

**DETERMINACIÓN DEL EFECTO DEL ULTRASONIDO COMO
PRETRATAMIENTO DEL SECADO POR MICROONDAS DE LA AHUYAMA
(*Cucurbita maxima*)**

LENIN JOSÉ NARVÁEZ MARTÍNEZ

RUTBELL JASSILL LEÓN MESTRA



**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS
FACULTAD DE INGENIERÍA
BERÁSTEGUI – CÓRDOBA**

2017

**DETERMINACIÓN DEL EFECTO DEL ULTRASONIDO COMO
PRETRATAMIENTO DEL SECADO POR MICROONDAS DE LA AHUYAMA
(*Cucurbita maxima*)**

LENIN JOSÉ NARVÁEZ MARTÍNEZ

RUTBELL JASSILL LEÓN MESTRA

Tesis presentada en opción al Título Académico de Ingeniero de Alimentos

Directores

OMAR PÉREZ SIERRA I.Q., Ph.D

FABIÁN ORTEGA QUINTANA I.A., M.Sc.

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

PROGRAMA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS

FACULTAD DE INGENIERÍA

BERÁSTEGUI – CÓRDOBA

2017

**La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del
proyecto, serán responsabilidad de los autores.**

Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

*A mis padres que me apoyaron en cada momento, aconsejaron y motivaron a terminar
mis estudios.*

Lenin Narváz Martínez

DEDICATORIA

A Dios.

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mi madre Anaide.

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A mi padre Plinio.

Por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.

Rutbell León Mestra

AGRADECIMIENTOS

Nuestro más sincero agradecimiento a:

A la Universidad de Córdoba, por permitirnos desarrollar nuestros estudios y toda la ayuda brindada.

A nuestros directores Omar Pérez Sierra y Fabián Ortega Quintana, que nos ayudaron y guiaron en cada momento.

A nuestros amigos Sindy Galván Araujo, Yomar Avilés Montes, Mario Uparela, Jorge Quijano, Yared Berrocal y Jesús Jaimés. Quienes nos prestaron su ayuda, apoyo y animaron de forma incondicional para poder terminar nuestro proyecto.

Lenin Narváez Martínez

Rutbell León Mestra

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. GENERALIDADES DE LA AHUYAMA	3
2.1.1. Producción mundial y nacional.....	4
2.1.2. Usos de la ahuyama.....	4
2.2. SECADO	5
2.2.1. Generalidades del secado.....	5
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
3.1. Obtención de la materia prima.....	12
3.2. Caracterización de la ahuyama	12
3.3. Preparación de muestras.....	13
3.3.1. Clasificación, lavado y desinfección de la ahuyama.....	13
3.3.2. Obtención y preparación de la muestra	13
3.4. Adecuación de la muestra	13
3.5. Procedimiento para el secado	14

3.6. Modelación matemática de las curvas de cinética de secado	14
3.7. Diseño metodológico	19
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
4.1. Caracterización de la ahuyama	20
4.2. Efecto del tiempo de exposición y potencia del ultrasonido en la pérdida de humedad por secado por microondas.	21
4.2.1. Cinética de secado	21
4.3. Efecto de la potencia del microondas en la pérdida de humedad de la ahuyama, con y sin pretratamiento de ultrasonido.	27
4.4. Determinación de los parámetros del modelo de transferencia de masa que predice el comportamiento del secado por microondas.....	31
4.4.1. Modelación matemática.....	31
5. CONCLUSIONES	34
6. RECOMENDACIONES.....	35
7. BIBLIOGRAFÍA	36

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Humedad libre en función del tiempo	8
Figura 2. Curva de velocidad de secado en función del contenido de humedad libre	8
Figura 3. Esquema de pérdida de humedad de la muestra	20
Figura 4. Potencia de microonda (500W) con y sin pretratamientos	24
Figura 5. potencia de microonda (400W) con y sin pretratamientos	25
Figura 6. potencia de microonda (300W) con y sin pretratamientos	26
Figura 7. perfil de secado de la Ahuyama (<i>Cucurbita maxima</i>)	28

Figura 8. Tratamientos totales	
30	
Figura 9. Tratamientos sometidos a potencias de microondas (300, 400 y 500 W)	
31	

LISTADO DE ANEXOS

Anexo A. Equipos utilizados en la caracterización de la ahuyama	
45	
Anexo B. Preparación de muestras y Equipos utilizados	
44	
Anexo C. Resultados tabla ANAVA	43
Anexo D. Diferencia en los tratamientos de ultrasonido y potencia	
46	

Anexo E. Datos de difusividad efectiva
47

RESUMEN

El objetivo de este proyecto fue el estudio del efecto del ultrasonido de potencia como pretratamiento del secado por microondas de ahuyama (*Cucurbita máxima*), variedad tipo pastelito. Inicialmente se seleccionaron las ahuyamas procedentes del Municipio de Montería, teniendo en cuenta criterios de homogeneidad como forma o tamaño, y fueran

de la misma especie y cultivo. Se tomaron muestras de tamaño 1x1x4 cm y un peso aproximado entre 4,5 y 5,5 g, estas muestras fueron sometidas a un pretratamiento con ultrasonido a dos potencias de 550 y 275W, con un tiempo de exposición de 10, 15 y 30 minutos. Al terminar el pretratamiento con ultrasonido las muestras fueron pesadas y luego secadas en un microondas. El procedimiento de secado fue realizado también a algunas muestras que no fueron sometidas a pretratamiento, estas muestras permiten comparar si había o no efecto significativo en el uso de ultrasonido de potencia.

Se determinó la difusividad efectiva utilizando el modelo matemático de la segunda Ley de Fick para cada corrida, estos valores estuvieron en el orden de 10^{-4} (m^2/s), aunque son valores altos, se encuentran en la literatura valores similares a otras investigaciones con uso de microondas como método de secado, debido a que el uso de microondas aumenta los valores de la difusividad efectiva. Los valores de ANAVA arrojaron que no había un efecto significativo en el uso de ultrasonido a los diferentes tiempos y potencias estudiados, esto debido a que, a altas temperaturas el efecto del ultrasonido encubre los efectos del ultrasonido, mientras que se presentó un efecto significativo en las diferentes potencias utilizadas en el microondas, observándose que a medida que aumenta la potencia del microondas aumenta también la difusividad efectiva, y por tanto aumenta la velocidad de secado.

Palabras clave: secado, microondas, ultrasonido, difusividad.

ABSTRACT

The objective of this project was the study of the effect of power ultrasound as pretreatment of the microwave drying of ahuyama (*Cucurbita maximum*), a pastelito type variety. Initially, the ahuyamas from the Municipality of Montería were selected, taking into account homogeneity criteria such as shape or size, and were of the same

species and crop. Samples of size 1x1x4 cm and an approximate weight between 4,5 and 5,5 g were taken, these samples were subjected to a pretreatment with ultrasound at two powers of 550 and 275 W, with an exposure time of 10, 15 and 30 minutes. At the end of the pretreatment with ultrasound, the samples were weighed and then dried in a microwave. The drying procedure was also performed on some samples that were not subjected to pretreatment, these samples allow to compare whether there was a significant effect on the use of power ultrasound.

The effective diffusivity was determined using the mathematical model of the second Law of Fick for each run, these values were in the order of 10^{-4} (m²/s), although they are high values, values similar to other investigations are found in the literature. with the use of microwaves as a drying method, because the use of microwaves increases the values of effective diffusivity. The values of ANAVA showed that there was no significant effect on the use of ultrasound at the different times and powers studied, this is due to the fact that, at high temperatures, the effect of ultrasound masks the effects of ultrasound, while a significant effect was presented in the different powers used in the microwave, observing that as the power of the microwave increases, the effective diffusivity also increases, and therefore the drying speed increases.

Key words: drying, microwave, ultrasound, diffusivity.

1. INTRODUCCIÓN

El sector agropecuario en Colombia representó para el año 2015 el 6,827% del producto interno bruto, siendo este de gran importancia para la seguridad alimentaria y fuente de empleos (Banco Mundial 2015). La producción nacional de ahuyama fue de 121.515 toneladas para el año 2014, y ha ido aumentando la producción en el país (Agronet 2014). Este fruto a pesar de tener un periodo alto de conservación de forma natural en comparación con otras frutas, termina deteriorándose después de 2 o 3 meses máximo si se encuentra en condiciones adecuadas, por lo que es necesario un método de conservación, para poder conservar la fruta por un tiempo mayor.

Para poder conservar las frutas o vegetales es necesario un procesamiento de estas. Un método de conservación utilizado para aumentar la vida útil de las frutas es el secado convencional, con el fin de disminuir la cantidad de agua de las frutas o vegetales, lo cual termina afectando la fruta, debido a la pérdida de nutrientes, volátiles y cambios de color, además del alto coste energético (Gamboa-Santos 2012), la ahuyama con aproximadamente 87% de humedad no es ajena a este tipo de cambios, por lo que requiere un proceso de conservación, para aumentar su vida útil y en lo posible no se vea afectado su valor nutricional.

El secado por microondas es una técnica más eficiente, uniforme y rápida que el secado convencional, las ondas pueden penetrar en el interior de alimento y ser absorbidas directamente por el agua, lo cual causa una evaporación rápida de está generándose un flujo de vapor hacia el exterior. El uso de microondas permite una interacción directa con el alimento, lo que hace que los costos de operación sean menores que con el secado convencional, debido a que la energía generada por las microondas se transforma en calor dentro del producto, y no en otras partes, por lo que las pérdidas de calor hacia los alrededores son menores. La reducción de los tiempos de secado evita el colapso estructural, gracias a la salida rápida de vapor, por lo que se presentará mejores características de rehidratación que con secado convencional. Otra ventaja es que disminuye el deterioro de color a nivel superficial, ya que las máximas temperaturas se producen en el centro de las piezas (Wais 2011).

Para evitar afectar mucho más las frutas con el proceso de secado, es recomendable el uso de pretratamientos para disminuir el tiempo de secado, pero este tipo de procedimientos si no se realizan adecuadamente puede tener un efecto contrario al deseado, aumentando la capacidad de absorción de agua de la fruta, por recalentamiento en el caso del escaldado. El tratamiento con ultrasonido es una alternativa menos agresiva, evitando las pérdidas de nutrientes de las frutas, inactivando enzimas, elimina microorganismos y favorece la posterior deshidratación de la fruta o vegetal (Robles-Ozuna et al 2012).

En este proyecto se estudió el efecto del ultrasonido de potencia como pretratamiento del secado por microondas de ahuyama (*Cucurbita máxima*) variedad tipo pastelito.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. GENERALIDADES DE LA AHUYAMA

Las ahuyamas son plantas anuales, herbáceas y más o menos trepadoras, de la familia de las cucurbitáceas. Botánicamente se distinguen tres especies: *Cucurbita maxima*, *Cucurbita moschata* y *Cucurbita pepo*. Estas tres especies se diferencian principalmente por la forma y dimensiones de sus frutos y de sus semillas. La *Cucurbita maxima* y *Cucurbita moschata* poseen un sistema radicular denso, con abundantes pelos. Los tallos son largos y de forma variable, cilíndrica o angulosa; su superficie también tiene pelos y están provistos de zarcillos (Quintero 2006).

El fruto de la ahuyama (*Cucurbita máxima*) es alargado u ovalado, acostillado y rugoso, con surcos más o menos profundos. La carne es dura, siendo su color blanco, amarillento o rosáceo, según la variedad. En la especie *Cucurbita moschata* el fruto es redondeado y la corteza dura, lisa y de color verde jaspeado. Es una especie muy apreciada por su carne, que forma hebras. Posee carne de color amarillo pálido (Quintero 2006).

2.1.1. Producción mundial y nacional

La superficie mundial dedicada al cultivo del Ahuyama ha venido incrementándose significativamente a lo largo de los últimos años, alcanzando en el año 2014 el total de hectáreas de 2.004.058, con una producción de 25.196.723 toneladas. Los productores más representativos fueron China con 7.241.409 toneladas, India 4.987.123 toneladas y Rusia 1.232.162 toneladas. En América el principal productor fue Estados Unidos con 863.460 toneladas, seguidos por México con 566.960 toneladas y Cuba con 499.820 toneladas (FAO 2014). La producción en Colombia ha ido en aumento pasando en 2007 el área cosechada de 3729 hectáreas a 8158 hectáreas en el año 2014. La región caribe se caracteriza por aportar cerca del 50% de la producción nacional. En el departamento de Córdoba la producción fue de 1.704 toneladas para 2014 y el principal municipio productor fue Montería con 1200 hectáreas equivalente al 70% de la producción de todo el departamento (Agronet 2014).

2.1.2. Usos de la ahuyama

La flor y el fruto de la ahuyama (*Cucurbita máxima*) se consumen como verdura; el fruto se conserva, en condiciones adecuadas de luz, temperatura y humedad o CNPT (condiciones normales de presión y temperatura) hasta seis meses en buenas condiciones. Es rica en betacaroteno y glucosa. También contiene cantidades significativas de ácido hialurónico, ácido pteroil-L-glutámico, cianopramina, dihidrocodeína, fenilalanina, retinol y riboflavina (vitamina B2). (Gerencia de investigación de mercados 2013). A pesar de tener un alto

periodo de conservación, si posee fisuras, magulladuras o no se conserva en las condiciones adecuadas puede deteriorarse muy rápidamente debido a su alto contenido de humedad, por lo que es recomendable someterla a un proceso de secado, para poder conservarlas en periodos más altos.

2.2. SECADO

2.2.1. Generalidades del secado

La deshidratación o secado consiste en la reducción del contenido acuoso, intentando disminuir o detener la proliferación microbiológica, así como la ocurrencia de reacciones de deterioro. Así, la deshidratación permite prolongar la vida útil de alimentos, al mismo tiempo que ofrece la posibilidad de desarrollar nuevos productos de acuerdo con la tecnología utilizada y/o componentes agregados. Los alimentos deshidratados reúnen ciertas ventajas técnicas y económicas sobre los frescos además de una mayor vida útil (y consecuente disponibilidad durante todo el año), por ejemplo, tienen menor peso (ventaja que permitiría reducir los costos de envasado y logística), son fácilmente incorporables a procesos productivos automatizados y definitivamente, ofrecen mayor diversidad y flexibilidad en el desarrollo de nuevos productos (Wais 2011). Las técnicas para el proceso de secado son variadas, desde el secado solar que aprovecha las condiciones naturales, el secado convectivo y técnicas más sofisticadas como el uso de microondas. Pero el secado solar depende de las condiciones ambientales y tarda mucho tiempo y técnicas como el secado convectivo según Seyoum et al 2011 puede afectar el valor nutritivo y sensorial de los alimentos debido a largos periodos de exposición de aire a temperaturas altas. Pero el

secado por microondas en frutas y verduras, debido a su alta eficiencia de la temperatura y un tiempo de secado más corto, muestran una mejor calidad del producto en comparación con el secado convectivo.

2.2.4. Microondas

La tecnología de las microondas estriba en la respuesta de las moléculas polares del material frente a un campo magnético variable, que rotan y se desplazan lateralmente millones de veces por segundo tratando de alinearse con las líneas de fuerza del campo. Esta interacción genera calor en el material y se inicia el proceso de deshidratación a velocidades muy superiores a las obtenidas en los métodos tradicionales de secado (Wais 2011). De acuerdo a Orsat et al 2006, el uso de microondas contrae varias ventajas que van desde un menor tiempo de secado hasta una temperatura más baja. El uso de combinado de microondas con otras técnicas como el secado convectivo, vacío y secado osmótico se realiza con el fin de optimizar el proceso. De la experiencia con el uso de microondas se concluye que el uso de microondas aporta ciertas características como son aumento de la velocidad de secado, calidad del producto final y mejora del consumo de energía. En la actualidad, se están implementando diversas aplicaciones a nivel industrial para secado de pasta, de alimentos fluidos viscosos, horneado, concentración, precocción y cocción, pasteurización e inactivación enzimática (escaldado o blanqueado) (Wais 2011). Según Abou 2008 la velocidad de secado aumenta a medida que la potencia también lo hace. La velocidad solo cambia cuando la forma de la muestra variaba, es decir el grosor y la forma de la muestra son factores que influyen en la tasa de secado. Además, la velocidad de secado con microondas es mayor a la velocidad de secado utilizando otras técnicas. Sin

embargo, la deshidratación de alimentos no es utilizada tan extensamente como se pretendería, ya que la eliminación de agua de la estructura tiene asociados ciertos cambios que comprometen la calidad. Esto se debe a que los procesos más comunes de secado están diseñados a partir de las altas temperaturas y/o largos tiempos de secado (Wais 2011). Una forma de disminuir efectos negativos del secado es aplicando pretratamiento, que preparan al alimento. Un pretratamiento novedoso que casi no afecta la calidad del alimento es el ultrasonido de potencia.

2.2.2. Ultrasonido

Es el nombre que reciben las ondas de sonido con frecuencias mayores a aquellas que pueden ser detectadas por el oído humano. El ultrasonido maneja ondas con frecuencias entre 16 KHz y 20 MHz, las cuales al ser aplicadas pueden llegar hasta 5 MHz en gases o hasta 500 MHz en líquidos y sólidos (Delgado 2012).

2.2.3. Ultrasonido de potencia (18-100 KHz)

Son señales de alta intensidad que se utilizan para modificar un proceso o un producto. Con una frecuencia más baja y mayor potencia producen cambios físicos y químicos en el medio a través de la generación y subsiguiente colapso de burbujas de cavitación, las cuales aparecen, crecen y colapsan dentro del líquido. Esto ocurre asimétricamente cerca de las interfaces y golpes sobre la superficie sólida. Se requiere de un medio líquido, un generador de energía y un transductor, el cual convierte energía eléctrica, magnética o cinética en energía acústica (Azuola y Vargas 2007). De acuerdo a Parada et al 2012, las

variables que más influyen la velocidad de pérdida de agua son la potencia y temperatura del aire, lográndose una mayor velocidad de secado con una potencia más alta aplicada al ultrasonido, mayor temperatura del aire utilizado en el secado convectivo y el mayor tiempo de exposición. Pakbin et al 2014, demostró que la difusividad efectiva del agua aumenta después de la aplicación de ultrasonido, lo cual causa una reducción aproximada del 16% en el tiempo de secado. Además, estimaron que luego de una exposición de 20 minutos al ultrasonido, la difusividad efectiva del agua aumenta a aproximadamente 28,8% debido a la formación de microcanales durante la aplicación de ultrasonidos en la estructura del material. Resultados parecidos fueron obtenidos por Fernandes et al (2008).

El ultrasonido de potencia es utilizado como un pretratamiento para acondicionar el alimento, más adelante a un proceso de secado como el uso de microondas la cual es una tecnología muy eficiente. Para entender el comportamiento del secado con microondas se hace necesario estudiar las curvas de velocidad de secado generadas por la pérdida de humedad de los alimentos y analizar su comportamiento.

2.2.5. Curvas de velocidad de secado

No es posible predecir el contenido de humedad de equilibrio de diversos materiales, por lo que es necesario determinarlo por vías experimentales. De la misma manera, puesto que el conocimiento de los mecanismos básicos de las velocidades de secado es bastante incompleto, en muchos casos es indispensable obtener algunas mediciones experimentales de las velocidades de secado (Geankoplis 1998).

A partir de la pérdida de humedad por parte del material se pueden trazar graficas con el siguiente comportamiento:

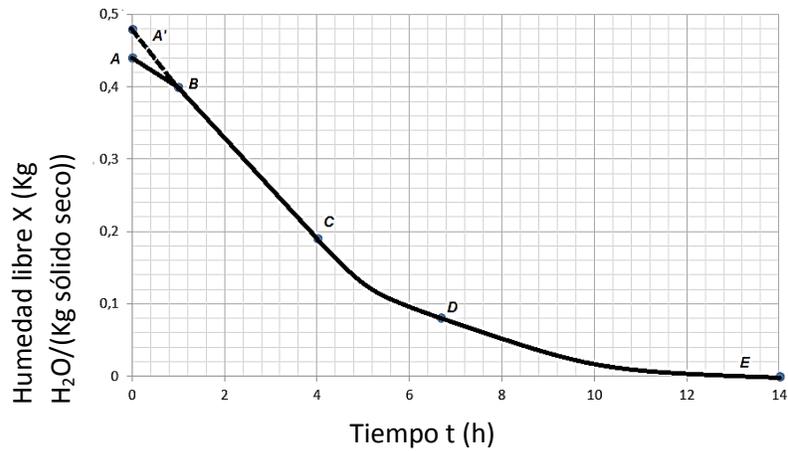


Figura 1. Geankoplis 1998. Humedad libre en función del tiempo.

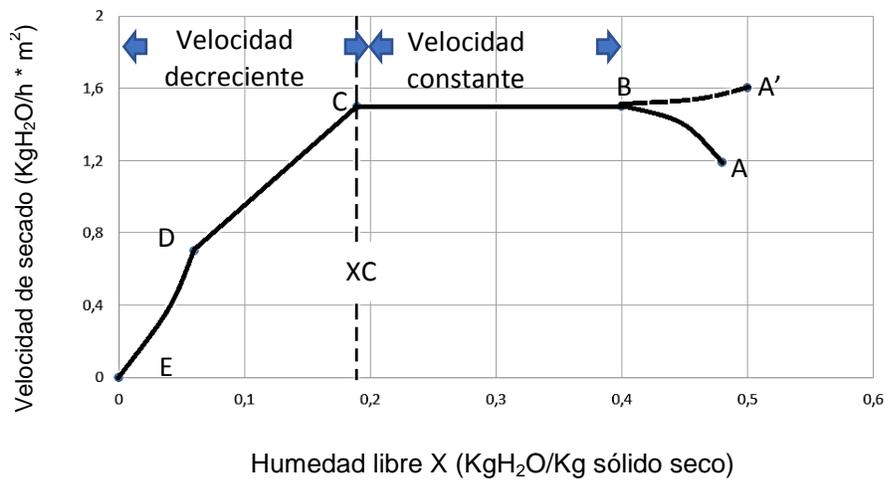


Figura 2. Geankoplis 1998. Curva de velocidad de secado en función del contenido de humedad libre.

En la figura 2 se muestra la curva de velocidad de secado para condiciones de secado constante. Empezando en el tiempo cero, el contenido inicial de humedad libre corresponde al punto A. Al principio, el sólido suele estar a una temperatura inferior de la que tendrá al final, y la velocidad de evaporación va en aumento. Al llegar al punto B, la temperatura de la superficie alcanza su valor de equilibrio. Por otra parte, si el sólido está bastante caliente al principiar la operación, la velocidad de secado puede iniciarse en un punto A'. Este periodo inicial de ajuste en estado no estacionario suele ser bastante corto y por lo general se pasa por alto en el análisis de los tiempos de secado.

La curva de la figura 1 es recta entre los puntos B y C, por lo que la pendiente y la velocidad son constantes durante este periodo. Este periodo de velocidad constante de secado corresponde a la línea BC en la Figura 2.

En el punto C de ambas figuras, la velocidad de secado comienza a disminuir en el periodo de velocidad decreciente, hasta llegar al punto D. En este primer periodo de velocidad decreciente, la velocidad corresponde a la línea CD en la Figura 2, y por lo general es lineal.

En el punto D la velocidad de secado disminuye con más rapidez aún, hasta que llega al punto E, donde el contenido de humedad de equilibrio es X^* (Geankoplis 1998). Para determinar el comportamiento de la cinética de secado se necesita de modelos matemáticos que describan el comportamiento de estas.

2.3. MODELO MATEMATICO DE PÉRDIDA DE AGUA

La segunda ley de Fick predice cómo la concentración de una especie cambia con el tiempo, debido a su difusión en algún medio. La segunda ley de Fick es la ecuación diferencial parcial que expresa la conservación o balance de masa. Donde se considera una región Ω en el espacio con superficie frontera S . El grado de cambio de la masa total de la especie encerrada en Ω , debe ser igual al flujo entrando por la frontera S más el grado de generación en la región (Juárez 2015). La segunda Ley de Fick puede ser utilizada para diferentes operaciones como es el secado de alimentos, para la determinación del coeficiente de difusividad efectiva en alimentos con formas geométricas características, tomando en consideración las condiciones del medio, tanto para la pérdida de agua como para la ganancia de sólidos (Honorato et al 2005).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \frac{\partial^2 M}{\partial n^2} \quad (1)$$

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Obtención de la materia prima

La ahuyama (*Cucurbita maxima*) empleada para la obtención de la pulpa a evaluar en el presente estudio se tomó de los cultivos procedentes del municipio de Montería, departamento de Córdoba - Colombia.

3.2. Caracterización de la ahuyama

Se realizó la caracterización de la ahuyama (*Cucurbita maxima*) empleando las técnicas de análisis proximal descritas a continuación: humedad (930.46 de la A.O.A.C. adaptado), cenizas (942.05/90 de la A.O.A.C. adaptado), proteína cruda (955.04/90 de la A.O.A.C

adaptado), extracto etéreo (920.39/30 de la A.O.A.C. adaptado), fibra bruta (962.09/90 de la A.O.A.C. adaptado) (Ver Anexo A).

3.3. Preparación de muestras

3.3.1. Clasificación, lavado y desinfección de la ahuyama.

Se escogieron las ahuyamas (*Cucurbita maxima*) representativas, que tenían características homogéneas en cuanto a tamaño, y forma, las frutas se sometieron a un proceso de lavado por inmersión en solución de hipoclorito de sodio a 100 ppm durante un tiempo de 5 a 10 minutos a 32 °C, posteriormente se enjuagaron con abundante agua potable.

3.3.2. Obtención y preparación de la muestra

La muestra de ahuyamas se extrajo con una máquina de acción manual, consiguiendo pulpa en forma rectangular de 4 cm de largo, 1 cm de ancho y 1 cm de espesor, obteniendo muestras con pesos de 4,5 a 5,5 g aproximadamente. (Ver anexo B).

Luego las muestras eran pesadas, esto se realizó con las 8 muestras para cada tratamiento, una vez pesada cada muestra, se colocaron dentro de los beaker de 600 mL.

3.4. Adecuación de la muestra

Para el acondicionamiento se utilizó un equipo de ultrasonido marca Elma con una potencia y frecuencia máxima de 550 W y 45 KHz respectivamente. La muestra inicialmente fue sometida a condiciones de temperatura ambiente de 27°C, frecuencia constante de 45 KHz y potencia de 550 y 275 W por 10, 15 y 30 minutos, luego de finalizado el tratamiento con ultrasonido las muestras fueron pesadas, para obtener la pérdida de peso de estas.

Finalizado el pretratamiento con ultrasonido se colocaron cada muestra dentro de una bolsa impermeable a la humedad y resellable, para evitar la pérdida de humedad, por la temperatura ambiente antes de iniciar el secado por microondas.

3.5. Procedimiento para el secado

Las muestras pretratadas con ultrasonido y las muestras control se secaron utilizando un horno microondas de marca Haceb HMM111JSS con una frecuencia de 2450 MHz y dimensiones internas de 350x373x228 mm. Se tomaron muestras entre 4,5 y 5,5 g, colocándose en la parte central del plato y se sometieron a las potencias de 300, 400 y 500 W. Las masas de las muestras durante el secado se pesaron en una balanza analítica (Adventure con exactitud + 0,01 g) cada 25 segundos, hasta completar 200 segundos, esto se realizó con 8 muestras, descartando cada muestra una vez pesada.

3.6. Modelación matemática de las curvas de cinética de secado

Para la construcción de las curvas de secado se graficó el contenido de humedad del producto en base seca (MS) contra el tiempo. La razón de humedad (MR) durante el secado se calculó usando la ecuación 2.

$$MR = \frac{(M - M_e)}{(M_o - M_e)} \quad (2)$$

Donde M es el contenido de humedad en un tiempo específico, Me es el contenido de humedad de equilibrio y Mo es el contenido inicial de humedad, todas expresadas en g agua g⁻¹ materia seca.

Para determinar las variables que mejor describe el comportamiento del secado de la ahuyama se utilizó la segunda Ley de Fick, para las coordenadas x, y, z.

Coordenada x:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (3)$$

Condiciones de frontera:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial M(0,t)}{\partial x} = 0 \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -D * \frac{\partial M(L,t)}{\partial x} = h_m [M(L,t) - M_e] \end{array} \right. \quad (5)$$

Y con la condición inicial:

$$M(x, 0) = M_o \quad (6)$$

Coordenada y:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \quad (7)$$

Condiciones de frontera:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial M(0,t)}{\partial y} = 0 \end{array} \right. \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -D * \frac{\partial M(L,t)}{\partial y} = h_m [M(L,t) - M_e] \end{array} \right. \quad (9)$$

Y con la condición inicial:

$$M(y, 0) = M_o \quad (10)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \quad (11)$$

Coordenada z:

Condiciones de frontera:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial M(0,t)}{\partial z} = 0 \end{array} \right. \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -D * \frac{\partial M(L,t)}{\partial z} = h_m [M(L,t) - M_e] \end{array} \right. \quad (13)$$

Y con la condición inicial:

$$M(z, 0) = M_o \quad (14)$$

Donde D es la difusividad efectiva de la humedad, L es la mitad del espesor de la placa, h_m es el coeficiente convectivo de transferencia de masa, $M(0,t)$ es la concentración de agua (g agua/g de sólidos) en el centro en un cierto tiempo, $M(L, t)$ es la concentración de agua (g agua/g de sólidos) en la superficie en un cierto tiempo, M_0 es la concentración de agua inicial en el sólido, M_e es la concentración de agua en equilibrio.

La solución analítica a este problema ((Luikov, 1968) se puede expresar en términos de la expansión infinita

$$\frac{M(n, t) - M_e}{M_0 - M_e} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin^2 \mu_n}{\mu_n (\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n)} \cos\left(\mu_n \frac{x}{l}\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{D}{l^2} t\right) \quad (15)$$

El promedio espacial $\bar{M}(t)$ de la distribución espacio-temporal de humedad $M(x,t)$ es:

$$\bar{M}(t) = \frac{1}{l} \int_0^l M(n, t) dn \quad (16)$$

Aplicando la ecuación 16 en 15, tenemos:

$$\Phi(Fo) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin^2 \mu_n}{\mu_n (\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n)} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{D}{l^2} t\right) \quad (17)$$

Donde $\Phi = (M - M_e)/(M_0 - M_e)$, μ_n = son las raíces positivas, en orden creciente de la ecuación $\mu_n \tan \mu_n = (h_m l)/D$, D : el coeficiente efectivo de difusividad de agua (m^2/s), t : el tiempo (segundos), l : el espesor medio de la lámina finita (m).

La muestra cubica en forma rectangular fue colocada en el plato giratorio del horno microondas, por lo que la transferencia de masa se da en las partes expuestas, por tanto, se supone que en la parte inferior no hay transferencia de masa, como se observa en la figura 3.

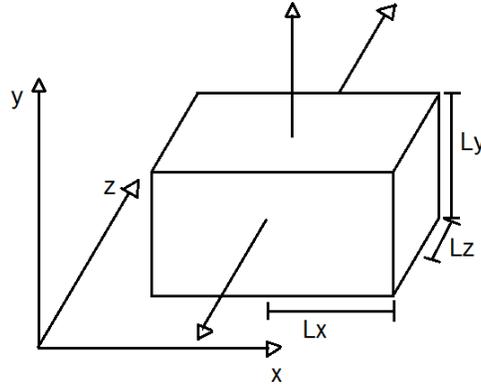


Figura 3. Esquema de pérdida de humedad de la muestra.

De acuerdo a las caras por donde se da la transferencia de masa, se obtienen las ecuaciones.

$$\frac{\bar{C}_x(t) - C_e}{C_i - C_e} = \frac{2 \sin^2 \mu_1}{\mu_1 [\mu_1 + \sin \mu_1 \cos \mu_1]} e^{\frac{-\mu_1^2 D t}{L_x^2}} \quad (18)$$

$$\frac{\bar{C}_y(t) - C_e}{C_i - C_e} = \frac{2 \sin^2 \mu_1}{\mu_1 [\mu_1 + \sin \mu_1 \cos \mu_1]} e^{\frac{-\mu_1^2 D t}{L_y^2}} \quad (19)$$

$$\frac{\bar{C}_z(t) - C_e}{C_i - C_e} = \frac{2 \sin^2 \mu_1}{\mu_1 [\mu_1 + \sin \mu_1 \cos \mu_1]} e^{\frac{-\mu_1^2 D t}{L_z^2}} \quad (20)$$

Sumando las ecuaciones 4 a 6 y obtenemos:

$$\frac{\bar{C}(t) - C_e}{C_i - C_e} = \left(\frac{\bar{C}_x(t) - C_e}{C_i - C_e} \right) \left(\frac{\bar{C}_y(t) - C_e}{C_i - C_e} \right) \left(\frac{\bar{C}_z(t) - C_e}{C_i - C_e} \right)$$

$$\frac{\bar{C}(t) - C_e}{C_i - C_e} = \left[\frac{2 \sin^2 \mu_1}{\mu_1 [\mu_1 + \sin \mu_1 \cos \mu_1]} \right]^3 e^{-(\mu_1^2 D) \left(\frac{1}{L_x^2 + L_y^2 + L_z^2} \right) t} \quad (21)$$

Se utilizó regresión no lineal para estimar las constantes de los modelos. La suma de cuadrados del error (SSE) y el coeficiente de determinación (R^2) se estimaron para evaluar la falta de ajuste de los modelos. Bajos valores de SSE y altos de R^2 se tomaron como criterio para indicar el ajuste del modelo.

3.7. Diseño metodológico

Se realizó un acondicionamiento inicial aplicando dos potencias de ultrasonido (275 y 550W) y tres tiempos diferentes (10, 15 y 30 min) a las muestras de ahuyama con medidas de 1x1x4cm. Se utilizó muestras control a las que no se le aplicó ultrasonido. Las muestras con y sin pretratamiento fueron sometidas a tres potencias de microondas (300, 400 y 500 W) cada 25 segundos hasta los 200 segundos de proceso.

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial 3x7. Los factores son potencia de microondas (300, 400 y 500 W) e Intensidad de Ultrasonido por tiempo (275Wx10min, 275Wx15min, 275Wx30min, 550Wx10min, 550Wx15min, 550Wx30min, y 0W0min). Los datos se analizaron mediante ANOVA, test de medias con

prueba de Fisher, regresiones no lineales, con nivel de significancia del 5%. Los análisis estadísticos fueron realizados utilizando el programa estadístico Statgraphics Centurion XVI, Versión 16.0.07, (versión prueba).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización de la ahuyama

La composición se determinó por triplicado presentando la siguiente composición: humedad 84,53 %, cenizas 1,378 %, grasa cruda 0,26 %, proteína 1,378 %, fibra bruta 1,2 %. Estos resultados muestran similitud con otros estudios de la composición de ahuyama (*Cucurbita maxima*) realizados por Madera et al (2017), donde se encontró un contenido de humedad del 88,5 %, fibra 1,1 %, proteína 0,9 %, grasa 0,4 % y cenizas 0,9 %. Siendo los más parecidos el contenido de humedad y fibra. La diferencia en los otros componentes puede ser debido a que los valores de la composición de frutos y vegetales suelen variar ligeramente de acuerdo a la calidad del suelo, si se usa o no riego, entre otros.

4.2. Efecto del tiempo de exposición y potencia del ultrasonido en la pérdida de humedad por secado por microondas.

4.2.1. Cinética de secado

No se encontró diferencia significativa en los resultados con y sin pretratamiento de ultrasonido a las diferentes potencias y exposiciones de tiempo estudiadas, esto se observa en la tabla ANAVA (Ver anexo C), donde la variable de ultrasonido tuvo un valor-p de 26,92%, por lo tanto, no hubo diferencia significativa debido a que el valor-p de la tabla ANAVA no fue menor a 5%, para que existiera diferencias en los tratamientos con ultrasonido. En las Figuras del 4 al 6 se puede corroborar este comportamiento.

Tabla 1. Nomenclatura de tratamientos figura 4.

Tratamiento	Potencia ultrasonido (W)	Tiempo ultrasonido (min)
T1	275	10
T2	275	15
T3	275	30
T4	550	10
T5	550	15
T6	550	30
T7	0	0

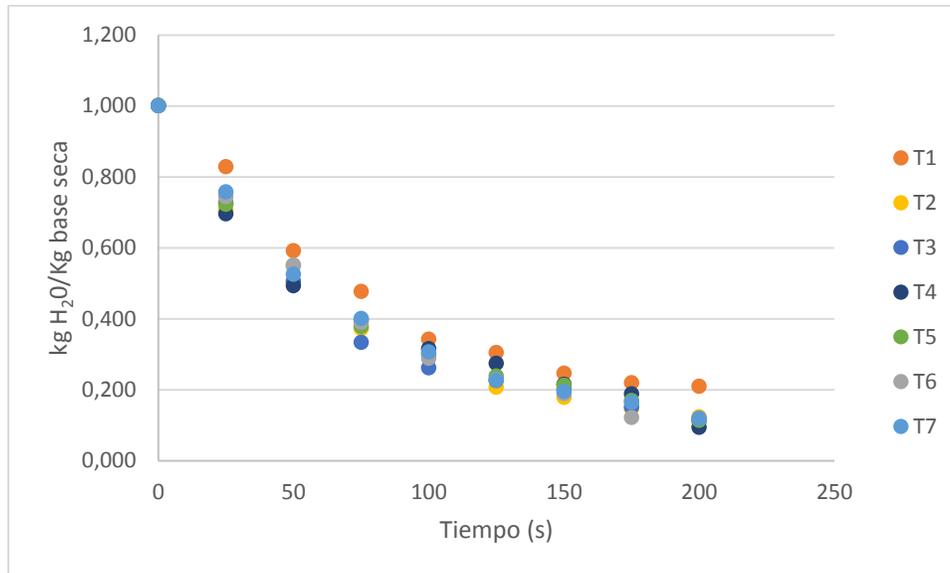


Figura 4. Potencia de microonda (500W) con y sin pretratamientos.

En la Figura 4 se corrobora los resultados de la tabla ANAVA que no existe diferencia significativa en los diferentes tratamientos con y sin ultrasonido y potencia de 500 W. Los resultados de pérdida de humedad al completarse los 200 segundos se encuentran en el rango de 0,093 y 0,12 (g agua/g base seca). Donde el tratamiento con una potencia de ultrasonido de 550 W a una exposición de 30 minutos, presenta un comportamiento muy similar a la muestra que no fue sometida a ultrasonido. La muestra que se le aplicó un pretratamiento de 275 W por 10 minutos fue la única que tuvo un comportamiento fuera del rango de humedad de las otras muestras al finalizar los 200 segundos. Observando un comportamiento aleatorio, sin ninguna diferencia entre los diferentes tratamientos.

Tabla 2. Nomenclatura de tratamientos figura 5.

Tratamiento	Potencia ultrasonido (W)	Tiempo ultrasonido (min)
T1	275	10
T2	275	15
T3	275	30
T4	550	10
T5	550	15
T6	550	30
T7	0	0

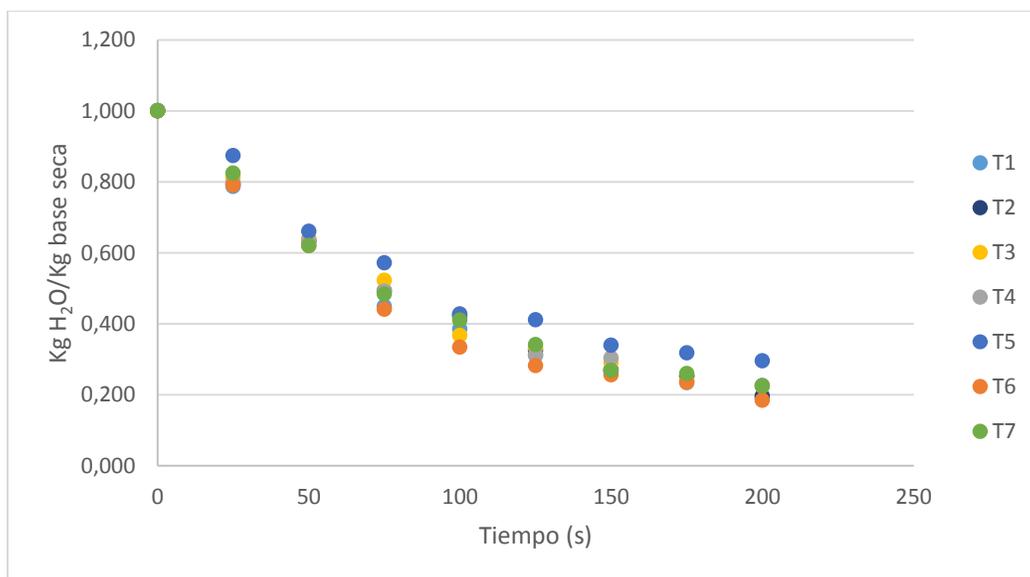


Figura 5. potencia de microonda (400W) con y sin pretratamientos.

En la Figura 5 se corrobora que no hubo diferencia significativa entre los diferentes tratamientos, como se observó en los resultados obtenidos por la tabla ANAVA. Pasado los 200 segundos la pérdida de humedad para la mayor parte de los tratamientos estuvo entre 0,18 y 0,22 (g agua/g base seca). El tratamiento con potencia de ultrasonido de 550 W por 30 minutos, presentó un comportamiento similar al tratamiento con potencia de 275 W y 10 minutos exposición. El único tratamiento que presentó un resultado un poco diferente, fue el de potencia de ultrasonido a 550 W por 15 minutos. Observándose así resultados sin un orden específico, sin ninguna diferencia entre los tratamientos aplicados.

Tabla 3. Nomenclatura de tratamientos figura 6.

Tratamiento	Potencia ultrasonido (W)	Tiempo ultrasonido (min)
T1	275	10
T2	275	15
T3	275	30
T4	550	10
T5	550	15
T6	550	30
T7	0	0

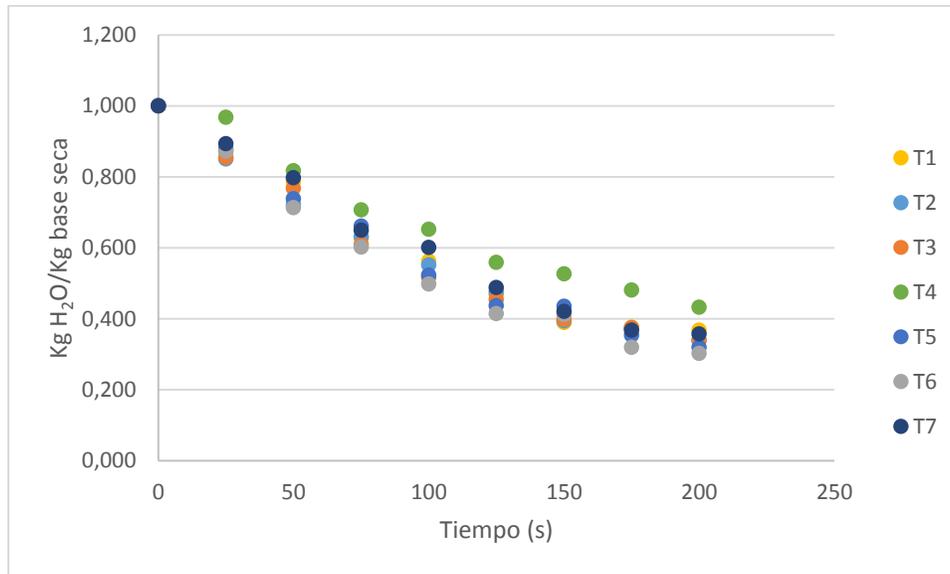


Figura 6. potencia de microonda (300W) con y sin pretratamientos.

En la figura 6 también se comprueba los resultados arrojados por la tabla ANAVA, se observa que a los 200 segundos los diferentes tratamientos no tuvieron una diferencia significativa. El comportamiento de los tratamientos fue aleatorio donde el tratamiento que recibió un pretratamiento con ultrasonido con potencia de 275 W y tiempo de exposición de 10 minutos tuvo una menor pérdida de humedad con respecto al tratamiento que recibió un pretratamiento con ultrasonido al 550 W y 30 minutos de exposición. Pero el tratamiento que no se le aplicó pretratamiento presentó un comportamiento intermedio entre los dos tratamientos anteriores. Los resultados de las Figuras 4 a 6 pueden observarse detalladamente en el Anexo D, donde los resultados de los diferentes tratamientos sometidos a ultrasonido se encuentran acumulados en un mismo rango, por lo que no presentan diferencias significativas con el que no fue sometido a ultrasonido, a diferencia de la potencia de microondas que si presentó diferencia significativa.

De acuerdo a investigaciones relacionadas realizadas por Rodríguez et al 2014, en manzana se observan un comportamiento similar, donde utilizaron una muestra sin aplicación de ultrasonido como muestra control y dos pretratamientos con ultrasonido a distintas potencias (18,5 y 30,8 kW/m³) para el secado con aire a tres temperaturas diferentes (30, 50 y 70°C), encontraron que a medida que aumenta la temperatura el efecto del ultrasonido iba disminuyendo hasta que no se encontraba diferencia significativa con el uso de ultrasonido, como se evidencio en este trabajo, donde no hubo diferencia entre los tratamientos con y sin ultrasonido. En otras investigaciones aplicando ultrasonido de potencia como pretratamiento del secado con aire caliente en zanahorias por García-Pérez et al 2006, se observaron los mismos resultados a medida que aumentaba la temperatura del aire el efecto del ultrasonido era menor hasta que dejaba de ser significativo con una temperatura mayor. Esto es debido a que se ha observado que la influencia del ultrasonido de potencia es más importante a temperaturas de secado moderadas (<40°C), que a temperaturas más elevadas (>60°). Esto se puede atribuir a que, a altas temperaturas, la gran disponibilidad de energía térmica en el sistema enmascara los efectos producidos por los ultrasonidos. Éstos sí se observan a menores temperaturas ya que, en esas condiciones, la energía térmica disponible es menor (García-Pérez et al., 2006; Rodríguez et al., 2014; Sabarez et al., 2012; Santacatalina 2015). No solo las altas temperaturas enmascaran el efecto del ultrasonido, sino que además producen el encogimiento de las muestras cerrando los microcanales formados por el ultrasonido, en parte por la pérdida de humedad, la disposición de la fruta al encogimiento y debido al pequeño tamaño de las muestras. El encogimiento se produce hasta el núcleo húmedo e incompresible. A medida que avanza el secado, las células de las capas superficiales se aplastan cada vez más (Rodrigues y Fernández 2007). Este comportamiento es registrado en otros estudios de secado con ahuyama de la variedad

Cucurbita maxima (Ortiz 2014), la cual sufrió encogimiento al ser secado mediante el método de ventana refractaria.



Figura 7. Perfil de secado de la Ahuyama (*Cucurbita maxima*) a una potencia de secado por microondas a 400 W

4.3. Efecto de la potencia del microondas en la pérdida de humedad de la ahuyama, con y sin pretratamiento de ultrasonido.

Los tratamientos sometidos a las diferentes potencias de microonda presentan diferencia significativa debido a que el p-valor de la tabla ANAVA es menor al 5 %. A medida que aumenta la potencia de 300 a 500 W hay una mayor pérdida de humedad.

En la Figura 8 se puede observar la diferencia entre los distintos tratamientos de potencia de microonda, donde la potencia menor de (300 W), tiene una menor pérdida de humedad, con respecto a la de mayor potencia (500 W).

Tabla 4. Nomenclatura de tratamientos figura 8.

Tratamiento	Potencia ultrasonido (W)	Tiempo ultrasonido (min)	Potencia microondas (W)
T1	275	10	500
T2	275	15	500
T3	275	30	500
T4	550	10	500
T5	550	15	500
T6	550	30	500
T7	0	0	500
T8	275	10	400
T9	275	15	400
T10	275	30	400
T11	550	10	400
T12	550	15	400
T13	550	30	400
T14	0	0	400
T15	275	10	300
T16	275	15	300
T17	275	30	300
T18	550	10	300
T19	550	15	300
T20	550	30	300
T21	0	0	300

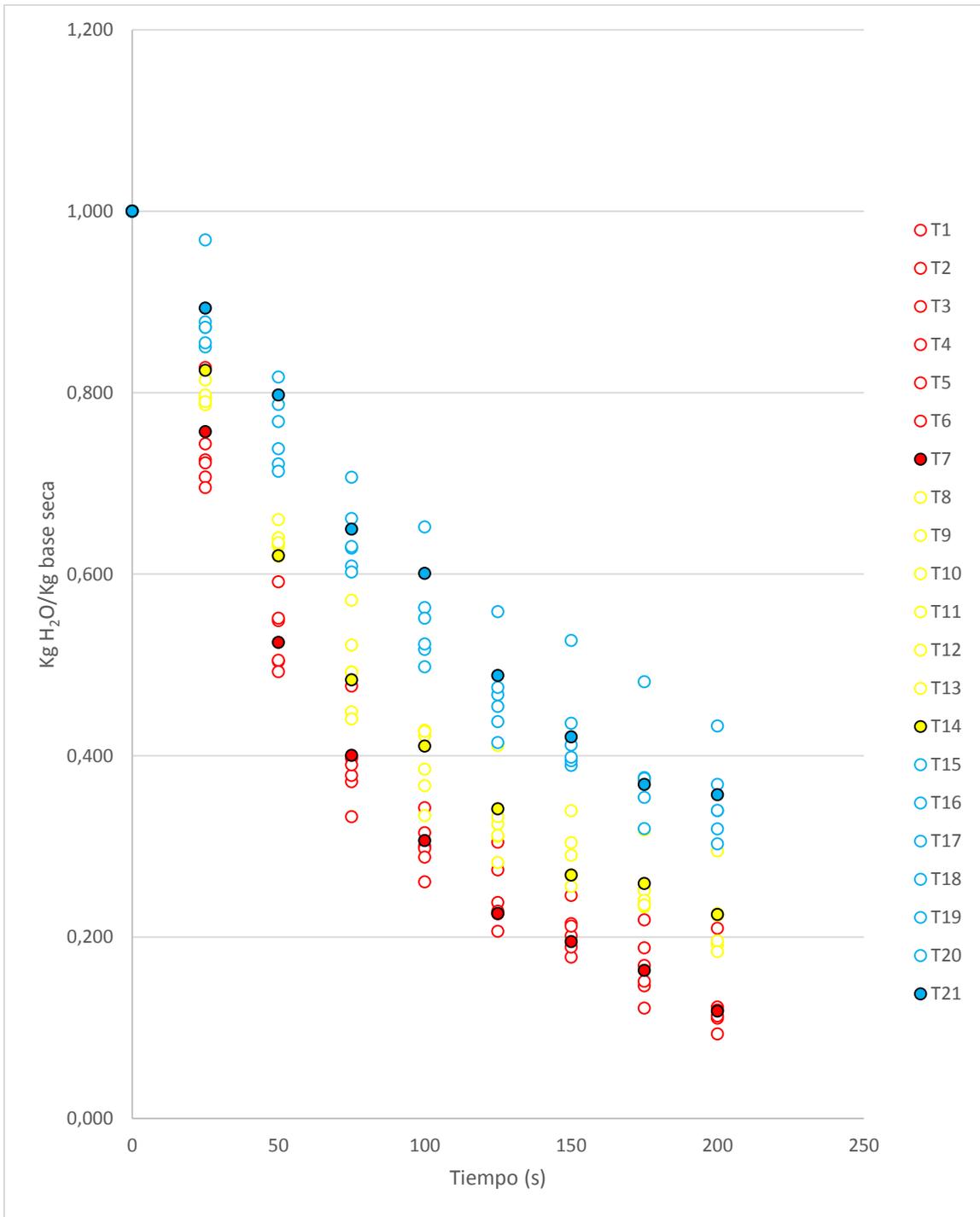


Figura 8. Tratamientos totales.

Una mayor pérdida de humedad está relacionada con una mayor potencia de microondas, esta tendencia se puede observar en todos los tratamientos realizados, de acuerdo a la Figura 8, donde los tratamientos con una potencia de microondas de 500 W representados de color rojo, presentaron una mayor pérdida de humedad que las otras potencias de microondas de menor intensidad. La potencia de microondas de 300 W tuvo una pérdida de humedad menor a la de 500 W representada con color azul en la gráfica, y la potencia de microondas de 400W, con una tendencia central entre las potencias de 500 y 300 W. Esto se puede observar más claramente en la Figura 9, donde se muestra diferencia significativa arrojados por el test de Medias, con un nivel de confianza del 95 %, entre los diferentes tratamientos sometidos a las distintas potencias de microondas, graficando la difusividad efectiva del agua con respecto a la potencia del microondas.

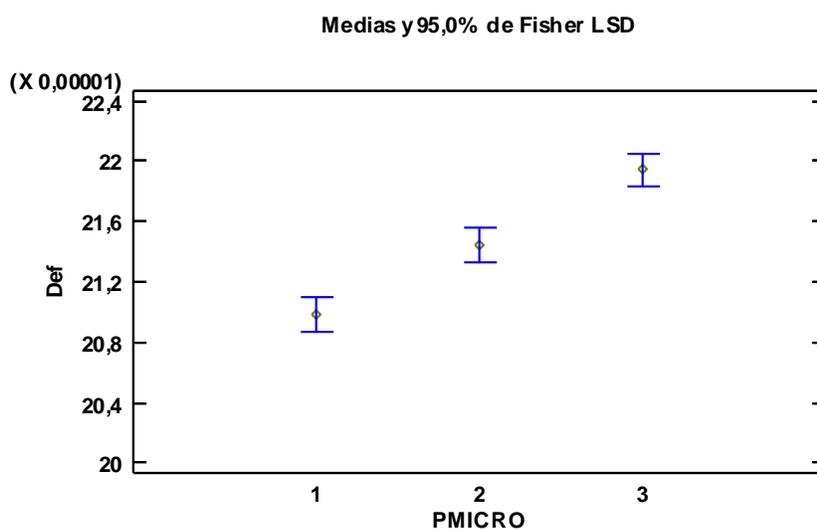


Figura 9. Tratamientos sometidos a potencias de microondas (300, 400 y 500 W)

Los resultados obtenidos eran los esperados, donde a medida que se aumentaba la potencia del microondas también tenía que hacerlo la pérdida de humedad y la difusividad efectiva. Estudios similares realizados con microondas en ñame a diferentes potencias (García et al 2016) muestran comportamientos parecidos, donde al aumentar la potencia del microondas en tres niveles (420, 560 y 700W) en una muestra de ñame, aumenta la pérdida de humedad y la difusividad de la misma. Otras investigaciones realizadas con microondas y diferentes potencias obtuvieron los mismos resultados a medida que aumenta la potencia, aumenta la pérdida de humedad en el secado de manzanas (Abou 2008). En el uso de microondas asistido por ventilación de aire para el secado de tomate, se encontró una reducción del tiempo de secado en un 84% a medida que se aumentaba la potencia del microondas (Seyoum et al 2011).

4.4. Determinación de los parámetros del modelo de transferencia de masa que predice el comportamiento del secado por microondas.

4.4.1. Modelación matemática

Con el modelo fenomenológico de la segunda Ley de Fick se describe la curva de secado de las muestras de ahuyama, a los diferentes pretratamientos y potencias de microondas (500, 400 y 300W), con valores de R^2 superior a 0,97. El coeficiente de difusividad efectiva se calculó directamente del modelo teórico de la segunda Ley de Fick para una geometría de lámina infinita y distribución uniforme de la humedad inicial.

Con la ecuación 21, mediante regresión no lineal utilizando el programa MatLab R2014a versión 8.3.0.532 (versión de prueba), se determinó los parámetros de μ (raíces positivas, en orden creciente de la ecuación $\mu_n \tan \mu_n = (h_m l)/D$) y D (Difusividad efectiva), del modelo teórico de la segunda Ley de Fick con $R^2 > 0.97$ y $0.01 < SSE < 0.05$, mayoritariamente, se demostró que es adecuado para describir la cinética del secado de las muestras de ahuyama. En la tabla 2 se observa que con el aumento de la potencia de microondas, los valores de D aumentan, por tanto para una potencia de 300W, los valores de difusividad efectiva fueron menores a los valores de 400 o 500W, describiendo unas curvas con una mayor velocidad de secado.

Tabla 2. Difusividad efectiva de las potencias de microondas

Potencia W (Microondas)	Difusividad (m²/s)
300	$2,0920 \times 10^{-4} \pm 6,00889 \times 10^{-7}$
400	$2,1331 \times 10^{-4} \pm 1,83556 \times 10^{-6}$
500	$2,2013 \times 10^{-4} \pm 4,59111 \times 10^{-6}$

Aunque los valores de difusividad obtenidos son altos, estudios similares realizados con microondas en ñame a diferentes potencias (García et al 2016) muestran un comportamiento parecido, donde los valores de la difusividad efectiva fueron del mismo orden de 10^{-4} . Debido a que los valores de difusividad aumentan al incrementar la potencia de microondas. Esto podría explicarse por el aumento de la energía de calentamiento, lo que aumentaría la actividad de las moléculas de agua lo que conduciría a una mayor

difusividad de la humedad cuando las muestras se secan a mayor potencia de microondas (Zarein et al., 2015). Además, la difusividad varía conforme las condiciones de secado (temperatura y velocidad del aire), no es intrínseca al material, por lo que a mayores temperaturas mayores son las velocidades de secado, de esta manera, el aumento de la temperatura favorece la transferencia de masa y como consecuencia el aumento de la difusividad efectiva (Giraldo-Zuñiga et al 2010).

5. CONCLUSIONES

- La composición fisicoquímica de la ahuyama (*Cucurbita maxima*), procedente del municipio de Montería, Córdoba, es humedad 84,53%, cenizas 1,378%, grasa cruda 0,26%, proteína 1,378%, fibra bruta 1,2%, la cual tuvo similitud a otras investigaciones como la de Madera et al 2017.
- El uso de ultrasonido como pretratamiento del secado por microondas, no es necesario con las condiciones tomadas en este estudio.
- A medida que aumenta la potencia del microondas lo hace también la pérdida de humedad y la difusividad efectiva.
- Mediante el modelo matemático de la segunda Ley Fick se determinaron los valores de difusividad efectiva, los cuales aumentan significativamente a medida que aumenta la potencia del microondas.

6. RECOMENDACIONES

- Utilizar un equipo de ultrasonido de alta potencia de contacto, el cual puede mejorar el tratamiento, que el equipo de ultrasonido por inmersión.
- Aplicar otros métodos para el secado de las muestras de ahuyama como el secado por osmosis o secado convencional a temperaturas no superiores a 40°C, para determinar si existe un efecto significativo en el uso de ultrasonido de potencia.

7. BIBLIOGRAFÍA

AOAC 2012. AOAC (Association Official Analytical Chemists). 2012. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. AOAC, USA

Abou E., N. H. (2008). Microwave drying of apple. Misr Journal of agricultura Engineering. 25: 980-1003. Disponible en:

<http://www.mjae.eg.net/pdf/2008/july/21.pdf>

Agronet. 2014. Área Sembrada y Área Cosechada del Cultivo de Ahuyama 2007-2014. Disponible en: <http://www.agronet.gov.co/Documents/Arveja.pdf>. Fecha de acceso: Mayo 9 de 2017.

Azuola, R. y Vargas P. 2007. Extracción de Sustancias Asistida Por Ultrasonido (EUA). Tecnología en Marcha. Vol. 20, (Nº. 4), Disponible en:

<http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4835781&info=resumen&idioma=SPA>

Banco Mundial. 2015. Agricultura, valor agregado (% del PIB) Disponible: (<http://datos.bancomundial.org/indicador/NV.AGR.TOTL.ZS?end=2015&locations=CO&start=1965&view=chart>)

Chaglla, Diego F. 2016. Deshidratación Osmótica del zapallo (Cucurbita maxima Duchesne). Ingeniería en Alimentos. Universidad Técnica de Ambato. Ambato, Ecuador. Disponible en: <http://repo.uta.edu.ec/bitstream/123456789/24093/1/AL616.pdf>

Dane. 2016. Pobreza Monetaria y Multidimensional en Colombia 2016. Disponible (<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/pobreza-y-condiciones-de-vida/pobreza-y-desigualdad/pobreza-monetaria-y-multidimensional-en-colombia-2016>)

Delgado, J. 2012. Aplicación Del Ultrasonido en la Industria de los Alimentos. Revista Especializada en Ingeniería de Procesos en Alimentos y Biomateriales. Volumen 6. Páginas:141–152. Disponible: <http://oaji.net/articles/2017/5082-1501180905.pdf>

Della, P et al. 2013. Manual Del Cultivo Del Zapallo Anquito (Cucurbita Moschata Duch.). Editado por P. Della Gaspera. Mendoza, Paginas: 1-344. Disponible en: (http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual_de_zapallo.pdf).

El Heraldo. 2016. La Guajira, Córdoba y Magdalena, entre los 5 departamentos con más pobreza en el país: Gobierno. Disponible: (<https://www.elheraldo.co/nacional/la-guajira-cordoba-y-magdalena-en-el-top-cinco-de-los-departamentos-con-mayor-pobreza-en>)

FAOSTAT. Cantidades de producción de Calabazas, zapayo, calabaza confitera por país 2014. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC/visualize>

Fernandes, F., Oliveira F., y Rodrigues S. 2008. Use of Ultrasound for Dehydration of Papayas. Food and Bioprocess Technology. Volumen 1. (N° 4). Página: 339–345. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-007-0019-9>.

García-Mogollon C., Sierra-Bautista M. y Miranda-Ramos L. 2016. Modelado de la Cinética de Secado en Microondas de Ñame. Scientific Electronic Library Online. Volumen 27. (No. 1). Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642016000100008

Garcia-Perez, J.V., Roselló, C., Cárcel, J.A., De la Fuente, S., & Mulet, A. 2006. Effect of air temperature on convective drying assisted by high power ultrasound. Deffect and Diffusion Forum, 258-260: 563-574.

Gamboa-Santos, J, Montilla A, Cárcel J, García-Pérez J, y Villamiel M. 2012. Aplicación de ultrasonidos de potencia en el pretratamiento y la deshidratación de hortalizas y frutas. *Alimentaria*. Páginas: 94 – 103.

Geankoplis, C. 1998. *Procesos de Transporte Y Operaciones Unitarias*. Tercera ed. México. Páginas: 579 – 634

Gerencia de investigación de mercados. 2013. Perfil Auyama (Calabaza). Centro de Exportación e Inversión de la República Dominicana. Disponible:

http://isaplataforma.weebly.com/uploads/2/6/3/2/26327016/perfil_auyama_2013__2_.pdf

Giraldo-Zuñiga et al 2010. Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas. *Ciencia y tecnología de alimentos*. Volumen 30. (No. 1). Páginas 179 – 182. Disponible en:

<http://www.scielo.br/pdf/cta/v30n1/v30n1a27.pdf>

González-Cebrino F., Contador R., Durán R., García-Parra J., Delgado J., Hernández T., Lozano M., Ramírez R. 2010. Caracterización fisicoquímica y microbiológica de calabaza (*Cucurbita moschata* ‘Butternut’), utilizada en la industria para la elaboración de cremogenados. Instituto Tecnológico Agroalimentario (INTAEX).

Honorato G, Oliveira E., de S. Alsina, Magalhães M. 2005. Study of the kinetic drying process for shrimp cephalothorax, Universidade Fed. do Rio Grande do Norte, Brasil.

Juárez L. 2015. Modelos y problemas de difusión. Mexico. Pagina 25. Disponible en:

http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/hect/Taller_de_Modelado_I/notasTM1.pdf

Lykov, A V, and James P Hartnett. 1968. *Analytical Heat Diffusion Theory Academic Press*, New York and London.

Madera S., Ortega-Quintana F., López E. y Pérez O. 2016. Determinación del Coeficiente Convectivo de Transferencia de Calor del Proceso de Escaldado de Zapallo (*Cucurbita maxima*). Información Tecnológica. Volumen 28. N° (3).

Mazo, S. 2013. Panorama de la malnutrición en Colombia y el mundo. Revista alimentos hoy, Volumen 22, numero (29), páginas: 1 – 6. Disponible:

(<http://alimentos hoy.acta.org.co/index.php/hoy/article/view/226>)

Orsat V., Changrue V. and Vijaya G. 2006. Microwave drying of fruits and vegetables. Stewart Postharvest Review 2006, Volumen 6. Número 4.

Ortiz J. 2014. Modelación matemática del secado de alimentos por el método de ventana de refractancia. Doctorado en Ingeniería, Énfasis en Ingeniería de Alimentos. Universidad del Valle. Cali (Colombia).

Pakbin B., Rezaei K. and Haghghi M. 2014. An introductory review of applications of ultrasound in food drying processes. Revista Food processing and technology. Volumen 6.

Parada J., Romero C., Yépez B. 2012. Aplicación de ultrasonido en el procesamiento de mora de Castilla (*Rubus glaucus Benth*): Efecto sobre la calidad funcional y evaluación como pretratamiento al secado convectivo. Revista Alimentos Hoy. Volumen 21, número (27).

Quintero, J. 2006. Cultivo de calabaza. Disponible:

http://www.mapama.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1981_11-12.pdf

Robles-Ozuna, L. y Ochoa-Martínez, L. 2012. Ultrasonido y sus aplicaciones en el procesamiento de alimentos. Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, Volumen 13, número (2), Páginas: 109–122.

Rodrigues, S. y Fernandes F. 2007. Use of ultrasound as pre-treatment for dehydration of melons. *Drying Technology*. Volumen 25.

Rodríguez, O., Santacatalina, J.V., Simal, S., Garcia-Perez, J.V., Femenia, A., & Rosselló, C. 2014. Influence of power ultrasound application on drying kinetics of apple and its antioxidant and microstructural properties. *Journal of Food Engineering*, 129, 21-29.

Sabarez, H.T., Gallego-Juárez, J.A., & Riera, E. 2012. Ultrasonic-assisted convective drying of apple slices. *Drying Technology*, 30, 989-997.

Santacatalina B. 2015. Contribución al estudio de la aplicación de ultrasonidos de alta intensidad en procesos de secado a baja temperatura. Doctorado en Ciencia, Tecnología y Gestión Alimentaria. Universitat Politècnica de València, València (España).

Seyoum T., Raghavan V. and Garipey Y. (2011). Microwave Assisted Hot Air Ventilation Drying of Tomato Slices. *International Conference on Food Engineering and Biotechnology*. Volumen 9.

Wais, N. 2011. Secado Combinado de Frutas: Deshidratación Osmótica y Microondas. Doctor en Ingeniería. Universidad Nacional de La Plata. La Plata (Argentina). Disponible:

<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/38494>

Zarein, M., Hashem S. y Ghobadian B. (2015). Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices, Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, Volumen 14 No. (1), 41-47.

ANEXOS

Anexo A. Equipos utilizados en la caracterización de la ahuyama



Secado por estufa de muestras



Determinación de cenizas.



Secado determinación de fibra



Determinación de extracto etéreo

Anexo B. Preparación de muestras y Equipos utilizados.



Preparación de muestras



Muestras listas (1x1x4)



Equipo manual de
molde



Equipo de Ultrasonido



Equipo de Microondas



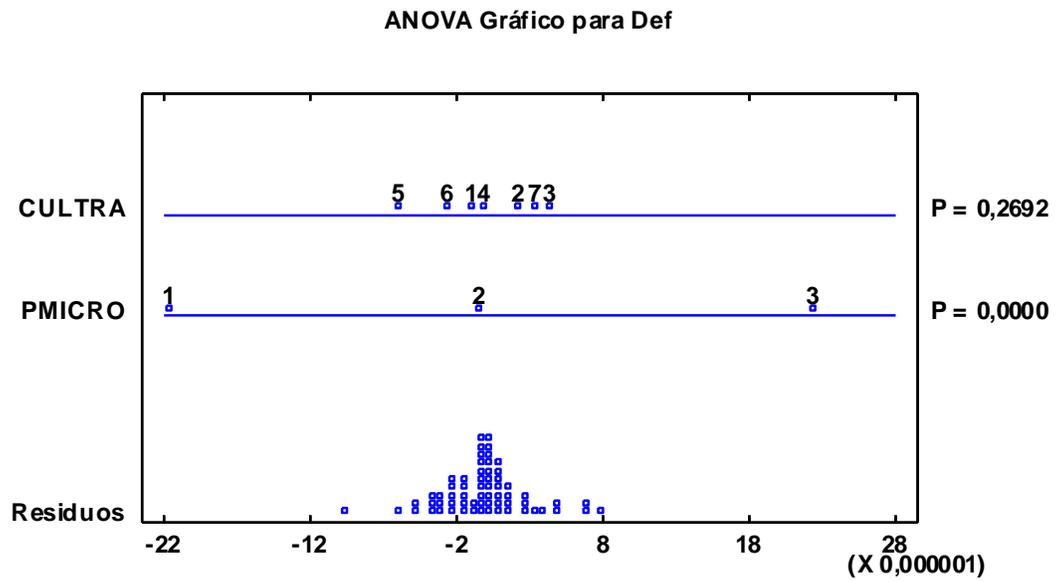
Balanza analítica

Anexo C. Resultados tabla ANAVA.

Análisis de Varianza para Def - Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:PMICRO	9,70111E-10	2	4,85055E-10	37,90	0,0000
B:CULTRA	1,01447E-10	6	1,69078E-11	1,32	0,2692
INTERACCIONES					
AB	1,29762E-10	12	1,08135E-11	0,84	0,6058
RESIDUOS	5,37581E-10	42	1,27996E-11		
TOTAL (CORREGIDO)	1,7389E-9	62			

Anexo D. Diferencia en los tratamientos de ultrasonido y potencia.



Anexo E. Datos de difusividad efectiva

Tratamiento	1	2	3
PU0TU0PM300	2,0830E-04	2,0953E-04	2,0977E-04
PU275TU10PM300	2,0970E-04	2,0827E-04	2,0958E-04
PU275TU15PM300	2,1462E-04	2,1506E-04	2,1286E-04
PU275TU30PM300	2,1091E-04	2,0742E-04	2,0958E-04
PU550TU10PM300	2,0847E-04	2,0726E-04	2,0591E-04
PU550TU15PM300	2,0826E-04	2,0970E-04	2,1085E-04
PU550TU30PM300	2,1039E-04	2,1099E-04	2,0907E-04
PU0TU0PM400	2,1055E-04	2,1451E-04	2,1485E-04
PU275TU10PM400	2,2149E-04	2,1867E-04	2,1655E-04
PU275TU15PM400	2,1356E-04	2,1358E-04	2,1396E-04
PU275TU30PM400	2,1382E-04	2,1395E-04	2,1345E-04
PU550TU10PM400	2,1681E-04	2,1341E-04	2,1017E-04
PU550TU15PM400	2,1726E-04	2,1308E-04	2,0621E-04
PU550TU30PM400	2,2062E-04	2,1316E-04	2,1381E-04
PU0TU0PM500	2,2701E-04	2,1530E-04	2,1806E-04
PU275TU10PM500	2,2598E-04	2,1989E-04	2,0856E-04
PU275TU15PM500	2,2757E-04	2,1703E-04	2,1762E-04
PU275TU30PM500	2,2438E-04	2,2097E-04	2,1612E-04
PU550TU10PM500	2,1777E-04	2,1623E-04	2,1466E-04
PU550TU15PM500	2,2150E-04	2,1867E-04	2,1655E-04
PU550TU30PM500	2,2416E-04	2,1776E-04	2,2248E-04

Donde: PU = Potencia del ultrasonido (550 y 275 W)

TU = Tiempo ultrasonido (10, 15 y 30 minutos)

PM = Potencia del microondas (300, 400 y 500 W)