planning, including four axial points and an arbitrary number of central points (3 in this work), which gave us the total number of 11 trials, which allowed us to obtain the models that define the behavior of variables responses to moisture and color variation. The models were highly significant at $p < 0.05$ and for presenting a high coefficient of determination R^2 was possible to construct the response surfaces.

It was used a Central Composite Rotational Design to evaluate the optimum moisture areas and variation of color cause, always seeking to optimize humidity according to the specifications and reduce color variation. According to this design, the optimum moisture content between 9-13% less color variation is achieved when the hot air temperature is between 60 ° C and 70 ° C and combined with microwave power between 500 and 700 Watts.

I. INTRODUCCION

En el Perú existe una gran variedad de frutas, muchas de ellas poco conocidas, pero que representan un gran potencial productivo agroindustrial, este es el caso del mango que es considerada la fruta tropical más conocida del mundo, además está creciendo en popularidad en los mercados internacionales y también debemos tener en cuenta que los departamentos de Piura, Lambayeque, La Libertad, Cajamarca y Ancash, poseen extraordinarios valles para el cultivo de mango; estos valles cuentan con una superficie sembrada de 15 mil hectáreas de mango de calidad de exportación, de las variedades Haden, Kent, Keit y Tommy Atkins.

La exportación de mangos peruanos está dirigida a diversos países del mundo, destacando los mercados de Alemania, Canadá, Colombia, España, Francia, Holanda, Inglaterra, Italia, Arabia Saudita y Panamá y con tratamiento hidrotérmico para los mercados de Nueva Zelanda y Estados Unidos, no obstante un proceso de maduración artificial se constituye en una nueva metodología para que este producto sea comercializado en estos países, que requieren de altos estándares de calidad en todo producto alimentario.

En otros estudios relacionados con la aplicación intermitente de las microondas en procesos de secado, fueron mostradas las ventajas en relación a la calidad del producto final y la temperatura de los materiales. (Raghavan y Silveira, 1999; Raghavan y Venkatachalapry, 1999, citado por Chua; Mujundar; Chou, 2003).

Drouzas y Saravacos (1999) publicaron sus estudios de secado combinado con microondas y vacío, realizados en un horno adaptado a un sistema de vacío en un modelo de gel experimental de pectina de 38% de humedad b.s., en el que fueron necesarios cuatro minutos para que el producto alcance 3% de humedad b.s. En comparación, a muestras similares del gel, secadas por aire caliente a 60 ° C y a presión ambiente, en un equipo de laboratorio tipo túnel, requirieron más de 8 horas para alcanzar el 10% de humedad. Debido al alto contenido de azúcar del gel, se produjo una contracción, en un colapso de la estructura de gel durante el secado por aire caliente, resultando en una menor tasa de transporte (difusión). La evaporación

del agua de las muestras fue acelerada principalmente por la absorción de energía del microondas por las moléculas de agua. Las microondas crean estructuras porosas en el gel, factor que facilitó el transporte de vapor de agua, debido a la diferencia de presiones internas y externas. El mismo producto, en comparación con el proceso de secado asistido por microondas a presión atmosférica, mostró un color más pronunciado, indeseable para el gel.

El presente trabajo de investigación ha planteado el siguiente problema: ¿Cuáles serán los parámetros óptimos del secado de las rodajas de mango (*Mangífera indica L.*) por combinación de microondas y aire caliente utilizando el método de superficie de respuesta?

Habiendo tenido como objetivos:

Optimizar la potencia del microondas y la temperatura del aire caliente, durante el secado de las rodajas de mango (*Mangífera indica L.*) utilizando una combinación de microondas y aire caliente utilizando el método de superficie de respuesta.

Realizar el análisis fisicoquímico del mango variedad Haden (*Mangífera indica L.*)
Determinar los parámetros óptimos de la potencia del microondas y la temperatura del aire caliente en el secado del mango variedad Haden (*Mangífera indica L.*) utilizando una combinación de microondas y aire caliente;

Obtener el Modelado del secado por combinación de microondas y aire caliente para el mejor tratamiento. Se ajustarán las curvas de secado con distintos modelos matemáticos: lineal, exponencial, potencial, logarítmico y polinómicos de diferentes grados.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Mango (*Mangífera indica L.*)

El mango está reconocido en la actualidad como uno de los 3 ó 4 frutos tropicales más finos aparentemente es originario del noroeste de la India y el norte de Burma en las laderas del Himalaya y posiblemente también de Ceilán.

Ahora, se encuentran bajo cultivo áreas importantes de mango en la India, Indonesia, Florida, Hawai, México, Sudáfrica, Queen Island, Egipto, Israel, Brasil, Cuba, Filipinas y otros numerosos países. Probablemente la India tiene más plantaciones comerciales que el total del resto del mundo. Sin embargo, esta especie se cultiva en todos los países de Latinoamérica, siendo México el principal país exportador del mundo.

El Perú es un país mega diverso que cuenta con más de 84 de las 104 zonas de vida aproximadamente, reconocidas en el mundo, ello y la diversidad de sus pisos ecológicos, le da la ventaja de poder cultivar prácticamente cualquier producto y durante todo el año.

El mango, es considerada la fruta tropical más conocida del mundo, está creciendo en popularidad en los mercados internacionales, debemos tener en cuenta que los departamentos de Piura, Lambayeque, La Libertad, Cajamarca y Ancash, poseen extraordinarios valles para el cultivo de mango; estos valles cuentan con una superficie sembrada de 15 mil hectáreas de mango de calidad de exportación, de las variedades Haden, Kent, Keit y Tommy Atkins.

La exportación de mangos peruanos está dirigida a diversos países del mundo, destacando los mercados de Alemania, Canadá, Colombia, España, Francia, Holanda, Inglaterra, Italia, Arabia Saudita y Panamá y con tratamiento hidrotérmico para los mercados de Nueva Zelanda y Estados Unidos.

Los estándares de calidad alcanzados por el mango peruano responden a dos factores: el país cuenta con condiciones climáticas inigualables para la producción de las variedades más apreciadas y la industria ha desarrollado modernas técnicas de cultivo, cosecha y embalaje que permite aprovechar al máximo el potencial productivo y lograr mejores precios (Bayona, 1998).

La época de cosecha en la zona norte es entre mediados de noviembre y mediados de febrero. El resto de la producción de costa (centro y sur) sale a partir de febrero, pero en cuanto a volumen, esta no pasa del 20% del total nacional.

En cuanto a rendimientos por hectárea estos son muy variables, así en lugares donde se aplica cierto nivel tecnológico existen records de cosecha que superan los 30.000kg/Ha; en el otro extremo de los rendimientos no superan los 6800 a 9000 Kg/Ha. Piura (75%) es el principal departamento productor, seguido de Lima (6%) y Lambayeque (5%).

HADEN	COLOR PROMEDIO				
					
					
COLOR INTERNO (PULPA)	Grado 1	Grado 2	Grado 3	Grado 4	Grado 5
MADUREZ / MADURACIÓN	12 - 15	12 - 14	5 - 8	4 - 5	2 - 3
FIRMEZA (lbs - fuerza)	6 - 8	9 - 11	12 - 15	14 - 16	14 - 17
SÓLIDOS SOLUBLES (° Brix)					

Figura 1. Mango variedad Haden

Si la fruta está destinada al mercado local o nacional puede cosecharse cuando se produce un ligero cambio de color de la cáscara del verde al amarillo pálido. Los mangos para mercados lejanos se cosechan al estado verde – maduros que marca el cambio de color de la pulpa del blanco al amarillo claro.

Es en la cosecha donde se produce un alto porcentaje de daños, perdiéndose en algunos casos hasta un 60% del volumen del total cosechado. Esto suele ocurrir por la utilización de una inadecuada técnica de cosecha que permite el contacto de la fruta con el suelo, ocasionando muchas veces golpes, ralladuras, quemaduras y la entrada de hongos o bacterias alojados en el terreno.

Para evitar esta pérdida, en enero de 1993, gracias al apoyo de la Fundación para el Desarrollo del Agro (FUNDEAGRO), el ingeniero peruano Erick D. Ángeles Revoredo realizó un trabajo de investigación que culminó en el diseño de la "bandeja cosechera", patentada en este mismo año por la Oficina de Invenciones de INDECOPI.

Esta tecnología permite colocar un máximo de 24 mangos de tal forma que quedan suspendidos, evitándose así el contacto con el suelo y, por consiguiente, los posibles daños y contagios. Adicionalmente, la bandeja cosechera garantiza un buen deslechado del látex de la fruta, aligera la recolección en el campo y garantiza su fácil transporte y manipulación.

Esta bandeja cosechera además facilita y aligera la labor de cosecha, trabajan sobre todo tipo, de terreno (sucios, enhierbados, húmedos, desnivelados etc.), pueden ser trasladados a lugares sombreados cuando los mangos quedan expuestos al sol, se torna más fácil el lavado de la fruta y los productos utilizados para ello (agua, fungicidas, desinfectantes) son mejor aprovechados, se incrementan directamente los ingresos se optimizan las labores de cosecha y post-cosecha, se disminuyen los costos de producción; por su diseño y estructura: aceptan todas los tamaños y variedades de mangos, son apilables y ocupan poco espacio, son livianas y transportables, son resistentes y de fácil manipuleo, son higiénicas y lavables.

Características de la bandeja cosechera

- Material: Poliestireno.
- Capacidad: 24 frutos.
- Medidas: 41 cm x 59 cm.
- Peso: 300 gramos.
- Color: Blanco, rojo, etc.



Figura 2. Bandeja apiladora.

Composición química

En el cuadro 1 se muestra la composición del mango Haden

Cuadro 1. Composición del mango Haden en 100 gramos de fruto

Agua, g	83
Energía, kcal	65
Grasas, g	0,45
Proteína, g	0,51
Hidratos carbono, g	17
Fibra, g	1,8
Potasio, mg	156
Hierro	0,13
Sodio, mg	0
Magnesio, mg	9
Fósforo, mg	11
Calcio, mg	10
Cobre, mg	0,11
Zinc, mg	0,04
Selenio, ug	0,6
Vitamina C, mg	27,7
Vitamina A, IU	3,894
Vitamina (B1) Tiamina, mg	0,058
Vitamina (B2) Riboflavina, mg	0,057
Vitamina (B3) Niacina, mg	0,58
Vitamina (B6) Piridoxina, mg	0,134
Vitamina E	0,1
Acido fólico, ug	14

Fuente : Minaya, (1999).

2.2. Secado

El secado es un proceso que engloba los fenómenos de migración y evaporación o vaporización de un solvente que es frecuentemente el agua. En los procesos de secado, los mecanismos de transferencia de masa y el calor puede ser los siguientes (Alduriy McIntyre, 1992):

- Transferencia de masa, el disolvente puede migrar en un conjunto de efectos:
 - a. Interfaz: de un gradiente de presión de vapor de disolvente en la superficie del producto (convección);

- b. Interna: de un gradiente de presión parcial del gas, de un gradiente de concentración de la fase gaseosa (difusión), por capilaridad o por gravedad
- Transferencia de calor, que puede ocurrir por convección, conducción y radiación.

Durante el secado es necesario un suministro de calor para evaporar la humedad del material y también debe haber un absorbedor de humedad para eliminar el vapor de agua formado a partir de la superficie del material a secar.

El secado es una de las etapas más importantes de la producción industrial en los sectores químico, farmacéutico y alimentario, ya sea en términos de calidad del producto o en la economía de su obtención. Los procesos de secado han evolucionado considerablemente en los últimos años, buscando las mejores condiciones de secado que resulten en un menor tiempo de procesamiento con un máximo de calidad del producto final (Milatovic y Mondelli, 1991).

2.2.1. Mecanismos de secado

El secado es un fenómeno complejo que depende de la transferencia de calor y masa de las propiedades físicas del material, mezclas de aire y vapor de agua y la macro y micro estructura del producto.

La cinética de secado muestra la variación de la humedad del material (intensidad de evaporación) con el tiempo. Las curvas de cinética de secado dan idea del tiempo necesario de secado, del consumo de energía, del mecanismo de transferencia de agua, de las condiciones predominantes en la transferencia de calor y masa, y de la influencia que tienen en la velocidad de secado las variables de proceso tales como: la temperatura, humedad de entrada, velocidad del aire, etc. Esto permite realizar un diseño o una selección más eficiente de secaderos así como de las variables de proceso.

De acuerdo con Strumilo y Kudra (1986); Alonso, (2001), el período inicial de secado; o el período que entre en régimen operacional, la temperatura del sistema es baja y la presión de vapor del agua en la superficie del producto es baja y, por consecuencia, la transferencia de masa y la velocidad de secado son poco perceptibles.

Con la elevación de la temperatura del producto se incrementa la presión y la velocidad de secado. Este fenómeno continúa hasta que la transferencia de calor compensa exactamente la transferencia de masa. Si la temperatura del aire es menor que el producto, éste se reducirá hasta que alcance el mismo estado de equilibrio. Usualmente, en productos alimenticios, el periodo de secado inicial es muy corto y puede ser despreciado.

En estado estacionario, la temperatura de la superficie del producto es igual a la temperatura de bulbo húmedo del gas de secado, lo que implica una tasa constante de transferencia de calor, resultando en una velocidad de secado constante.

Durante este período, como el anterior, la cantidad de agua disponible en el producto es grande, el agua se evapora como el agua no ligada.

Esta etapa del proceso es denominado período de velocidad constante y su fin está marcado por una reducción de la velocidad de secado, punto llamado como humedad crítica (X_{cr}), donde las transferencias internas comienzan a mostrar un papel más importante. En materiales biológicos es difícil la existencia de este período, pues las condiciones de secado son tales que las resistencias a las transferencias de masa se encuentran esencialmente en el interior del producto.

Después de un período de velocidad constante, la velocidad de secado disminuye continuamente durante todo el ciclo de secado restante.

Este comportamiento caracteriza una nueva etapa del proceso, conocido como período de tasa decreciente, que puede ser dividida en dos situaciones: La denominada estado funicular, en la cual el agua presente en la matriz sólida en estado no ligado, migra hacia la superficie por la acción capilar de la matriz, la humedad es eliminada de forma continua, siendo gradualmente reducida a partir de la presencia de bolsas de aire dispersos en la fase líquida dentro de los poros, esta situación es denominada como estado pendular.

El final del periodo de la tasa decreciente es marcado por el valor de la humedad de equilibrio (X_{eq}) del producto en las condiciones del aire.

2.2.2. Secado por Microondas

Microondas son una modalidad de radiación electromagnética, situada en un intervalo de frecuencias comprendido entre 300 MHz y 300 GHz, con longitudes de ondas que se extienden entre 1 m y 1 mm, respectivamente. Las bandas de frecuencias utilizadas para aplicaciones en electrotérmicos están restringidas, con el fin de evitar interferencias en las bandas de frecuencia utilizadas en las telecomunicaciones. Las frecuencias utilizadas son 915 ± 25 MHz y 2450 ± 50 MHz, que corresponde a longitudes de onda de 32,8 cm y 12,25 cm, respectivamente, en el vacío (Senise, 1985).

Las ondas electromagnéticas son oscilaciones de campos eléctricos y magnéticos asociados con la propagación en el espacio, que se rige por las ecuaciones de Maxwell, la velocidad en el vacío $c = 3 \times 10^8$ m / s. Se denominan (Smith, 1987):

- Longitud de onda (λ), la distancia desde un punto de una onda hasta el punto correspondiente de la siguiente onda, por ejemplo, desde el máximo positivo a un máximo positivo;
- Frecuencia de emisión (f), el número de ondas o ciclos por segundo ($1 / s$, o Hz), Se concluye que la longitud de onda λ es la distancia recorrida de 3×10^8 m, dividido por el número de ondas f , es decir:

$$\lambda = c/f$$

Las microondas son parte del espectro electromagnético y en consecuencia, se componen de campos magnéticos y eléctricos. En el calentamiento de alimentos por microondas, los campos eléctricos interactúan con las moléculas de agua e iones en el alimento, generando calor en forma volumétrica en el interior del mismo. La molécula de agua es un dipolo eléctrico que, cuando se lo somete a un campo eléctrico oscilante de elevada frecuencia, los dipolos se reorientan con cada cambio de polaridad. Así se produce la fricción dentro del alimento que hace posible que el mismo se caliente.

La diferencia principal entre las microondas y la radiación infrarroja es que las microondas inducen una fricción entre las moléculas de agua, que provoca calor; en cambio, la energía infrarroja es simplemente absorbida y convertida en calor. El calor

generado por las microondas no es uniforme. En el interior de los alimentos, se producen gradientes de temperatura que ocasionan la difusión del agua y provocan cambios en las propiedades de éstos que a su vez tienen efecto sobre la generación de calor. En síntesis, podemos decir: Las ondas electromagnéticas son responsables de la generación de calor, la transferencia de humedad y de los cambios bioquímicos y transformaciones físicas que se producen en el alimento.

Un sistema genérico de horno microondas está compuesto por un conjunto de componentes que pueden ser representados por (Conforti y Tejo, 1976; Marsaioli, 1991):

- El magnetrón que genera los campos electromagnéticos productores de microondas.
- Un tubo de aluminio denominado guía. En su interior, la energía se va reflejando y va siendo conducida hasta la cámara de calentamiento.
- Una cámara de calentamiento donde se dispone el alimento para ser calentado.

Las dos propiedades que determinan la interacción del alimento con las microondas son la constante dieléctrica y la pérdida dieléctrica. La constante dieléctrica representa la habilidad del material para almacenar energía electromagnética y el factor de pérdida dieléctrico efectivo tiene en cuenta la disipación de energía o la generación de calor. El aire en el interior del horno de microondas absorbe muy poca energía de las microondas, por lo tanto el alimento es calentado directamente por las ondas electromagnéticas; a excepción de los hornos microondas combinados que también trabajan con convección de aire calentado por una resistencia eléctrica.

En la Figura 3 se esquematiza el calentamiento de un sólido por microondas.

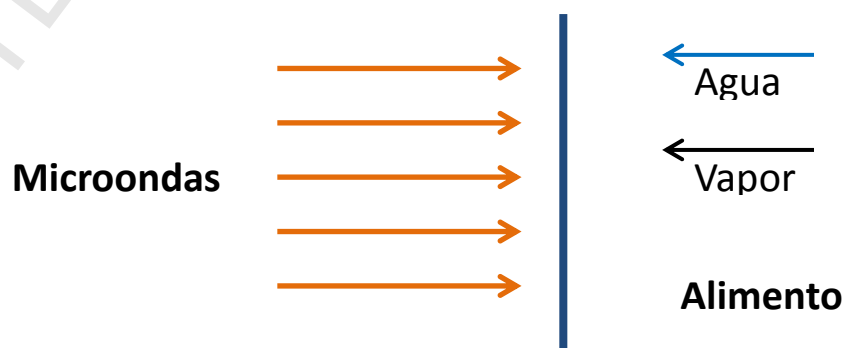


Figura 3. Calentamiento de un sólido por microondas.

El agua en estado líquido y el vapor de agua se transportan en el alimento por dos mecanismos principales; el agua lo hace por capilaridad y diferencia de presión y el vapor por difusión y diferencia de presión. Existen muchos modelos que intentan representar el calentamiento de un sólido por microondas y su deshidratación.

Algunas aplicaciones de las microondas:

Según Della (2010) el atractivo reside en la elevada velocidad de calentamiento y en que no provoca cambios significativos en la superficie del alimento cuando se trabaja con tiempos y potencias de microondas adecuados. El tratamiento industrial por microondas se halla restringido por sus costos y la necesidad de sintonizar el magnetrón con diferentes alimentos. La aplicación industrial más importante es la descongelación, la deshidratación y la terminación del horneado. Para productos de pequeño espesor como bizcochos, la eficacia del horneado convencional puede mejorarse sometiéndolos a un tratamiento final por microondas. Los hornos convencionales para lograr una cocción interna buena provocan cambios de color en la superficie; esto se debe a que la conductividad térmica del bizcocho va disminuyendo a medida que se va secando, entonces el tiempo para cocer las partes internas del producto son excesivamente grandes. Para solucionar esto, a la salida de los túneles de horneado se instalan unos calentadores por microondas que completan la cocción sin provocar cambios de color apreciables en la superficie. La utilización de las microondas con alimentos de elevado contenido de humedad ha tenido menos éxito. Ello se debe a la escasa profundidad de penetración alcanzada en piezas muy grandes y al efecto refrigerante que ocasiona la evaporación del agua en la superficie del alimento, que puede ocasionar la supervivencia de los microorganismos en esta zona.

Ventajas y desventajas en el uso de microondas en el secado

Entre las principales ventajas se pueden citar (Mascheroni, 2006):

- Una mayor eficiencia en la difusión de calor y materia
- Desarrollo de gradientes internos de humedad que aumentan la velocidad de secado

- Posibilidad de trabajar a menores temperaturas superficiales
- Mejora en la calidad de producto obtenido

Y entre las desventajas:

- Calentamiento no uniforme del producto
- Costos de instalación altos
- Eficiencia energética baja

El objetivo principal en las investigaciones sobre las propiedades eléctricas de los materiales es determinar los mecanismos de interacción entre los productos y la energía electromagnética de microondas. Estas propiedades determinan la cantidad de energía acoplada en un producto, su distribución dentro del producto y, en consecuencia, el tiempo y la frecuencia de microondas necesarios para el calentamiento en procesos de transferencia de energía por radiación (Mudgett, 1996).

Las investigaciones llevadas a cabo para el secado de diferentes productos, demuestran que la aplicación de largos tiempos de proceso y temperaturas elevadas conduce a una degradación sustancial en productos secos, pudiendo interferir con el sabor, el color, los nutrientes, acarrear arrugamiento, e interferir con la capacidad de re-hidratación en las últimas décadas, la aplicación de la tecnología de microondas que ofrece una alternativa a los procesos de secado, es el aspecto de mejorar la eficiencia energética en comparación con el secado por aire caliente por convección, sobre todo en el periodo de tasa decreciente, o una mayor conservación de la calidad del producto debido a los tiempos de procesamiento más cortos (Maskan, 2001).

Usualmente, el secado por microondas no sólo utiliza la energía electromagnética, pero la utiliza combinada con un calentamiento convencional. De este modo, el aire caliente elimina el agua libre de la superficie en cuanto que las microondas generan calor en el interior del producto, ayudando a eliminar el agua interna.

El calentamiento dieléctrico en combinación con la convección forzada convencional tiene un efecto sinérgico, es decir, la velocidad de secado es mayor cuando se combinan los dos procesos que en el caso de dos procesos separados (Smith, 1979).

El proceso de secado combinado con microondas pueden presentar las ventajas (Schiffmann, 1987):

- Eficiencia de conversión de energía: porque la energía está directamente acoplado con el material, no siendo parte de esta energía utilizado en el calentamiento del aire, las paredes del secador, transporte, etc. y en muchos casos la energía está acoplada con el disolvente y no por el sustrato;
- Menos espacio requeridos, debido a los menores tiempos de procesamiento;
- La calidad del producto puede ser mayor, pues sin altas temperaturas en la superficie del material, y asimismo con menores perfiles de temperatura, los problemas de endurecimiento de la superficie y las tensiones internas pueden ser eliminados; así como algunos efectos indeseables, como la desnaturalización de las proteínas, gelatinización del almidón.

Sin embargo, uno de los problemas de secado por microondas se relaciona con la distribución desigual del campo electromagnético en el interior del aplicador, que puede inducir un calentamiento no uniforme del producto (Kudra, 1989).

2.2.3. Secado Combinado

La utilización del secado por aire caliente como tratamiento térmico único, en todas sus variantes, permite procesar cualquier producto alimenticio para la obtención de un producto final estable. Sin embargo produce en los alimentos algunas transformaciones que pueden atentar con su calidad final. Entre ellas podemos mencionar: alteraciones en la forma y la textura del producto; composición y estructura no uniforme, cambios de sabor y aroma, modificación del color, degradación de componentes nutricionales, mala capacidad de rehidratación, etc. (Mascheroni, 2006).

El objetivo del uso de métodos combinados de secado se centra en tres aspectos fundamentales:

- Mejora de la calidad , en el ambiente y en energía
- Mínima degradación química
- Cambios de estructura y textura poco significativos
- Mínima variación de sabor y aroma
- Obtención del color deseado

- Control preciso del contenido de humedad
- Minimización del uso de energía en el proceso
- Reducción de las pérdidas de producto en las corrientes de efluentes
- Reducción de costos
- Desarrollo de equipos simples, confiables y que requieran poca mano de obra
- Minimización de la proporción de productos fuera de especificación
- Desarrollo de procesos estables capaces de operar en forma continua

2.3. Espacio CIELAB

El espacio CIELAB está adaptado también como norma UNE, y en él se definen unas magnitudes colorimétricas que se derivan matemáticamente de los valores triestímulo y pueden considerarse una respuesta de los observadores patrones a un estímulo luminoso. Tratando de imitar a los observadores reales, estas respuestas se hacen depender del tipo de estímulo y del blanco de referencia. El espacio de color CIELAB es un sistema coordenado cartesiano definido por tres coordenadas colorimétricas L^* , a^* , b^* magnitudes adimensionales

La coordenada L^* recibe el nombre de Claridad y puede tomar valores entre 0 y 100, Las coordenadas colorimétricas a^* y b^* forman un plano perpendicular a la Claridad. La coordenada a^* define la desviación del punto acromático correspondiente a la Claridad, hacia el rojo si $a^* > 0$, hacia el verde si $a^* < 0$. Análogamente la coordenada b^* define la desviación hacia el amarillo si $b^* > 0$, hacia el azul si $b^* < 0$,

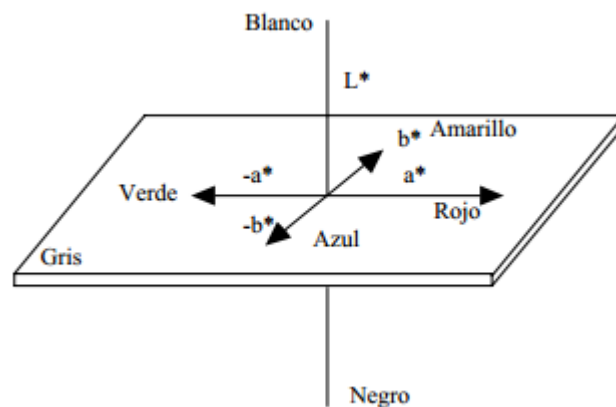


Figura 4. Espacio de color CIELAB

2.4. Pigmentos Vegetales

Los pigmentos naturales se pueden clasificar en antocianinas, betalainas, carotenoides (carotenos y xantofilas), clorofilas, β -triketonas y quinonas (benzoquinonas, naftaquinonas, antraquinonas, quinonas superiores), entre otros. La presente revisión bibliográfica se centró principalmente en pigmentos presentes en la guayaba: carotenoides, clorofilas y antocianinas.

2.4.1. Carotenoides

Son compuestos tetraterpenoides, formados por ocho unidades de isoprenos y biosintetizados a partir del precursor isopentenil pirofosfato, el cual proviene del ácido mevalónico. La cadena isoprenoide de los carotenoides es obtenida por la unión de cuatro unidades de isopentenil pirofosfato, seguido de la unión de dos unidades de geranil-geranil pirofosfato para dar el primer producto de cuarenta átomos de carbono. Este compuesto sufre reacciones de deshidrogenación que dan lugar a la formación de licopeno. Así, todos los carotenoides se consideran derivados del licopeno por reacciones de hidrogenación, ciclización, inserción de oxígeno, migración de dobles enlaces y metilos, entre otras. Su estructura presenta muchos dobles enlaces conjugados y varias ramificaciones con grupos metilo.

Los carotenoides se clasifican principalmente en dos grupos: carotenos y xantofilas. Los carotenos presentan una estructura que solo contiene carbono e hidrógeno; en tanto que las xantofilas, además de poseer carbono e hidrógeno, contienen oxígeno, en forma de grupos sustituyentes como hidroxilo, carbonilo y epóxido. Adicionalmente, existen otros carotenoides de menor tamaño denominados apocarotenoides, obtenidos a partir de rupturas de los tetraterpenoides en los carbonos 6, 9, 6' o 9'; por ejemplo, la crocetina y la bixina.

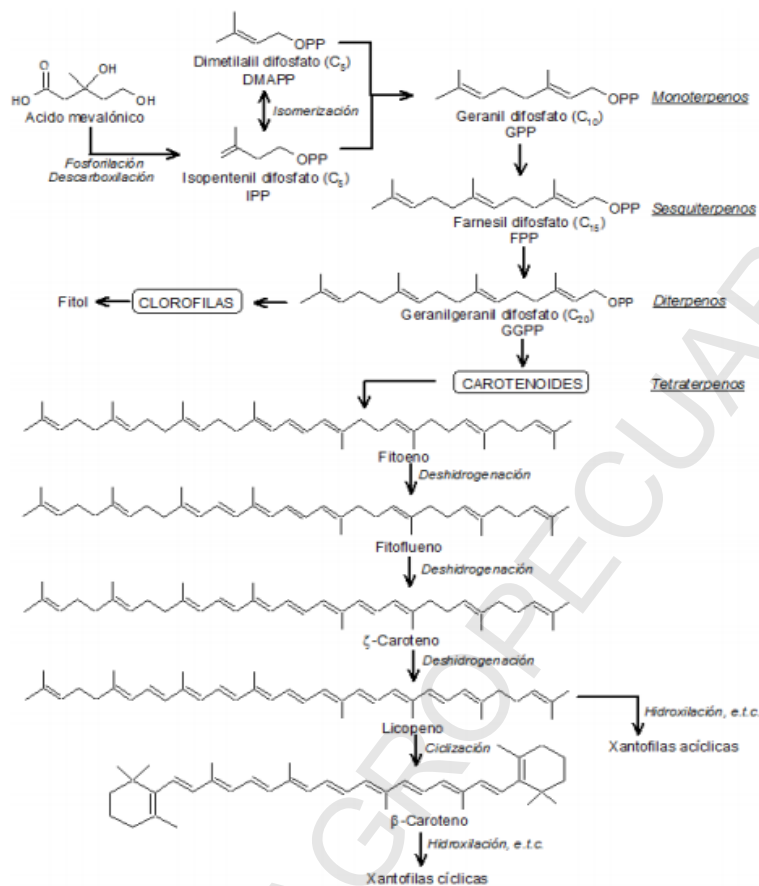


Figura 5. Biosíntesis de los carotenoides

2.5. Superficie de respuesta.

La superficie de respuesta se define como la representación geométrica de la función objetivo (relación entre la variable dependiente y las independientes consideradas en la investigación) o más propiamente dicho del modelo matemático obtenido (Ayala y Pardo, 1985).

Una cosa importante a tener en cuenta, es que un modelo nunca representa completamente un proceso, debido a las consideraciones siguientes:

- Omisión o no de un cierto número de variables.
- Conocimiento inexacto de las variables del proceso.
- Necesaria simplificación del modelo debido a las complejidades matemáticas.

Así, un modelo perfecto es una idéntica réplica del proceso bajo estudio. La representación geométrica de éste modelo vendría a ser la superficie de respuesta real.

Si bien, la superficie de respuesta real es algo ideal, sólo podemos aproximarnos a ella con los modelos matemáticos comúnmente utilizados (superficie de respuesta predicha) (Ayala y Pardo, 1985).

La Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas para modelar y analizar problemas en los que una variable de interés es influenciada por otras. El objetivo es optimizar la variable de interés. Esto se logra al determinar las condiciones óptimas de operación del sistema (Cornell, 1990).

2.5.1. Diseño Compuesto Central

Cuando un investigador necesita desarrollar o mejorar un proceso, o la formulación de un producto, él precisa planear un procedimiento experimental para validar los efectos de sus variables independientes o factores que afecten sobre sus respuestas. Puede ser interesante para el investigador la opción de validar un factor por vez, manteniendo las otras variables fijas para controlar un proceso, sin dejar por ello de determinar las condiciones óptimas al validar separadamente los factores (Rodríguez y Iemma, 2005).

Otra propiedad útil del diseño es que puede “crecer” a partir de un diseño $2k$ de primer orden, agregando puntos axiales y quizá algunos puntos centrales. Con la elección del número de puntos centrales (n), el diseño puede hacerse ortogonal o se puede transformar en uno de precisión uniforme (Montgomery, 1991).

Las ventajas para la utilización de la optimización de procesos es que se utilizan operaciones matemáticas relativamente simples de 1° y 2° grado, es posible detectar el error experimental y evaluarlo, y se necesitan poco conocimiento de la estadística (Rodríguez y Iemma, 2005).

III. MATERIALES Y METODOLOGIA

3.1 Material:

3.1.1 Material biológico

El material de estudio será el mango variedad Haden (*Mangífera indica L.*) proveniente de la provincia de Virú de la Región La Libertad.

3.1.2 Materiales e insumos de experimentación

- Agua
- Mesa de trabajo
- Mango Haden
- STATISTIC 6.0

3.1.3 Equipos e instrumentos

- Balanza semi-analítica: “SARTORIOS”, Capacidad máx. = 210g, precisión = 0.1mg.
- Termómetro
- Secador convectivo combinado de microondas y aire caliente

3.2 Metodología

3.2.1 Proceso de obtención de rodajas de mango deshidratado (*Mangífera indica L.*)

El proceso de obtención de rodajas de mango deshidratado se detalla en la Figura 6.

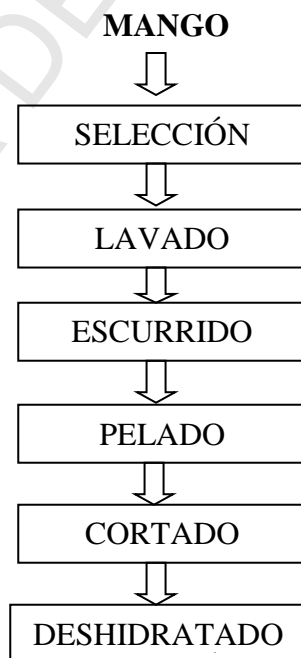


Figura 6. Diagrama de flujo para la elaboración de rodajas de mango deshidratado.

Descripción del flujo de obtención de rodajas de mango (*Mangífera indica L.*) deshidratado.

- *Selección.*- La Fruta fué proveniente de la provincia de Virú de la Región La Libertad, en donde serán seleccionadas las más frescas posibles, eliminando aquellos en estado de podredumbre.
- *Lavado.*- Se procedió a lavar con cuidado el mango para retirar algún material extraño presente en los productos que puedan contaminar el producto durante su elaboración.
- *Escurreo.*- Luego del lavado se colocó a escurrir o secar los productos para eliminar el agua superficial.
- *Pelado.*- Se eliminó completamente la cáscara de forma manual.
- *Cortado.*- El mango pelado fué cortado con un cuchillo manual en rodajas de 3 mm de espesor.
- *Deshidratado.*- Se trabajó variando la potencia del microondas en 220 a 880 W. Se analizará cómo influye en la deshidratación en la modificación de la temperatura de 50 a 80°C por minuto en cada tratamiento. Los mejores tratamientos serán los que contenga la humedad entre 9-13%.

3.2.2 Diseño experimental

Secado por microondas y aire caliente

Los experimentos se realizaron en un secador prototipo donde el producto se secó con aire caliente asistido por microondas.

El secado convectivo del producto se realizó en un horno microonda doméstico, adaptado a un sistema de admisión de aire caliente y de extracción del aire húmedo durante el proceso de secado tal como se muestra en la figura 7.

El sistema consistió en un ventilador centrífugo, una válvula de bola para controlar el flujo de aire, un calentador de resistencia eléctrica con control de temperatura. Para la circulación del aire, a la entrada en el horno, el sistema será revestido con lana de vidrio para su aislamiento térmico; así como se conectará una salida de aire caliente.



Figura 7. Equipo de secado por combinación de microondas y aire caliente.

La cantidad inicial del producto será de aproximadamente 200 g. La lectura de la masa del mango se realizó cada minuto durante el proceso de secado.

Se utilizó un diseño experimental que permitió optimizar las variables de potencia del microondas y la temperatura del aire caliente para obtener la menor humedad final y la menor variación del color tal como se observa en la figura 8.

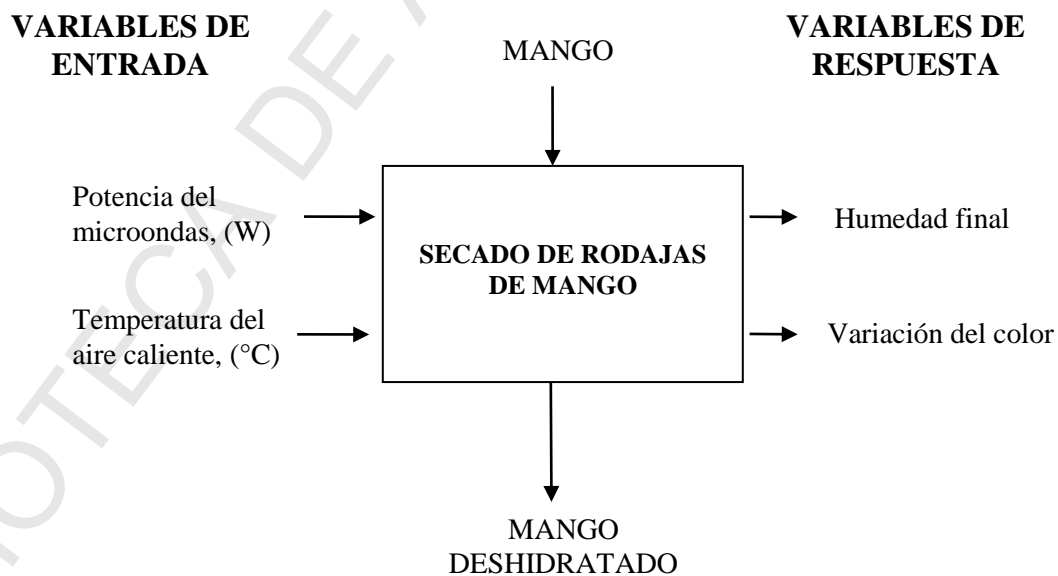


Figura 8. Esquema de la potencia del microondas y la temperatura del aire caliente en la humedad final y la variación del color de las rodajas de mango.

Con el fin de encontrar los valores óptimos de secado de las rodajas de mango (*Mangífera indica L.*) se utilizó la Metodología de Superficie de respuesta (Rodríguez y Iemma, 2005).

Para la aproximación a una superficie de segundo orden se utilizó un diseño central compuesto rotacional (DCCR), considerando $\alpha = 1,414$ con dos factores.

Planeamiento Factorial (DCCR)

$$2k + 2^*k + pc$$

Para el diseño se considerará:

k = (2 variables) potencia del microondas y temperatura del aire caliente.

2 = 2 niveles de estudio (-1, +1)

2^*k = 4 puntos axiales

pc = 3 puntos centrales (0)

Las variables respuesta serán la humedad final y la variación del color.

Los niveles de las variables serán los que se indican en el cuadro 2.

Cuadro 2. Niveles de las variables de estudio para los ensayos en un DCCR.

Variables	Niveles				
	-1,41	-1	0	1	1,41
X1:Potencia del microonda, (W)	220	330	550	770	880
X2: Temperatura del aire caliente, (°C)	50	54	65	76	80

La experimentación se realizó como se muestra en el cuadro 3.

Cuadro 3. Variables codificadas y ensayos para un diseño central compuesto rotacional (DCCR).

Ensayos	X1	X2	Y1 (Color)	Y2 (humedad final)
1	-1	-1	Y ₁₁	Y ₂₁
2	1	-1	Y ₁₂	Y ₂₂
3	-1	1	Y ₁₃	Y ₂₃
4	1	1	Y ₁₄	Y ₂₄
5	-1,41	0	Y ₁₅	Y ₂₅
6	1,41	0	Y ₁₆	Y ₂₆
7	0	-1,41	Y ₁₇	Y ₂₇
8	0	1,41	Y ₁₈	Y ₂₈
9	0	0	Y ₁₉	Y ₂₉
10	0	0	Y ₁₁₀	Y ₂₁₀
11	0	0	Y ₁₁₁	Y ₂₁₁

3.2.3 Análisis estadístico

Con los resultados (Y1 y Y2) del cuadro 3 y utilizando el software STATISTICA 7.0, se determinó los coeficientes de regresión (Cuadro 4) identificando los parámetros significativos, con lo que se elaboró un modelo polinómico con modelos matemáticos de 2° orden codificado como el que se muestra a continuación (Rodríguez y Iemma, 2005).

$$Y = b_0 + \sum_{j=1}^K b_j X_j + \sum_{u,j=1}^k b_{uj} X_u X_j + \sum_{j=1}^K b_{jj} X_j^2 \dots \dots \dots u \neq j$$

Donde:

b_0, b_j = Coeficientes de regresión

$i = 1, 2, 3, 4$

$j = 1, 2, 3, 4$

Cuadro 4. Coeficientes de Regresión para las Respuestas Y

Factor	Coeficiente de Regresión	Parámetro de Error	p – valor
Media			
X _i (L)			
X _i (Q)			
X _i X _j			

Dónde: L – Lineal Q – Cuadrática

Luego para validar el modelo estadístico, se realizó un análisis de varianza (ANVA) como se muestra en el cuadro 5 para las respuestas investigadas, verificando si las variables son significativas ($p < 0.05$ y R^2). La significancia del modelo y valores $R^2 \approx 1$ indican la concordancia entre los valores experimentales y previstos para el modelo.

Cuadro 5. ANVA para las respuestas Y

Fuente de Variables	Grados de Libertad GL	Suma de Cuadrados SQ	Media de Cuadrados QM	F calc.	p - valor
Regresión Lineal: RL	k-1	$\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	$\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{(k-1)}$		
Residuos .Res	n-k	$\sum_{i=1}^n [y_i - \hat{y}_i]^2$	$\frac{\sum_{i=1}^n [y_i - \hat{y}_i]^2}{(n-k)}$	QMRL/QMR	
Total	n-1	$\sum_{i=1}^n Y_i^2 - n \bar{Y}^2$			

k: coeficientes de la regresión lineal.

n: número total de ensayos.

Analizados los resultados se procedió a generar las Superficies de Respuesta con las curvas de contorno para visualizar los valores óptimos, superponiendo las gráficas (Rodríguez y Iemma, 2005).

3.2.4 Validación del modelo matemático

Se realizó tres corridas experimentales con los valores óptimos de las variables de la reacción para comprobar que tan lejos o cerca se encuentran de los valores reales.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Modelación y Optimización secado de rodajas de mango Variedad Haden (*Mangífera indica L.*) por combinación de microondas y aire caliente.

En la tabla 1 se muestra los resultados del secado de rodajas de mango por combinación de microondas y aire caliente.

Los tratamientos 9,10 y 11 reflejan una buena repetitibilidad del proceso de secado ya que las variables dependientes como la humedad y la variación de color para estos tratamientos son muy cercanos.

TABLA 01. Porcentaje de humedad y Variación del color

Tratamientos	VARIABLES INDEPENDIENTES		VARIABLES DEPENDIENTES	
	Potencia microondas (W)	Temperatura aire Caliente (°C)	Humedad (%)	Δ Color
1	300	54	19,82	8,717
2	700	54	12,58	11,841
3	300	76	16,42	8,765
4	700	76	12,36	12,365
5	200	65	22,92	7,503
6	800	65	9,12	16,323
7	500	50	17,19	10,256
8	500	80	12,34	10,374
9	500	65	14,13	9,076
10	500	65	13,83	9,112
11	500	65	14,56	9,014

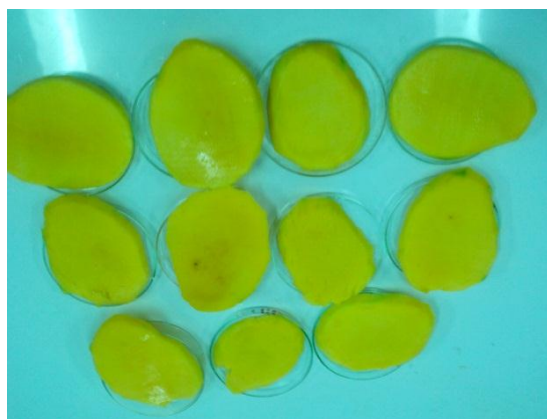


Figura 9. Rodajas de mango Variedad Haden

En la Tabla 1 se puede muestra el tratamiento 6 con potencia del microondas de 800W y una Temperatura de aire caliente de 65°C se obtiene como variable respuesta una humedad de 9,12% y una variación de color de 16.323 según, Mascheroni (2006) una mayor eficiencia en la transmisión de calor y materia, se obtienen combinando los métodos de secado la cual favorece el desarrollo de gradientes internos de humedad que aumentan la velocidad de secado y la posibilidad de trabajar a menores temperaturas superficiales.



Figura 10. Rodajas Mangos deshidratados por método de combinación de aire caliente y microondas.

El aspecto visual es uno de los factores principales utilizados por el consumidor al momento de comprar un producto; y el color es una parte importante del aspecto visual, que además se utiliza en muchos estándares de clasificación como criterio de calidad (Slaughter, 2009) En la Figura 10. Se muestra una variación de color de 16.323 lo cual indica una mayor diferenciación del color inicial ($L= 87.3883$, $a= 0.7114$ y $b=35.6946$).

TABLA 2. Análisis de regresión para la humedad y variación de color

Factor	Humedad		Color	
	Coefficientes	p	Coefficientes	p
Mean/Interc.	59,20941	0.050783	29,19993	0.129310
(1)Potencia (W)(L)	-0,06275	0.040926	-0.02057	0.253278
Potencia (W)(Q)	0.00002	0.159870	0.00003	0.020467
(2)T° aire caliente(L)	-0.63774	0.366497	-0.56039	0.265060
T° aire caliente(Q)	0.00259	0.612774	0.00417	0.266769
1L by 2L	0.00036	0.274835	0.00005	0.802345

TABLA 3. Análisis de varianza para la humedad y variación de color

Factor	HUMEDAD					COLOR				
	SC	GL	CM	F _{cal}	F _{tab}	SC	GL	CM	F _{cal}	F _{tab}
Regresión	141,6354	5	28,32708	17,87265133	0,003313635	57,32818	5	11,465636	20,163898	0,00250416
Residuos	7,9247	5	1,58494			2,84311	5	0,568622		
Total	149,5601	10				60,17129	10			

Utilizando Statistica 6.0 y con los datos de la tabla 1 Se obtuvo el análisis de regresión tal como se muestra en la (tabla 2), del cual considerando solo los coeficientes significativos ($p < 0.05$) se obtuvieron modelos matemático para las variables humedad (H) y variación de color (C)

$$H = 59.20941 - 0.06275 * P + 0.00002 * P^2 - 0.63774 * T + 0.00259 * T^2 + 0.00036 * P * T$$

$$C = 29.19993 - 0.02057 * P + 0.00003 * P^2 - 0.56039 * T + 0.00417 * T^2 + 0.00005 * P * T$$

De la Tabla 3 se observa que el modelo para la humedad es significativo ($F_{cal} > F_{tab}$); y junto a su alto grado de determinación ($R^2 = 0.9437$; y $R^2_{ajustado} = 0.8875$) indica lo adecuado del modelo

para predecir esta variable. Lo mismo ocurre con la variación de color ($F_{cal} > F_{tab}$; $R^2 = 0.9324$; y $R^2_{ajustado} = 0.8649$). Esta validación estadística permite interpretar los resultados mediante las superficies de respuesta.

En las Figuras 11 y 12 se muestran las superficies de respuesta y de contornos para la humedad y la variación de color en función de la potencia del microondas y de la temperatura de aire caliente. Las menores valores de humedad y las menores variaciones de colores se muestran en las regiones de color verde;

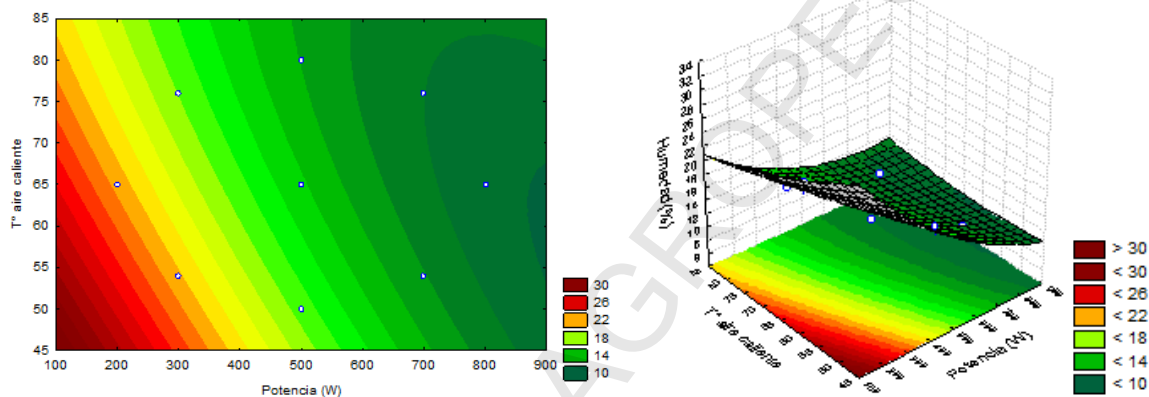


Figura 11. Superficie respuesta y de contorno para la humedad

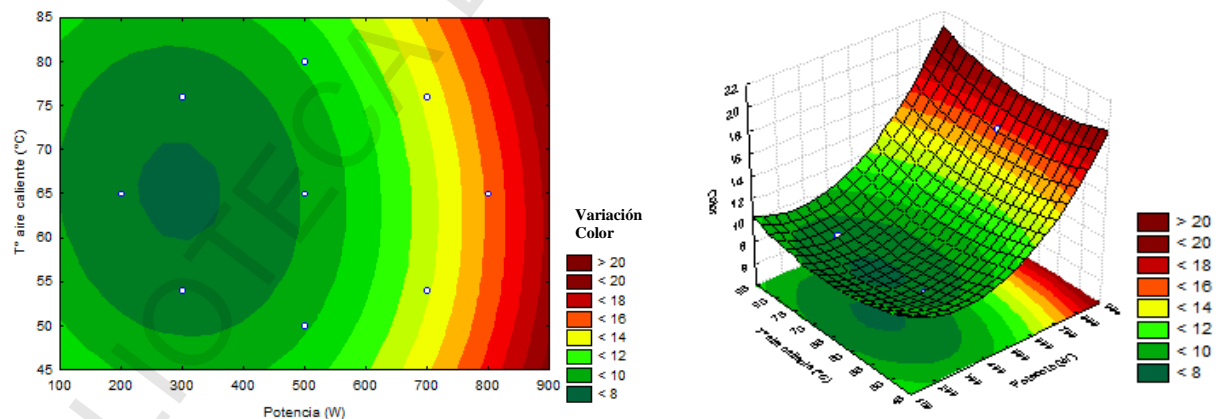


Figura 12. Superficie respuesta y de contorno para la variación del color

La optimización del proceso de secado por combinación de aire caliente y microondas se realizó superponiendo las superficies de contorno de las variables (Figura 13) Finalmente se hicieron

tres repeticiones para validar experimentalmente esta región gráfica, tomando la temperatura de aire caliente y la potencia del microondas dentro de la región óptima.

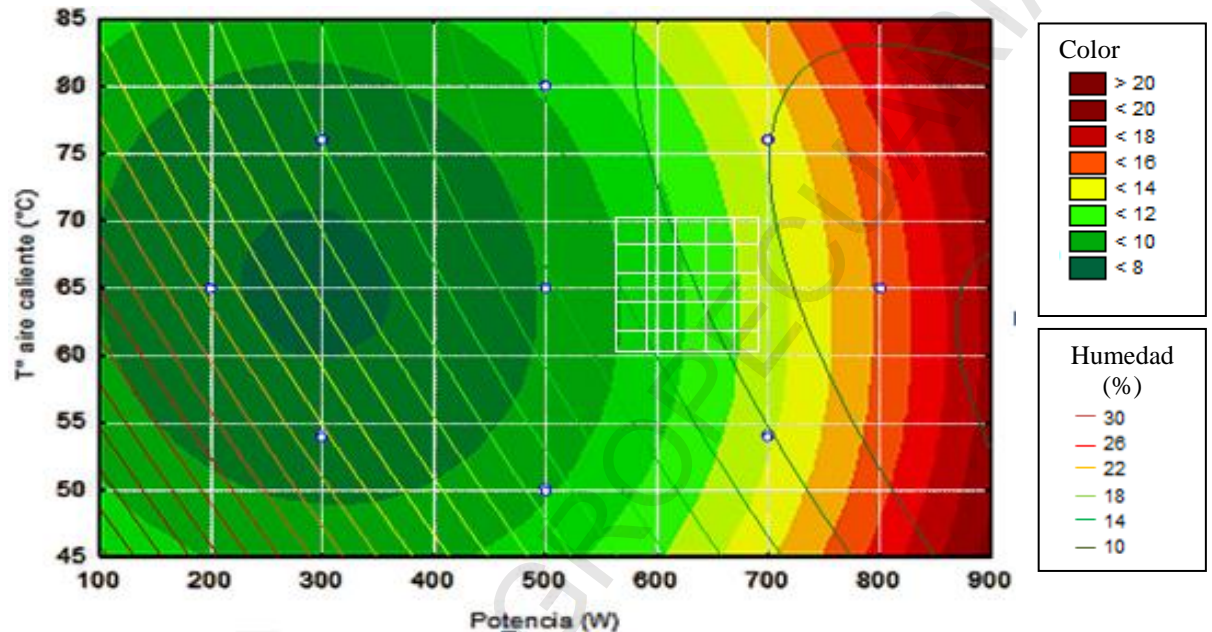


Figura 13. Optimización del proceso de secado por combinación de microondas y aire caliente de rodajas de mango Variedad Haden (*Mangifera indica L.*)

Tabla 4. Validación Experimental del modelado del secador de aire caliente y microondas

Potencia microondas (W)	T° (°C) aire Caliente	HUMEDAD(%)		DESUDIO RELATIVO	COLOR		DESUDIO RELATIVO
		EXPERIMENTAL	MODELO		EXPERIMENTAL	MODELO	
600	70	12.81	11.9286	6.8805	11.513	10.9636	4.7717
650	65	12.72	11.5715	9.0286	11.743	11.8098	0.5691
700	65	12.46	10.9540	12.0862	12.014	12.9688	7.9476
PROMEDIO		12.66	11.4847	9.3318	11.757	11.9140	4.4290

Las tres repeticiones realizadas dan respuestas similares a los que se calculan con los modelos obtenidos anteriormente (Tabla 4), obteniendo desvíos relativos menores a 10%. Esto significa que los modelos encontrados, pueden ser utilizados para predecir la humedad y la variación de color en forma óptima y con desvíos relativos bajos.

V. CONCLUSIONES

Los modelos matemáticos realizados en el proceso del secado de rodajas de mango (*Mangífera indica L.*) para la humedad fueron significativos ($F_{cal} > F_{tab}$); y junto a su alto grado de determinación ($R^2 = 0.9437$; y $R^2_{ajustado} = 0.8875$) indica lo adecuado del modelo para predecir esta variable. Lo mismo ocurre con la variación de color ($F_{cal} > F_{tab}$; $R^2 = 0.9324$; y $R^2_{ajustado} = 0.8649$).

Los parámetros óptimos de la potencia del microondas y la temperatura del aire caliente, durante el secado de las rodajas de mango (*Mangífera indica L.*) utilizando una combinación de microondas y aire caliente, se obtuvieron en un rango de potencia entre 550-700W combinando con aire caliente a temperatura de 60 a 70°C.

VI.RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar panelistas para la aceptación del producto final en cuanto al color.
- Incentivar la industrialización de productos deshidratados tanto para frutas y hortalizas ya que no es muy conocido por el cliente, aumentando su importancia en el ámbito local e internacional ya que poseen buenas características nutritivas.

VII. BIBLIOGRAFIA

ALDURI, B.; y MCINTYRE, S. 1992. Comparison of Drying Kinetics of Foods Using a Fan-Assisted Convection Oven, a Microwave Oven and a Combined Microwave/Convection Oven. *Journal of Food Engineering*, England: Elsevier Science Publishers Ltd., v. 15, p. 139-155.

ALONSO, L. 2001. Algoritmos de selección e dimensionamiento de secadores. Tese (Doutorem Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.

ARTEAGA, H. y RODRIGUEZ, H. 2004. Diseño de un secador de bandejas prototipo que opere con briquetas de carbón y determinación del nivel óptimo de cuatro variables que intervienen en el secado de papa (*Solanum tuberosum*) variedad Canchán. Ingeniería Agroindustrial. Trujillo - Perú.

AYALA, J. y PARDO R. 1985. Optimización por Diseños Experimentales con Aplicaciones en Ingeniería. Lima-Perú. Pp. 261.

BAYONA, C. 1998. Modernas técnicas para el cultivo del mango en Perú. Disponible en <http://www.oei.org.co/sii/entrega6/art09.htm>

BERGERET, G. 1995. “Conservas Vegetales. Frutas y Hortalizas”. Salvat. Editores Barcelona. España.

CÁMARA M., SÁNCHEZ C. y TORIJA E. 2003. Frutas y verduras fuente de salud. Departamento de nutrición y bromatología. Facultad de farmacia. Universidad Complutense de Madrid – España. Disponible en URL: http://www.senba.es/recursos/pdf/frutas_y_verduras.pdf

CHUA, K. S.; MUJUNDAR, A. S.; CHOU, S. K. 2003. Intermittent drying of bioproducts - an overview, *Bioresource Technology*, v. 90, p. 285-295.

CONFORTI, E.; TEJO, R. 1976. Desenvolvimento de um forno a microondas para fins domésticos e comerciais, Convenio MIC-STI Atecil, Projeto 15.02.01, Relatório final.

CORNELL, J. A. 1990. "Experiments with mixtures". Design, Models and the analysis of mixture data New York, second edition.

CORONADO TRINIDAD, M. y ROSALES, R. 2001. Elaboración de mermeladas. Procesamiento de alimentos para pequeñas y microempresas agroindustriales. Lima - Perú. Disponible en URL: <http://infoagro.net/shared/docs/a5/Gtecnol12.pdf>

CUI, Z. W.; XU, S. y.; SUN, D. W. 2004. Microwave-vacuum drying kinetics of carrots slices, Journal of Food Engineering, England: Elsevier Science Publishers v. 65, p. 157-164.

DELLA, P. 2010. Secado de alimentos por métodos combinados: Deshidratación osmótica y secado por microondas y aire caliente. Tesis de Maestría en Tecnología de los Alimentos. Facultad Regional Buenos Aires. Argentina.

DROUZAS, E.; SARAVACOS, G. 1999. Microwave / vacuum drying of model fruit gels. Journal of Food Engineering, England: Elsevier Science Publishers v. 39, p. 117-122.

FENG, H.; TANG, J.; CAVALIERI, R.; PLUMB, O. 2001. Heat and mass transport in microwave drying of porous materials in a spouted bed. AIChE Journal, American Institute of Chemical Engineers, v. 47. n. 7 p. 1499 – 1512.

FUNEBO, T.; OHLSSON. 1998. Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom. Journal of Food Engineering, England: Elsevier Science Publishers v. 38. n. 3. p. 353 – 367.

GOKSU, E. I.; SUMMU, G. ESIN, A. 2004. Effect of microwave on fluidized bed drying of macaroni beads Journal of Food Engineering, England: Elsevier Science Publishers, vol. 66. n 4 p. 463 – 468.

GARCIA D. y PAREDES G. 2001. Proceso tecnológico para la elaboración de mermelada de guayaba (*Psidium guava*). Universidad central de Venezuela facultad de agronomía departamento de química y tecnología cátedra de tecnología de frutas y hortalizas. Disponible en URL:

<http://ftpctic.agr.ucv.ve/intranet/quimica/frutas/etapa2/guayaba.doc>

KUDRA, T. 1989. Dielectric drying of particulate materials in a Fluidized in a fluidized state. Drying Technology vol. 1. n.7, p. 17-34.

MARSAIOLI JR. A. 1991. Desenvolvimento de un protótipo de secador cilíndrico – rotativo a microondas e a ar quente para a secagem contínua de produtos sólidos granulados. 1991. 197p. Tese (Doutorem Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.

MASCHERONI, R.H., 2006. Estudios y desarrollos en deshidratación por métodos combinados. IX Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Buenos Aires, 7-9 Agosto de 2006. Simposio “Avances Tecnológicos en los medios tradicionales de conservación”.

MASKAN, M. 2001. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwi fruits during hot air and microwave drying, v. 48, p. 177-182.

MILATOVIC, L. J.; MONDELLI, G. 1991. Pasta technology today Trad. de Cinzia Tussardi. Chiriotti, 349p.

MINAYA, A. 1999. El mango en el Perú y sus vínculos con el mercado internacional. Ministerio de Agricultura. IICA.

MONTGOMERY, D. 1991. Diseño y Análisis de Experimentos. Editorial Iberoamerica. México. Pp. 524. Primera Edición.

MONTGOMERY, C. 2002. Diseño y Análisis de Experimentos. Editorial Limusa, Segunda Edición.

MUDGETT, R. E. 1996. Electrical properties of foods. In: RAO, M. A. (Ed.) Engineering properties of food 2. Ed. New York. P. 389-456.

PÉRÉ, C.; RODIER, E. 2002. Microwave vacuum drying of porous media: experimental study and qualitative considerations of internal transfers. Chemical Engineering and Processing, vol. 41, p. 427 – 436.

PÉRÉ, C.; RODIER, E.; LOUISNARD, O. 2001. Microwave vacuum drying of porous media: verification of a semi-empirical formulation of the total absorbed power. Drying Technology 19(6), p. 1005-1022.

POINTING, J., WATTERS, G., FORREY, R., JACKSON, R., STANLEY, W. 1973. Osmotic dehydration of fruits. Food Technology, 20, 125.

RAHMAN, S. 1995. Food properties handbook. ((p. 34)239). Boca Ratón, FL; CRC Press.

RAHMAN M., LAMB J., 1990. Osmotic dehydration of pineapple, Journal of Food Science and Technology, 27, 150-152.

RAHMAN, S. AND PERERA C., 1996. Osmotic dehydration: a pretreatment for fruit and vegetables to improve quality and process efficiency. The Food Technologist, 25: 144-147.

RASTOGI, N., RAGHAVARAO, K., NIRANJAN, K. y KNORR, D., 2002. Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer, Trends in Food Science and Technology, 13, 48-59.

RODRÍGUEZ, M.I., 1998. Estudio de la penetración de microorganismos en frutas mediante el modelo hidrodinámico, Tesis, Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Universidad Central de Venezuela.

RODRIGUEZ, M. y LEMMA. 2005. Planeamientos de Experimentos y Optimización de Procesos. Casa de Pao Editorial. Sao Paulo, Brasil.

SALUNKHE, D. y DESAI B. 1984. Postharvest Biotechnology of Fruits. Vol. I y II. Florida: CRC Press. Boca Ratón.

SCHIFFMANN, R. F. 1987. Microwave and dielectric drying. IN: MUJUNDAR, A. S. Handbook of industrial drying. New York: Marcel Dekker. p 327-356.

SENISE, J. 1985. Utilização de ráiofrequência e microondas na eletrônica industrial. Revista Brasileira de Engenharia Química, v. 8, n. 1, p. 51-61.

SMITH, F.J. 1979. Microwave-hot air drying of pasta, onions and bacon. Microwave Energy Applications Newsletter, vol. 12. n.6, p. 6-12.

SMITH. F. J. 1987. Microondas. Ed. Érica Ltda, 135p.

STRUMILO, C.; KUDRA, T. 1986. Heat and mass transfer in drying processes Drying: principles, applications and design Montreux: Gordon and Breach Science Publishers, v. 3, cap. 2, p. 37-66.

VIII. ANEXOS

8.1. DETERMINACION DE LA HUMEDAD

El componente más abundante y el único que casi está presente en los alimentos es el agua. La determinación del contenido de humedad de los alimentos es una de las más importantes y ampliamente usadas en el proceso y control de los alimentos ya que indica la cantidad de agua involucrada en la composición de los mismos.

8.1.1. MATERIALES Y REACTIVOS

Balanza analítica, plancha de calentamiento, estufa, placa de petri, vidrios de reloj, pinzas de madera y metálicas, muestras de alimentos (Mango Haden)

8.1.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Tome una muestra del alimento que se le indique, córtelo o tritúrelo finamente hasta homogeneizarlo y pese entre 5 y 7 gramos en una capsula de petri previamente tarada. Reporte la pesada con cuatro cifras significativas. Si el alimento es líquido coloque la cápsula en la plancha de calentamiento hasta secar completamente, SIN QUEMARLO, Luego lleve la cápsula a la estufa por un tiempo de 1 hora, a una temperatura de 98-100 °C, Transcurrido el tiempo indicado retire la cápsula de la estufa, deje enfriar y pese de nuevo. Realice pesadas sucesivas hasta que el peso sea constante en tres ocasiones.

$$\% \text{ HUMEDAD} = \frac{\text{g H}_2\text{O evaporada} \times 100}{\text{Masa de muestra (g)}}$$

8.2. DETERMINACION DE LA VARIACION DEL COLOR

La fórmula de diferencia de color CIELAB está adoptada como norma UNE, en la que se determina la diferencia de color (métrica) existente entre dos sólidos opacos, no fluorescentes y uniformemente coloreados, a partir de las magnitudes colorimétricas ya definidas, mediante las fórmulas siguientes:

8.2.1. DETERMINACION DE LA SATURACION DE COLOR

$$\text{SATURACION} = \sqrt{a^{*2}+b^{*2}}$$

8.2.2. DETERMINACION DEL TONO DE COLOR

$$\text{TONO DE COLOR} = a^*+b^*$$

8.2.3. DETERMINACION DE LA VARIACION DE COLOR

$$\Delta\text{COLOR} = \sqrt{(L-L^*)^2+(a-a^*)^2+(b-b^*)^2}$$