

**EVALUACIÓN DEL MÉTODO DE SECADO POR VENTANA DE
REFRACTANCIA™ EN PULPA DE GUAYABA (*Psidium guajava*)**

YURI MARICEL LEITON RAMIREZ



DIRECTORA: CLAUDIA ISABEL OCHOA MARTÍNEZ, Ph. D.

CODIRECTOR: ALFREDO AYALA APONTE, Ph. D.

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRIA EN INGENIERÍA DE ALIMENTOS

SANTIAGO DE CALI

2012

**EVALUACIÓN DEL MÉTODO DE SECADO POR VENTANA DE
REFRACTANCIA™ EN GUAYABA (*Psidium guajava*)**

YURI MARICEL LEITON RAMIREZ

DIRECTORA: CLAUDIA ISABEL OCHOA MARTÍNEZ, Ph. D.

Profesora Escuela Ingeniería de Alimentos. Universidad del Valle

CODIRECTOR: ALFREDO AYALA APONTE, Ph. D.

Profesor Escuela Ingeniería de Alimentos. Universidad del Valle

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE ALIMENTOS

SANTIAGO DE CALI

2012

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABLAS	iv
RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN	2
1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	4
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
3. JUSTIFICACIÓN	6
4. OBJETIVOS	7
5. MARCO TEÓRICO	8
5.1. SECADO	8
5.2. SECADO POR VENTANA DE REFRACTANCIA™	10
5.3. GUAYABA	13
6. ANTECEDENTES	15
7. MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
7.1. METODOLOGÍA	20
7.2. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	23
7.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	23
7.4. DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS	24

7.4.1.	Humedad	24
7.4.2.	Difusividad.....	25
7.4.3.	Actividad de agua.....	26
7.4.4.	Color.....	26
7.5.	DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES ESTRUCTURALES	27
7.5.1.	Densidad aparente, densidad real y porosidad	27
7.5.2.	Microestructura	28
7.6.	DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES NUTRICIONALES	29
7.6.1.	Vitamina C	29
7.6.2.	Carotenoides.....	29
8.	RESULTADOS	31
8.1.	PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS	31
8.1.1.	Humedad	31
8.1.2.	Difusividad.....	39
8.1.3.	Actividad de agua.....	43
8.1.4.	Color.....	45
8.2.	DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES ESTRUCTURALES	52
8.2.1.	Densidad real, densidad aparente y porosidad	52
8.2.2.	Microestructura	55
8.3.	DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES NUTRICIONALES	58

8.3.1.	Vitamina C	58
8.3.2.	Carotenoides.....	59
9.	CONCLUSIONES	61
10.	BIBLIOGRAFÍA	63
11.	ANEXOS	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Transferencia de energía térmica del sistema de secado Ventana de Refractancia™ (Nindo y Tang, 2007a).....	12
Figura 2. Escala de madurez de guayaba	20
Figura 3. Moldes de acrílico.....	21
Figura 4. Secador de Ventana de Refractancia™	22
Figura 5. Efecto de la temperatura, el espesor y el tiempo sobre la humedad (g agua/g total) de pulpa de guayaba	32
Figura 6. Comportamiento de la humedad (g agua/g m.s.) de pulpa de guayaba, relacionando temperatura, espesor y tiempo.....	32
Figura 7. Relación de espesor - tiempo a contenido de humedad de 0,9 g agua/g m.s	35
Figura 8. Ajuste del modelo de Page (A) 60°C, (B) 80°C, (C) 90°C	37
Figura 9. Correlación de la difusividad (A) y la constante k_i (B) durante el secado de pulpa de guayaba en función de la temperatura	41
Figura 10. Comportamiento de la actividad de agua en el secado de pulpa de guayaba.	44
Figura 11. Comportamiento del cambio de luminosidad de pulpa de guayaba durante el secado	45
Figura 12. Luminosidad de pulpa de guayaba a humedad de 0,35(kg agua/kg total)	47

Figura 13. Comportamiento del croma de pulpa de guayaba, relacionando temperatura, espesor y tiempo.....	48
Figura 14. Muestras de guayaba fresca y secadas a 80°C después de 120 minutos.....	48
Figura 15. Comportamiento de la diferencia de color de pulpa de guayaba.....	49
Figura 16. Efecto del espesor sobre la diferencia de color vs actividad de agua de pulpa de guayaba a (A) 60°C, (B) 80°C y (C) 90°C.....	50
Figura 17. Efecto de la temperatura sobre la diferencia de color vs actividad de agua de pulpa de guayaba a (A) 2mm, (B) 3mm y (C) 4mm).....	51
Figura 18. Comportamiento de la densidad aparente en el secado de pulpa de guayaba	52
Figura 19. Comportamiento de la densidad real en el secado de pulpa de guayaba	53
Figura 20. Comportamiento de la porosidad de pulpa de guayaba, relacionando temperatura, espesor y tiempo	53
Figura 21. Porosidad de pulpa de guayaba a humedad de 0,35(kg agua/kg total)	54
Figura 22. Fotografía SEM de pulpa guayaba fresca.....	55
Figura 23. Fotografía SEM de pulpa de guayaba de 2mm secada a 60°C	56
Figura 24. Fotografía SEM de pulpa de guayaba de 3mm secada a 60°C	56
Figura 25. Fotografía SEM de pulpa de guayaba de 2mm secada a 80°C	56
Figura 26. Fotografía SEM de pulpa de guayaba de 3mm secada a 80°C	57
Figura 27. Fotografía SEM de pulpa de guayaba de 2mm secada a 90°C	57

Figura 28. Fotografía SEM de pulpa de guayaba de 3mm secada a 90°C	57
Figura 29. Pérdida de vitamina C en las muestras de guayaba secadas por VR	58
Figura 30. Pérdida de carotenoides en las muestras de guayaba secadas por VR	60

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición de guayaba pera (FAO).....	13
Tabla 2. Antecedentes	17
Tabla 3. Diseño experimental	23
Tabla 4. Parámetros de los modelos matemáticos empleados para el secado por VR de pulpa de guayaba	36
Tabla 5. Coeficiente de difusividad efectiva en el secado de pulpa de guayaba en VR	39
Tabla 6. Energía de activación (E_a) y factor de Arrhenius calculados a partir de la difusividad	41
Tabla 7. Energía de activación (kJ/mol) calculada a partir del parámetro k_i de cada modelo	42

RESUMEN

El propósito de este trabajo fue estudiar el proceso de secado por Ventana de Refractancia™ (VR) en pulpa de guayaba, evaluando el efecto de la temperatura del agua y del espesor de las muestras de pulpa sobre las propiedades fisicoquímicas (humedad, difusividad, actividad de agua y color), estructurales (porosidad y microestructura) y nutricionales (vitamina C y carotenoides). Se trabajó con temperaturas del agua de 60, 80 y 90°C y muestras de pulpa con espesores de 2, 3 y 4 mm y 35 mm de diámetro. Se encontró que en el secado por VR las temperaturas y espesores estudiados tuvieron diferencia significativa sobre las variables de respuesta (humedad, actividad de agua, luminosidad, croma, diferencia de color, densidad real, densidad aparente y porosidad). Los valores del coeficiente de difusividad se encontraron dentro de los rangos reportados en alimentos (10^{-11} a 10^{-8} m²/s). Por medio de la ecuación de Arrhenius se encontró que el parámetro k de Page representa un comportamiento pseudo-difusional de la transferencia de la materia como se afirma en la segunda ley de Fick. La pulpa de guayaba fresca presentó un contenido de vitamina C de 68,4 mg/100g y en el proceso de secado perdió entre 68,3-86,4%; tanto la temperatura como el espesor tuvieron diferencia significativa en esta variable durante el proceso. Mientras que en el contenido de carotenos sólo el espesor afectó significativamente.

INTRODUCCIÓN

El secado es la operación que elimina, por evaporación o sublimación, el agua de una materia húmeda (sólida o líquida). Aunque numerosos productos alimenticios se secan en el momento de su transformación y/o conservación, existe el riesgo de alteración de la forma, la textura y la calidad tanto nutricional como organoléptica del producto y el consumo energético de la operación puede ser considerable (**Boulogne et al., 2008**).

El sistema de secado por Ventana de Refractancia™ es una alternativa para convertir alimentos de alta actividad de agua tales como frutas y verduras, en productos más estables a las reacciones de deterioro. Este método de secado se caracteriza por temperaturas del producto relativamente bajas y tiempos de secado cortos (**Nindo et al., 2003a**).

La guayaba (*Psidium guajava* L.) es una fruta tropical perteneciente a la familia de las Mirtáceas proveniente de los países tropicales y subtropicales. Debido a su capacidad de crecer en diversos climas y adaptarse a diversos suelos, la guayaba ha sido introducida en muchos países (**Salazar et al., 2006**). Es un fruto ampliamente consumido a nivel mundial debido a sus propiedades nutricionales tales como el bajo contenido de carbohidratos, grasas, proteínas y la alta cantidad de vitamina C (más de 100 mg / 100 g fruta) y fibra (2.8–5.5 g/100 g fruta) (**Pérez et al., 2008**). Una vez que se cosechan los frutos, su actividad metabólica continúa debido a su comportamiento respiratorio climatérico, por consiguiente, sus propiedades fisicoquímicas, sensoriales y nutricionales van cambiando y deteriorando la fruta conforme avanza el proceso de maduración (**Salazar et al., 2006**), además de que está limitada la exportación como fruta fresca por estrictas medidas de seguridad fitosanitarias a los países productores

(McGuire y Hallman, 1995). Por esto es necesario implementar métodos de conservación, siendo el secado el más aplicado para mejorar la estabilidad de alimentos, ya que disminuye la actividad del agua, reduce la actividad microbiológica, y minimiza los cambios físicos y químicos durante su almacenamiento (Mayor y Sereno, 2004).

Colombia ha venido presentando un ascenso en los últimos años en la exportación de frutas deshidratadas: en el año 2006 se vendieron US\$14,4 millones mientras que el año 2007 representó un ingreso de US\$18,6 millones para las exportaciones nacionales, siendo los principales destinos Estados Unidos (51%), España (10%) y México (9%) (Subdirección de Inteligencia de Mercados, 2008).

El propósito de este trabajo es estudiar el sistema de Ventana de Refractancia™ en el proceso de deshidratación de pulpa de guayaba, evaluando el efecto de la temperatura del agua y del espesor de rodajas, sobre las propiedades fisicoquímicas (humedad, difusividad, actividad de agua y color), estructurales (porosidad y microestructura) y nutricionales (vitamina C y carotenoides).

1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuánta será la variabilidad en las propiedades fisicoquímicas, estructurales y nutricionales de la pulpa de guayaba sometida al método de secado por Ventana de Refractancia™?

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria de alimentos requiere el desarrollo de alternativas de aprovechamiento y preservación de frutas y verduras y la manera más eficaz y rápida para aumentar el tiempo de vida útil de las frutas es reducir el contenido y disponibilidad del agua. Siendo los métodos de secado la mejor opción para lograr este objetivo, los cuales deben tener una constante investigación con el objetivo de obtener productos secos con alta retención de nutrientes y óptima calidad fisicoquímica y estructural. Un sistema óptimo de secado para la conservación de productos hortofrutícolas debe ser rentable, con menores tiempos de secado, bajas temperaturas de proceso, bajo consumo energético y con el mínimo daño al producto **(Sagar & Suresh, 2010)**. Para dar respuesta a la demanda de frutos secos de calidad, este trabajo se orienta al secado de pulpa de guayaba, empleando la técnica de secado Ventana de refractanciaTM porque la maduración de los frutos ocurre de forma rápida, dificultando las actividades de poscosecha, de almacenamiento y traslado a las áreas urbanas **(McGuire y Hallman, 1995)**.

3. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años los consumidores han tomado conciencia de la importancia de alimentarse de forma equilibrada sin dejar de lado la variedad y calidad en los productos alimenticios. Los vegetales y las frutas presentan importantes beneficios para la salud por su alto contenido de vitaminas, minerales, fibra y antioxidantes, aunque su consumo en fresco presenta inconvenientes tales como:

- Cambios en los hábitos alimenticios siendo sustituidos por productos procesados (enlatados, envasados) es decir “listos para comer”.
- Estacionalidad.
- Perecibilidad debida al alto contenido de agua en su estructura.

Por estas problemáticas y una constante innovación de los productos en el mercado, las frutas requieren ajustarse y brindar a los consumidores productos atractivos, de alta calidad y con una vida útil prolongada. Por eso se estudiará el método de VR como una alternativa relativamente simple y barata que puede aplicarse a diversos productos y requiere tiempos de residencia cortos (Nindo et al., 2004).

4. OBJETIVOS

GENERAL

Evaluar el proceso de secado por Ventana de Refractancia™, como una alternativa para el secado de pulpa de guayaba cuantificando las pérdidas nutricionales y organolépticas del producto.

ESPECÍFICOS

Determinar la influencia de la temperatura del proceso y del espesor de muestras de pulpa de guayaba sobre las propiedades fisicoquímicas (humedad, difusividad, actividad de agua y color) y estructurales (porosidad y microestructura) en el secado con Ventana de Refractancia™.

Establecer el efecto de la temperatura del proceso y del espesor sobre la pérdida de las propiedades nutricionales (vitamina C y carotenoides), al final del proceso de secado con Ventana de Refractancia™ en pulpa de guayaba.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. SECADO

El secado es un proceso en el que el agua se elimina para detener o reducir el crecimiento de microorganismos perjudiciales para el alimento, así como ciertas reacciones químicas. La eliminación de agua de los alimentos se consigue principalmente utilizando aire caliente que elimina el agua de la superficie del producto y la lleva hacia el exterior. Además de la conservación, el secado se utiliza para reducir el costo o el espacio en el embalaje, almacenamiento, manejo y transporte, ya que se reduce el peso y en ocasiones el volumen. El proceso de secado de alimentos no sólo afecta el contenido de agua en el alimento, sino también otras de sus características físicas y químicas (Xue, 2004).

El secado de alimentos es una operación unitaria compleja. Son varios los factores que afectan la calidad del producto a través de la operación de secado. Los cambios físicos y químicos del alimento durante una operación de secado pueden potenciar ciertas características deseadas de los productos, pero de igual forma tienden a disminuir la cantidad de nutrientes y cambiar las propiedades organolépticas.

La transmisión de calor ocurre en el interior del alimento y está relacionada con el gradiente de temperatura existente entre su superficie y la superficie del agua en el interior del alimento. Cuando se proporciona al agua suficiente energía para su evaporación, el vapor producido se transporta desde la superficie de la capa húmeda en el interior del producto hacia la superficie de éste. El gradiente de presión de vapor existente entre la superficie del agua en el interior y el aire exterior al alimento, es el

que provoca la difusión del vapor de agua hacia la superficie de éste. Durante el secado se producen cuatro fenómenos de transporte **(Xue, 2004)**:

1. Transferencia de calor desde el aire o agua hasta la superficie del producto. Se puede realizar por conducción, convección o radiación.
2. Transmisión de calor desde la interfase sólido-aire o solido-agua hasta el interior del sólido. Ocurre por conducción en régimen no estacionario.
3. Transferencia de materia a través del sólido. Se puede producir por difusión o por capilaridad. La difusión ocurre en el secado de productos con humedades del orden de 55% (base húmeda) o inferiores, mientras que la capilaridad se presenta para niveles más altos de humedad (65% o más), siempre y cuando en la estructura interna del producto existan capilares.
4. Transferencia de vapor desde la interfase sólido-aire sólido-agua hacia el seno del aire o agua.

Los factores que regulan la velocidad de estos procesos son los que definen la velocidad de secado. Estos factores son:

- a) Área superficial del producto: generalmente se subdivide el producto, a fin de aumentar el área de transferencia de masa y calor y acelerar el proceso **(Chavarro et al., 2006)**.
- b) Velocidad del aire: el aire en movimiento absorbe vapor de agua de la superficie del alimento, previniendo la creación de una atmósfera saturada. La velocidad del aire actúa aumentando los coeficientes globales de transmisión de calor y de masa, y disminuyendo el tiempo de secado. Sin embargo, a partir de cierto punto, la velocidad de secado no depende de esta variable, debido a

que el factor de control del proceso de secado en este caso es la difusión del agua a través del sólido, de manera que, por más que aumente la velocidad másica del aire no puede aumentarse la velocidad de secado (**Fito et al., 2001**).

- c) Temperatura del aire o agua: la velocidad de secado aumenta al aumentar la temperatura.
- d) Influencia del tejido vegetal: las propiedades del tejido y los cambios que se producen durante la maduración del fruto también son factores determinantes en el proceso de secado (**Mujumdar et al., 1995; Montes et al., 2008**).
- e) Humedad del aire: cuanto más seco esté el aire, mayor será la velocidad de deshidratación ya que aumenta la fuerza impulsora para el transporte de masa.
- f) Tiempo de exposición: es menor el tiempo al aumentar la temperatura del aire o agua.

5.2. SECADO POR VENTANA DE REFRACTANCIA™

El sistema de secado de Ventana Refractancia™ utiliza agua caliente por debajo del punto de ebullición y se realiza a presión atmosférica. La energía térmica del agua caliente que circula se transfiere al producto fresco a través de una interfaz plástica que es relativamente transparente a la radiación infrarroja. Los productos, como jugo, purés, suspensiones y frutas, se extienden sobre la banda transportadora plástica que se mueve mientras su superficie inferior está en contacto con agua caliente. El agua caliente se recircula, mejorando la eficacia térmica del sistema. El empleo de agua

caliente como medio que transfiere el calor y la temperatura justo debajo del punto de ebullición hace de éste, un equipo de características únicas en métodos de secados **(Nindo y Tang, 2007a)**.

Durante el secado por Ventana de Refractancia™ se presentan los tres tipos de transferencia de calor: conducción (q_{Cond}), convección (q_{conv}) y radiación (q_{rad}). La Figura 1 muestra el proceso por el cual el calor se transfiere del agua caliente al producto. El agua caliente transfiere la energía térmica a la banda transportadora plástica delgada en la cual la transmisión infrarroja a una longitud de onda se empareja al espectro de absorción para el agua, facilitando un secado más rápido **(Smith, 1994)**. La banda plástica debe ser delgada, porque un material plástico grueso con la conductividad térmica baja, proporciona una resistencia más alta para transferir energía térmica. El agua tiene la absorción alta por el infrarrojo en las longitudes de onda de 3.0, 4.7, 6.0, y 15.3 μm **(Sandu, 1986)**. Debido a que la banda es muy delgada, su temperatura aumenta casi inmediatamente debido al agua que circula debajo de ella. La energía térmica del agua caliente se trasmite por la banda plástica por conducción y radiación. Sin embargo, la contribución exacta de cada uno de estos tipos de calor todavía no se ha investigado. La transferencia infrarroja es más fuerte cuando la interfaz plástica está en íntimo contacto con el agua sobre un lado y un material de humedad alta en el otro lado. Cuando un producto con alto contenido de humedad se extiende sobre la banda, la refracción en la interfaz de producto-plástico se minimiza, permitiendo que la energía térmica radiante atraviese el plástico y llegue al producto **(Abonyi et al., 2001)**.

La transferencia de energía térmica del producto fresco al medio ambiente es principalmente por convección y por evaporación del agua del alimento **(Ratti y Mujumdar, 1995)**. Esta evaporación es muy intensa y constituye la mayor parte del

consumo de energía en el secado de Ventana de Refractancia™ al inicio del proceso. En la última fase del secado cuando el producto está casi seco, la transferencia de calor por conducción es la predominante y la tasa de transferencia de calor al producto es más lenta a medida que el producto se seca. La sección de enfriamiento de la descarga del secador se destina a reducir la temperatura del producto, preferiblemente por debajo de la temperatura de transición vítrea del producto, para facilitar el retiro del producto (Ancient, 2004).

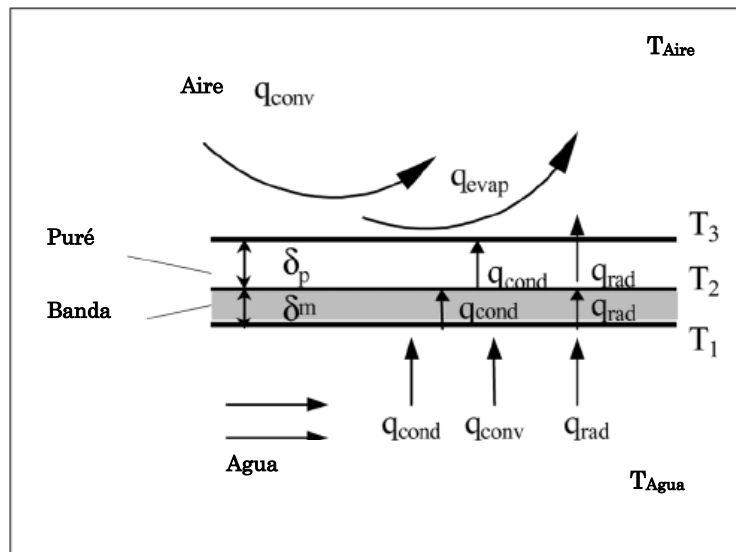


Figura 1. Transferencia de energía térmica del sistema de secado Ventana de Refractancia™ (Nindo y Tang, 2007a)

5.3. GUAYABA

El nombre científico es *Psidium guajava* y pertenece a la Familia de las *Myrtaceae*. El nombre común es guayabo, guayabos, guayaba, guayabas o guayabero. Su origen es de América tropical y subtropical y es de amplia distribución y demanda en América Latina (Laguado et al., 2002). Es un arbusto que no suele superar los 5 m de altura, su fruto es ovoide, entre 3 y 10 cm de diámetro, según la variedad, la guayaba puede tener forma redondeada o parecida a una pera y presenta una cáscara cerosa; en algunas variedades es de piel lisa y en otras rugosa. Su color varía de verde a amarillento según la especie y el grado de maduración. La capa interior es más blanda, jugosa y cremosa albergando un gran número de semillas de constitución leñosa y dura; el fruto se consume crudo, en compota, jaleas, mermeladas o dulces (Navarro et al., 2007). Los datos de composición se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición de guayaba pera (FAO)

Nutriente	Cantidad	Nutriente	Cantidad
Agua (%)	83-88	Fósforo (mg)	30
Proteína (%)	0,6-1.6	Hierro (mg)	0,4
Grasa (%)	0,3-0.8	Vitamina A Equiv. Totales (µg)	100-110
Ceniza (%)	0,3-0.6	Vitamina C (mg)	23 – 492
Azúcar (%)	4.5-8	Pectina (%)	0.9-1.0
Fibra (%)	4-8		

Datos por 100ml o 100g de porción comestible

La guayaba (*Psidium guajava* L.) es un frutal fundamental en la economía campesina colombiana e insumo industrial en la producción de alimentos, bebidas y productos

farmacéuticos. El aroma es termoestable y sus propiedades nutricionales no tienen paralelo con las de otros cultivos: el contenido de vitamina C es hasta cinco veces superior al de los cítricos, presenta los aminoácidos esenciales: triptófano, lisina y metionina, y se han registrado 16 vitaminas aunque falta por determinar cerca de 60% de contenido vitamínico (**Lozano et al., 2002; Gutiérrez et al., 2007**).

Muchos son los problemas que afectan este cultivo desde varios puntos de vista. Dentro de los frutales tropicales es uno de los más afectados por plagas y enfermedades. Se señalan más de 70 especies de insectos que inciden sobre la calidad de la guayaba (**Peña et al., 1996**).

En Colombia se producen mas de 300.000 ton/año de guayaba, principalmente en los departamentos de Santander, Boyacá, Atlántico, Antioquia, Valle, Cundinamarca, Caldas, Huila y Magdalena (en Santander se concentra el 38% de la producción nacional) (**Fondo Nacional de Fomento Hortofrutícola, 2003**). La guayaba es muy apetecida por su alto valor nutritivo y sus propiedades medicinales; algunos estudios han permitido establecer que posee actividad anti-inflamatoria, analgésica, antipirética, espasmolítica y antibacterial (**Olajide y Makinde, 1999; Lozoya et al., 2002; Abdelrahim et al., 2002**).

6. ANTECEDENTES

El método de secado por Ventana de RefractanciaTM(VR), fue desarrollado por la empresa MCD Technologies, Inc., en Tacoma, Washington, para ser una alternativa de secado reduciendo el contenido de humedad, sin dejar de lado las propiedades tanto organolépticas como nutricionales. Esta técnica se ha comparado en varios estudios (**Abonyi et al., 2001, Nindo et al., 2003b, Nindo y Tang 2007a**) con otros métodos de secado como liofilización, secado en tambor, secado por atomización, aire caliente, secado por lecho de chorro y microondas combinado con secado por lecho de chorro, presentando mayor retención de contenido de vitamina C y carotenoides que son compuestos de gran interés por ser termo-sensibles.

El método de secado por Ventana de Refractancia TM (VR) ha ganado interés, debido a que las investigaciones realizadas en productos hortofrutícolas como fresa, zanahoria, calabaza, espárrago, arándano, arándano agri dulce, páprika, mango y pitahaya amarilla, confirman esta técnica económicamente y eficientemente viable. Al secar estos productos se obtuvieron humedades entre 0.2 y 10% base húmeda en tiempos entre 3 y 150 min dependiendo del espesor de la muestra. En la Tabla 2 se presentan los estudios realizados en secado por Ventana de Refractancia TM (VR) y los aportes al conocimiento en su desarrollo.

Nindo et al. (2003a); Nindo y Tang (2007a) y Vallejo (2010) llevaron a cabo estudios de eficiencia energética inicialmente a escala piloto y posteriormente a nivel comercial, para evaluar la eficiencia del método Ventana de Refractancia TM(VR) y encontraron que la eficiencia varía entre 52 y 70% a escala comercial y entre 28 y 48% a escala piloto, la cual es alta en comparación con otras técnicas de secado como

secado por aspersión (20-51%), secado por tambor de (35-60%), secador rotatorio (25-50 %).

Una de las propiedades para la aceptación o rechazo de los productos alimenticios es el color, el cual tiene un impacto directo al consumidor y es importante su cuantificación en los productos secos. Este valor está constituido por parámetros como tonalidad, saturación, luminosidad y diferencia de color. **Abonyi et al. (2001)**, concluyeron con que en el método por VR se obtienen cambios de color similares a los que se obtienen por liofilización, mientras que **Ayhan et al. (2009)**, compararon el secado por VR con otros métodos como secado al horno y secado con aire, los cuales presentaron mayores pérdidas en el color. Otra característica relevante al emplear algún método de secado es el pardeamiento, el cual se genera en el producto durante el tiempo de residencia en el secador, esta modificación de pigmentos fue estudiada por **Ayhan et al. (2009)** en páprika (*Pimiento L. annuum*) quienes obtuvieron resultados similares al secar por VR y por liofilización.

Nindo et al. (2003a) y Vallejo (2010) estudiaron la relación directa que existe entre la disminución de la actividad de agua y el descenso de la cantidad de microorganismos. Estos autores encontraron que en el secado por Ventana de Refractancia™ esto ocurre en tiempos cortos de residencia del producto en el equipo, generando productos más estables con reducida cantidad de microorganismos y bajas actividades de agua.

Tabla 2. Antecedentes

Autor y año	Producto	Variables del proceso	Variables de respuesta	Resultados
Abonyi, et al., 2001	Puré de fresa	Técnica de secado: VR, liofilización, secado en tambor y secado por atomización.	Ácido ascórbico y retención de color.	Ácido ascórbico: 94.0% en VR y 93.6% en liofilización. El color por VR fue comparable con liofilización.
	Puré de zanahoria		Pérdida de carotenos y diferencia de color.	Pérdidas del caroteno por VR fueron de 8.7% (caroteno total), 7.4% (α), y 9.9% (β), por liofilización 4.0% (caroteno total), 2.4% (α), y 5.4% (β). El color por VR fue comparable al puré fresco.
Nindo et al., 2003a	Puré de calabaza	Escala del secador: escala piloto y comercial	Eficiencia energética y efecto en la reducción microbiana	Eficacia energética: entre 52% y 70% escala comercial y entre 28 y 48% escala piloto Reducción microbiana: 4.6, 6.1, 6.0, y 5.5 de microorganismos aerobios mesófilos totales,

				coliformes, Escherichia coli y Listeria innocua, respectivamente.
Nindo, et al., 2003b	Espárrago	Técnica de secado: secado en bandeja (TD), secado por chorro (SB), microondas combinado con secado por chorro (MWSB), VR y liofilización.	Color, rehidratación, ácido ascórbico y actividad antioxidante total (TAA)	El secado MWSB tuvo buena rehidratación y buena retención de color. La TAA se mejoró después de VR y liofilización. El ácido ascórbico se retuvo mejor en VR, seguido por liofilización, MWSB, SB y TD.
Nindo et al., 2007b	Arándano	Temperatura 95 y 85 °C	Pérdida de vitamina C	Se pierden 32 y 48% de vitamina C respectivamente
	Arándano agri dulce	Técnica de secado: VR y evaporador multi-efecto.	Tono	No presentó pérdida significativa del tono por ningún método.
Ayhan, Hao y Mosbah, 2009	Paprika (<i>Pimiento L. annum</i>)	Técnica de secado: VR, liofilización, horno y secado con aire.	Color reflejado, color extraíble e índice de pardeamiento.	Liofilización y VR mostraron mejores características del color reflejado. El color extraíble e índice pardeamiento fueron más altos secado con aire.

Ochoa et al., 2011	Mango Tommy	Técnica de secado: (VR y secador de bandeja) y espesor de la muestra (1 y 2 mm).	Humedad, cambio de color y difusividad	Para humedades por debajo de 5% bs se necesitaron 30 y 60 min para muestras de 1mm y 2mm, respectivamente en VR y 240min en secado con aire. La diferencia de color no presentó diferencias significativas entre los dos métodos. Las muestras secadas por VR presentaron mayor difusividad.
Vallejo, 2010	Pitahaya amarilla	Secado por VR con y sin pretratamiento osmótico.	Parámetros colorimétricos, pérdida de vitamina C y eficiencia del proceso.	Luminosidad y saturación incrementaron al aumentar el tiempo de proceso, la tonalidad no tuvo efecto significativo. Pérdida de vitamina C fue considerable en los dos tratamientos. La eficiencia sin pretratamiento fue 59-60% y con pretratamiento fue 35-47%.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1. METODOLOGÍA

Fruta: Se empleó guayaba pera proveniente del departamento de Risaralda (Colombia), con grado de madurez 6, medida de acuerdo a la escala que se presenta en la Figura 2 de la Norma Técnica Colombiana (NTC 1263, 1970). El contenido de sólidos solubles de la pulpa fue $7,8 \pm 0,4$ °Brix y el contenido de humedad fue $8,8044 \pm 0,5077$ g agua/g m.s ($0,8970 \pm 0,0059$ g agua/g totales).



Figura 2. Escala de madurez de guayaba

Preparación de las muestras: La guayaba se despulpó, la pulpa se extendió sobre la banda del secador y se hicieron rodajas empleando moldes (Figura 3) para garantizar el espesor (2, 3 o 4 mm) y el diámetro (35 mm).

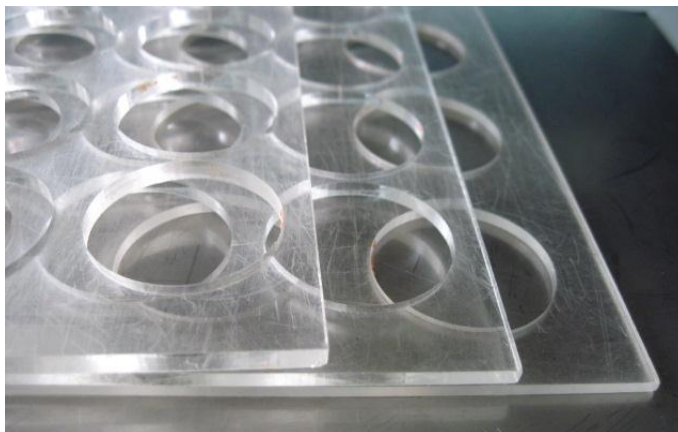


Figura 3. Moldes de acrílico

Equipo: Se empleó un secador de Ventana de Refractancia™ construido por la empresa Centro especializado en ingeniería y robótica (CEI-ROBOTS) de la ciudad de Cali; el diseño se realizó a partir de la información obtenida de las referencias bibliográficas (Abonyi et al., 2001; Nindo et al., 2003a). La velocidad de la banda fue $4,16 \times 10^{-5}$ m/s. En la Figura 4 se presenta el equipo.

Las especificaciones generales del equipo son:

- Tensión de entrada general: 115 VAC 60 Hz.
- Tensión de entrada resistencia 220 VAC 50/60Hz (opcional).
- Requerimiento de corriente máxima: 20-30 A.
- Temperatura máxima de líquido: 90°C (bomba Pedrollo), la bomba recircula el agua a un caudal de 2.74 L/min.
- Peso máximo sobre la banda: 8 gr/cm² (max. 1kg).

- Capacidad de líquido por tanque: 16000 cm³.
- Fluidos peligrosos para el equipo: cualquier tipo de ácido o líquido que corroa el acero inoxidable o el acero al carbón.



Figura 4. Secador de Ventana de Refractancia™

Procedimiento

Las cinéticas de secado se llevaron a cabo a 0, 10, 20, 30, 60 y 120 minutos. En cada tratamiento se extrajeron muestras correspondientes al tiempo de proceso y se les midió contenido de humedad, actividad de agua, color y densidad aparente y real; al final del proceso se avalúo el cambio en la microestructura y la pérdida de vitamina C y de carotenos.

7.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

Se realizó un diseño factorial 3^2 completamente al azar de acuerdo a la Tabla 3, por duplicado.

Tabla 3. Diseño experimental

Factores	Niveles
Espesor de la muestra, mm	2
	3
	4
Temperatura del agua, °C	60
	80
	90

7.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados se analizaron estadísticamente por medio de ANOVA en el programa software R versión 2.13. Adicionalmente se presentan diagramas de caja para cada variable de respuesta. Esto resulta especialmente útil para comprobar, gráficamente, posibles errores en los datos (Simpson et al., 1988, Williamson et al., 1989).

7.4. DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

7.4.1. Humedad

Se empleó el método AOAC 20.013 (AOAC, 1980) para frutas ricas en azúcar, para realizar las cinéticas de humedad.

La relación de humedad (MR) está definida por la Ecuación (1).

$$MR = \frac{W_t - W_e}{W_0 - W_e} \quad (1)$$

Dónde:

W_t (kg kg⁻¹ b.s.): contenido de humedad en el tiempo t

W_e (kg kg⁻¹ b.s.): contenido de humedad de equilibrio

W_0 (kg kg⁻¹ b.s.): contenido de humedad inicial

Las curvas de secado se modelaron con las ecuaciones de Henderson-Pabis (Ecuación 2), Page (Ecuación 3) y Newton (Ecuación 4) (Simal et al., 2005; Doymaz, 2004).

$$MR = n_1 \exp(-k_1 t) \quad (2)$$

$$MR = \exp(-k_2 t^{n_2}) \quad (3)$$

$$MR = \exp(-k_3 t) \quad (4)$$

Los cálculos de regresión no lineal se efectuaron con el programa Polymath 6.10, obteniendo los parámetros empíricos de cada modelo (n y k).

7.4.2. Difusividad

Se empleó la solución analítica de la Ley particular de Fick que describe la difusión de humedad (unidimensional) a través de una lámina infinita de acuerdo la ecuación (5) (Crank, 1975).

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{De(2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2}\right) \quad (5)$$

Dónde:

De (m² s⁻¹): difusividad efectiva

L (m): longitud característica

t (s): tiempo

MR: relación de humedad

La influencia de la temperatura sobre la difusividad y sobre los parámetros de los modelos matemáticos, se evaluó mediante la ecuación (6) de Arrhenius.

$$g = g_0 \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \quad (6)$$

Dónde:

g: parámetro en estudio (De, k₁, k₂ y k₃)

g₀: factor de Arrhenius

Ea (kJ/mol): energía de activación

R (kJ/mol K): constante universal de los gases (0,008314)

T (K): temperatura

7.4.3. Actividad de agua

Se obtuvo empleando un higrómetro de punto de rocío marca Decagón modelo CX-1, con una sensibilidad de 0,001.

7.4.4. Color

Se obtuvieron las coordenadas de color CIE-L*a*b* a través del espectro reflexión entre 400-780 nm, con un espectrocolorímetro Hunter Lab. Se calculó la diferencia de luminosidad (ΔL^*) con la Ecuación (7), utilizando como referencia el iluminante D65 y el observador 10°. A partir de estas coordenadas se estimaron las coordenadas psicométricas croma (C^*_{ab}) y diferencia de color (ΔE^*) mediante las ecuaciones (8 y 9), respectivamente.

$$\Delta L^* = L_i - L_f \quad (7)$$

$$C^*_{ab} = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (8)$$

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (9)$$

Dónde:

L* : luminosidad (-100, negro; 100, blanco)

a* : (verde (-) rojo (+))

b* : (azul (-) amarillo (+))

7.5. DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES ESTRUCTURALES

7.5.1. Densidad aparente, densidad real y porosidad

La densidad aparente (ρ_a) se determinó por el método de desplazamiento de volumen empleando un picnómetro, con agua destilada como líquido de referencia y utilizando la ecuación (10). La densidad real (ρ_r) se determinó empleando la ecuación (11) (Lewis, 1993).

$$\rho_a = \frac{P_2}{P_1 + P_2 - P_3} \quad (10)$$

$$\rho_r = \frac{1}{\frac{X_w}{996,86} + \frac{1 - X_w}{1590}} \quad (11)$$

Donde

P₁: peso del picnómetro enrasado de agua destilada (g)

P₂: peso del trozo de fruta (g)

P₃: peso del picnómetro, el trozo de fruta y el agua (g)

X_w: fracción másica de agua en la muestra

La porosidad se calculó a partir de los valores de (ρ_a) y (ρ_r) de acuerdo a la ecuación (12).

$$\varepsilon = \frac{(\rho_r - \rho_a)}{\rho_r} (100) \quad (12)$$

7.5.2. Microestructura

Se realizó un pre-tratamiento de deshidratación y baño de oro en el laboratorio de investigación de virología en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), posteriormente se tomaron microfotografías, en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería de materiales de la Universidad del Valle, con un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), Modelo JSM 6490LV, Marca JEOL y un Espectrómetro de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS), Modelo INCAPentaFET-x3, Marca OXFORD Instruments.

7.6. DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES NUTRICIONALES

7.6.1. Vitamina C

Se calculó por el método de yodometría aplicando la ecuación (13) en unidades de mg ácido ascórbico por 100g de muestra (**Ciancaglini et al., 2001**).

$$\text{Acido ascórbico} = \frac{(A)(B)(176,23)}{2(C)} \quad (13)$$

Donde

A (ml): volumen de yodo gastado en la titulación

B(N): normalidad del yodo

C (g): peso de muestra

7.6.2. Carotenoides

Se empleó el siguiente protocolo de extracción (**Mejía, 2006**).

- Pesar 4 ± 0.1 g de muestra
- Adicionar 10 ml de etanol y 20 ml éter de petróleo
- Agitar durante 15 min.
- Filtrar
- Adicionar 10 ml de etanol
- Mezclar la solución y 10ml de agua en un balón de separación
- Extraer la fase etérea

- Verter 0,5 g de sulfato de calcio y la fase etérea en un balón de 25ml y aforar con éter
- Reposar 15min para leer la absorbancia de la solución en el espectrofotómetro

El contenido de carotenos totales (g por g de muestra seca) se calcula empleando la ecuación (14) **(Davies, 1976)**.

$$CC = \frac{(A)(V)(104)}{(P)(C)\left(\frac{1}{(1-H)}\right)} \quad (14)$$

Dónde:

A: absorbancia a 450 nm

V (ml): volumen de la solución antes de la lectura

P (g): peso de la muestra

H: humedad en base húmeda de la muestra

C: coeficiente de absorción del β -caroteno (en éter de petróleo es 2592).

La pérdida de carotenos totales (PC) se calculó empleando la ecuación (15).

$$PC = \frac{CM_0 - CM_f}{CM_0} (100) \quad (15)$$

Donde

CM₀: contenido de carotenos en la muestra fresca

CM_f: contenido de carotenos finales.

8. RESULTADOS

8.1. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS

8.1.1. Humedad

En las Figuras 5 y 6 se muestran las curvas de secado a espesores de 2, 3 y 4 mm, y a temperaturas del agua de 60, 80 y 90°C (en la Tabla A.11 del anexo se presentan los datos experimentales). En la primera figura se observa la influencia de la temperatura incrementando la velocidad de secado y un descenso en el tiempo de secado a medida que el espesor disminuye. Ambos factores tuvieron efecto significativo sobre la humedad. Los resultados del ANOVA (ver anexo A.1) muestran que la variable temperatura tiene mayor efecto que el espesor, mientras que la interacción espesor-temperatura no tiene efecto significativo en la variable humedad.

Se llega a humedades menores a 0,0619 g agua/g m.s (0,0571 g agua/g totales) al final del proceso (2 horas) en las muestras sometidas a 80 y 90°C en los tres espesores (2, 3 y 4mm) pero a 60°C sólo se logra esta humedad con las muestras de

2mm, lo que sugiere desde el punto de vista de pérdida de agua que a 60°C no se debe trabajar a espesores mayores a 2mm en pulpa de guayaba.

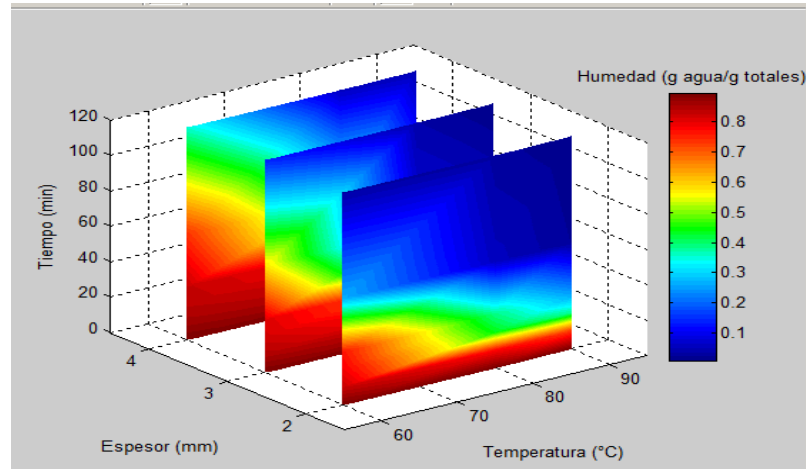


Figura 5. Efecto de la temperatura, el espesor y el tiempo sobre la humedad (g agua/g total) de pulpa de guayaba

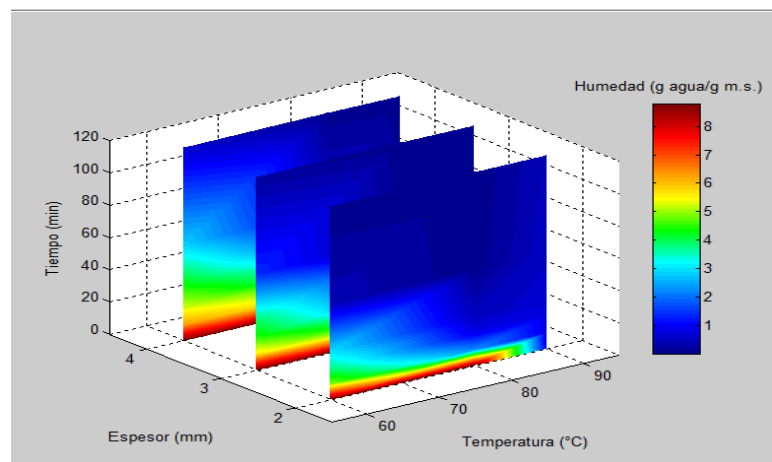


Figura 6. Comportamiento de la humedad (g agua/g m.s.) de pulpa de guayaba, relacionando temperatura, espesor y tiempo

Cano y Viveros (2009) estudiaron el secado de rodajas de 2 mm de espesor de guayaba con semilla y naranja por el método VR a 80 y 90°C. Los autores encontraron que en las muestras de naranja el tiempo para disminuir la humedad a cualquier nivel depende de la temperatura utilizada, durante el proceso las muestras secadas a 90 y 80°C requieren 45 y 60 min, respectivamente para llegar a una humedad de 0,091g agua/g m.s. Mientras que en las rodajas de guayaba no presentaron un descenso importante del contenido de humedad con el aumento de la temperatura del agua, tardando 90 min para alcanzar humedades de aproximadamente 0,2(g agua/g m.s.). Este tiempo tan prolongado en comparación con el necesario para alcanzar una humedad similar en este trabajo (28 min), se atribuye a las semillas presentes en el material, las cuales en su estructura contienen agua difícil de remover.

Ochoa et al. (2011) estudiaron el efecto del espesor en el secado por VR de rodajas de mango de 1 y 2 mm de espesor, a una temperatura del agua de 92°C. Los autores determinaron que para alcanzar humedades por debajo de 0,05 (g agua/g m.s.) se necesitaron 30 y 60 min para muestras de 1 y 2 mm, respectivamente, corroborando el efecto del espesor sobre el tiempo de secado. En este trabajo se obtuvo un resultado similar en las muestras de 2 mm a 90°C (humedad de 0,06 g agua/g m.s. a 60 min), posiblemente debido a que ambos productos tienen porosidades similares en estado seco (10% en el mango y 13% en la guayaba a una humedad de 1,5(g agua/g m.s.)).

En la Figura 6 se observa que a 90°C las muestras de 2, 3 y 4 mm requirieron 47,4, 58,8 y 100,8 minutos, respectivamente para disminuir su humedad por debajo de 0,1 g agua/g m.s. **Nindo et al. (2003b)** en el secado a 95°C de puré de espárragos (humedad inicial de 21 g agua/g m.s.) encontraron que el tiempo necesario para que las muestras alcanzaran valores de humedades por debajo de 0,1 g agua/g m.s. fue

4,44 minutos. Este menor tiempo en el secado de espárragos se debe a que el puré de éstos fue atomizado y se obtuvo una capa de poco espesor del producto sobre la banda (menos de 1 mm). Mientras que la guayaba necesitó más tiempo de residencia sobre la banda, porque a mayor espesor mayor es el tiempo para que la radiación infrarroja refleje y se evapore el agua de la fruta.

Abonyi et al. (2001) evaluó el método de VR secando fresa de 1mm de espesor y puré de zanahoria a 95°C, en tiempos entre 3-5 minutos las muestras de zanahoria alcanzaron humedades de 0,86 g agua/g m.s. y las de fresa de 0,91 g agua/g m.s; comparativamente, para llegar a este rango de humedad en la muestra de pulpa de guayaba de 2mm a 90°C, transcurrieron 18 min.

En la Figura 7 se presenta la relación entre el espesor y el tiempo a las temperaturas de estudio (60, 80 y 90°C) a un contenido de humedad fijo de 0,9 g agua/g m.s (0,4737 g agua/g totales). Se observa la relación lineal que existe entre las dos variables con un aumento en la pendiente a medida que aumenta la temperatura. Estas relaciones permiten predecir el tiempo necesario para secar muestras a las tres temperaturas de estudio y extrapolar a espesores menores de 2 mm (para 1mm de espesor a 90°C el tiempo es 10 minutos, comparando con el estudio mencionado de **Abonyi et al. (2001)**, este tiempo todavía es mayor, probablemente debido a la temperatura de trabajo de 95°C, demostrando una vez más el efecto del espesor y la temperatura del agua).

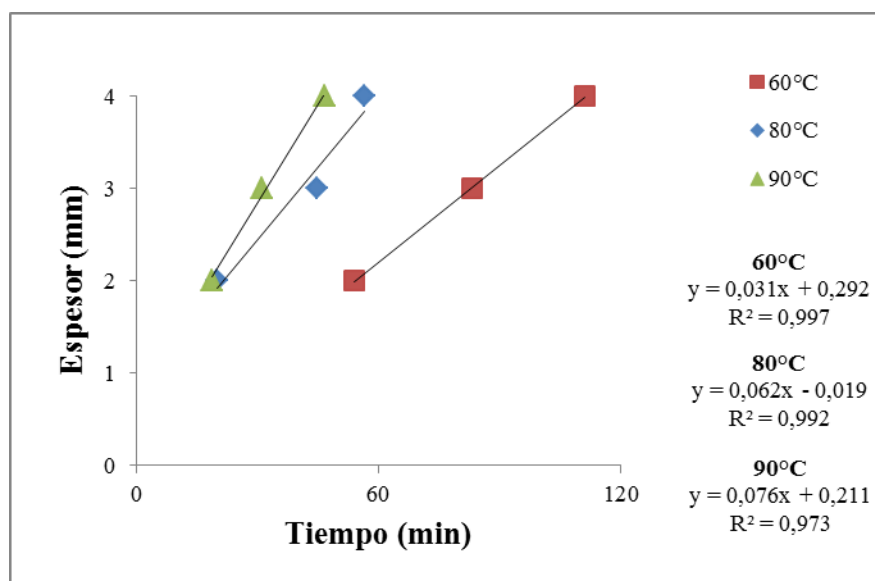


Figura 7. Relación de espesor - tiempo a contenido de humedad de 0,9 g agua/g m.s

Modelamiento del secado

En Tabla 4 se muestran los parámetros de cada modelo ajustado, el coeficiente de determinación y la raíz cuadrada media de la desviación (RMSD). Se observa que los tres modelos tuvieron un buen ajuste. El parámetro n no presenta una tendencia en el modelo de Page, mientras que en el modelo de H-P, este parámetro disminuye a mayor espesor y a menor temperatura. Por otro lado, las constantes k aumentan con la reducción del espesor y con el aumento de la temperatura con valores entre 0,02 y 0,167. Este parámetro se ha relacionado con el comportamiento de la velocidad de secado lo que significa que a mayor temperatura y menor espesor la tasa de secado es

mayor (Vega et al., 2007a). En las Figuras 8 se muestran el ajuste del modelo de Page a los datos experimentales.

Tabla 4. Parámetros de los modelos matemáticos empleados para el secado por VR de pulpa de guayaba

	Herderson y Pabis (H-P)				Page				Newton		
Tratamiento	k₁	n₁	r²	RMSD	k₂	n₂	r²	RMSD	k₃	r²	RMSD
60-2	0,043	0,970	0,980	0,019	0,078	0,823	0,985	0,020	0,045	0,978	0,020
60-3	0,031	0,963	0,983	0,017	0,056	0,837	0,987	0,015	0,032	0,980	0,019
60-4	0,023	0,956	0,981	0,017	0,043	0,842	0,985	0,015	0,025	0,976	0,019
80-2	0,129	0,997	0,997	0,008	0,167	0,713	1,000	0,001	0,130	0,997	0,008
80-3	0,056	0,995	0,998	0,007	0,062	0,969	0,997	0,007	0,057	0,997	0,007
80-4	0,039	0,980	0,989	0,015	0,053	0,912	0,990	0,014	0,040	0,988	0,015
90-2	0,120	1,002	0,999	0,004	0,077	1,178	1,000	0,001	0,120	0,999	0,004
90-3	0,075	0,988	0,992	0,013	0,129	0,813	0,995	0,010	0,076	0,992	0,013
90-4	0,062	0,980	0,992	0,013	0,121	0,778	0,997	0,008	0,063	0,989	0,014

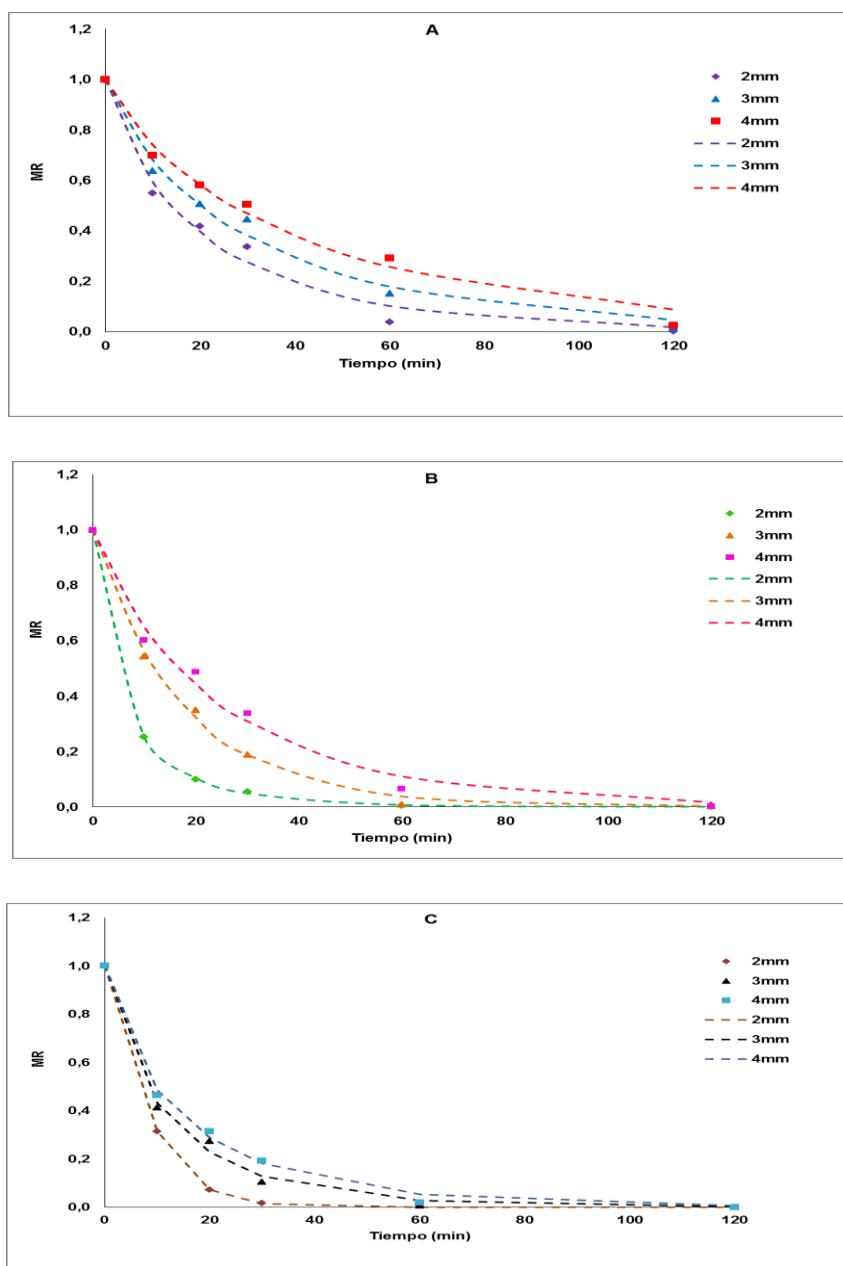


Figura 8. Ajuste del modelo de Page (A) 60°C, (B) 80°C, (C) 90°C

Senadeera et al. (2003) establecieron que el parámetro n de Page es constante, ya que del resultado del análisis de varianza, obtuvieron un valor $p > 0.05$ lo que significa que no existe diferencia estadísticamente significativa con respecto a la temperatura entre el rango de 30 a 50° C, en productos como habas, papas y habichuelas, para un rango de valores de 1.06 a 2.05. Por otra parte, **Vega et al. (2007b)** concluyeron que este parámetro depende del tipo de producto que se va a deshidratar y no de la temperatura de secado.

Doymaz (2005) trabajando con okra (*Abelmoschus esculentus*) secada por aire caliente, aplicando los modelos Herderson-Pabis y Page, calculó un rango para los parámetros cinéticos k_1 y k_2 , de 0.003-0.007 min^{-1} para k_1 y 0.001-0.003 min^{-1} para k_2 . También **Doymaz y Pala (2003)** modelaron el secado de maíz entero con los modelos de Herderson-Pabis y Page y presentaron un rango de 0.001-0.014 min^{-1} para k_1 , y 0.012-0.017 min^{-1} para k_2 . **Panchariya et al. (2002)** trabajando con té negro secados por aire caliente los modelos de Newton, Herderson-Pabis, Page y Page modificado, presentaron sólo un rango para el parámetro cinético k , de 0.0017 – 0.0046 min^{-1} . En la Tabla 4, se puede observar que la pulpa de guayaba presenta mayor valor del parámetro k (0.023 – 0.167 min^{-1}) comparándolo con los estudios anteriores; este comportamiento (mayor velocidad de secado) se atribuye a la técnica de secado (VR), al tipo de material y al área superficial de secado.

8.1.2. Difusividad

El modelo difusional de Fick considera que el transporte de agua desde el interior del sólido hacia la superficie del mismo tiene lugar principalmente por difusión, calculándose de este modo un coeficiente de difusión efectivo (**Kaymak-Ertekin. 2002**).

En la Tabla 5 se presentan los valores de difusividad efectiva calculados a partir de la Ecuación (5). Se emplearon 2 términos de la sumatoria.

Marinos-Kouris y Maroulis (2006), recopilaron los datos publicados sobre valores de coeficientes de difusión de algunos materiales comunes, y señalan que la difusividad de los alimentos normalmente se ubica en un rango de 10^{-13} a 10^{-6} m²/s, y la mayoría de ellos (82%) están acumulados en la región de 10^{-11} a 10^{-8} . En el presente estudio, los valores de difusividad se encuentran dentro de dicho intervalo, como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5. Coeficiente de difusividad efectiva en el secado de pulpa de guayaba en VR

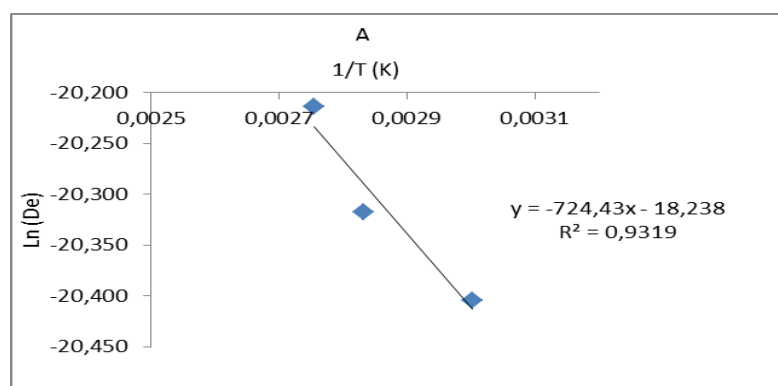
Tratamiento	Difusividad efectiva (m ² /s)	r ²
60-2	1,376E-09	0,991
60-3	2,088E-09	0,993
60-4	3,248E-09	0,965
80-2	1,500E-09	0,917
80-3	3,402E-09	0,942
80-4	5,760E-09	0,990
90-2	1,664E-09	0,920

90-3	3,753E-09	0,967
90-4	5,968E-09	0,990

Se puede observar que con el aumento de la temperatura y el aumento del espesor se presenta un aumento en el coeficiente de difusión, esto se debe a que durante el secado es necesario evaporar el agua que existe tanto sobre la superficie como la del interior del sólido. Cuando la humedad es alta (muestra de mayor espesor), la evaporación, transcurre sobre la superficie totalmente mojada y el líquido se renueva continuamente por difusión rápida desde el interior del sólido y este proceso es más rápido a temperaturas mayores **(Kneule, 1966)**.

Influencia de la temperatura

A partir de la ecuación de Arrhenius (Ecuación 6) se consigue una dependencia lineal efectiva entre $\ln g$ (De o k_i) y el recíproco de la temperatura (K) como se observa en la Figura 9 (muestra de 2mm).



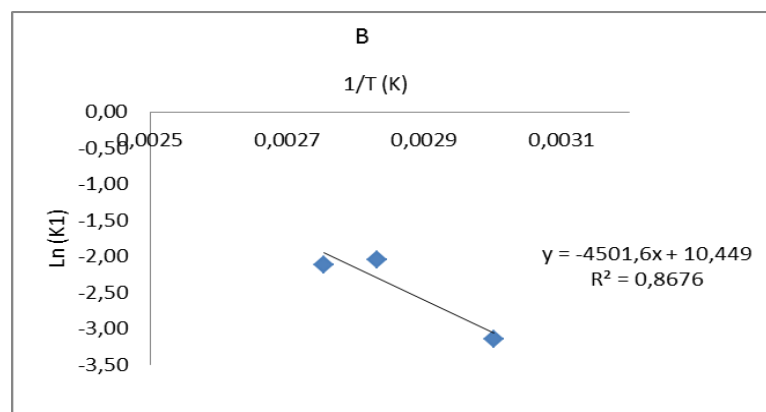


Figura 9. Correlación de la difusividad (A) y la constante k_i (B) durante el secado de pulpa de guayaba en función de la temperatura

En las Tablas 6 y 7 se presentan los valores de la energía de activación los cuales están dentro del rango establecido (12,7–110 kJ/mol) para la mayoría de los alimentos (Zogzas, Maroulis y Marine-Kouris, 1996), sólo los datos calculados a partir de la difusividad y de la k del modelo de Page en las muestras de 2 mm, presentan un valor por fuera del rango de 6,02 y 9,14 respectivamente.

Tabla 6. Energía de activación (E_a) y factor de Arrhenius calculados a partir de la difusividad

Espesor (mm)	E_a (kJ/mol)	Factor de Arrhenius (m^2/s)
2	6,02	1,20043E-08
3	20,34	3,28876E-06
4	21,63	8,26897E-06

Tabla 7. Energía de activación (kJ/mol) calculada a partir del parámetro k_i de cada modelo

Espesor (mm)	Herderson y Pabis	Page	Newton
2	37,43	9,14	36,04
3	30,10	24,42	28,56
4	31,94	30,44	30,23

De las Tablas 6 y 7 se observan valores de E_a entre 6 y 37 kJ/mol. A menor espesor requiere menos energía para iniciar la difusión de la humedad y como era de esperarse el menor valor de E_a se presenta en las muestras de 2mm. **Vitali y Rao (1982)** también estudiaron el puré de guayaba y obtuvieron un valor de E_a de 15,49 kJ/mol a 9,8 a 16 °Brix en un rango de 25 a 60°C.

Chong et al. (2008) en la fruta Chempedak encontraron un valor de energía de activación de 6.803 kJ/mol. Mientras que **Gazar (1998)** calculó la energía de activación de muestras de puré de melocotón encontrando que varían entre 8,41 kJ/mol, para muestras de 11 °Brix, y 13,68 kJ/mol para las de 24 °Brix. **Lozano y Ibarz (1992)** encontraron valores de E_a de 10,5 kJ/mol al estudiar la influencia de la temperatura en melocotón de 34,2 °Brix en el rango de temperaturas de 30-55°C.

Al analizar los datos de energía de activación calculados a partir de los datos de la difusividad y de los parámetros k de los 3 modelos estudiados, se observa que las energías de activación calculadas a partir del modelo de Page son similares a los valores calculados a partir de la difusividad, esto permite afirmar que este modelo además de tener un buen ajuste describe un adecuado comportamiento a nivel de

transferencia de masa. Debido a que valores de E_a calculados por difusividad y modelo de Page son similares, estos parámetros k del modelo de Page representan un comportamiento pseudo-difusional bajo las condiciones estudiadas de temperatura y espesor, este comportamiento también se encontró en aloe vera y gracilaria chilena (Vega et al., 2007a; Vega et al., 2007b).

Los valores del factor de Arrhenius calculados a partir de la difusividad se presentan en la Tabla 7. Estos valores representan el máximo valor que podría tomar el coeficiente de difusividad, cuando la temperatura tiende a infinito. El aumento en el valor del coeficiente de Arrhenius, implica una débil resistencia a la difusión a mayor espesor (Turhan y Kaletunç, 1992).

8.1.3. Actividad de agua

La forma como el agua está enlazada a la estructura interna del alimento, el grado en el cual se halla disponible para ser evaporada o en el cual se encuentra químicamente enlazada y no disponible, puede reflejarse por la propiedad de actividad de agua del material (Labuza y Saltmarch, 1981). En la Figura 10, se observa que la mayoría de los tratamientos presentan actividades de agua menores a 0,5 al final del proceso, este valor es suficientemente bajo para inhibir la actividad microbiana obteniendo productos estables microbiológicamente (Fellows, 1994).

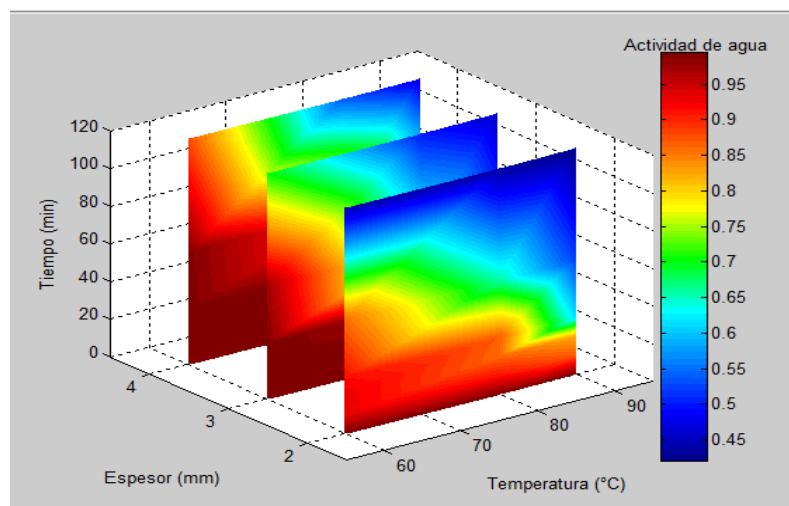


Figura 10. Comportamiento de la actividad de agua en el secado de pulpa de guayaba.

Las muestras sometidas a 60°C a espesores de 3 y 4mm y a 80°C con espesor de 4mm, presentan valores mayores a 0,5 después de dos horas de secado, lo que genera productos más propensos a ataques microbianos, el agua de estas muestras está más comprometida con las diversas estructuras atómicas y moleculares de producto al final de proceso, y tiene tendencia a escapar del alimento y aumentar la presión parcial de vapor de agua en los sitios vecinos, incrementándose de esa forma la actividad de agua (**Bello, 2000**). En la Figura 10 se puede observar que las muestras de 2mm secadas a las tres temperaturas presentan después de dos horas, un producto con similares actividades de agua, lo cual indica que a este espesor desde el punto de preservación es similar someter la pulpa de guayaba a una temperatura de 90°C que a 60°C a 120min (aunque a 90°C se obtiene un producto con $aw < 0.5$ con 60 min de secado). De acuerdo a los resultados se obtiene un producto estable a nivel microbiológico con espesores de 2mm a las tres temperaturas (60, 80 y 90°C), 3mm a

80 y 90°C y 4mm a 90°C. En la actividad de agua, la temperatura y el espesor presentan diferencias significativas ($p < 0,05$) a través del proceso.

8.1.4. Color

El color es uno de los atributos de calidad de mayor relevancia en la decisión del consumidor. Se analizaron los cambios experimentados en las muestras de pulpa de guayaba en función del tiempo de tratamiento, para cada temperatura y espesor de estudio.

La Figura 11 se muestra la evolución de la diferencia de la luminosidad (ΔL^*) (Ecuación 7) respecto al valor de L^* de la pulpa fresca.

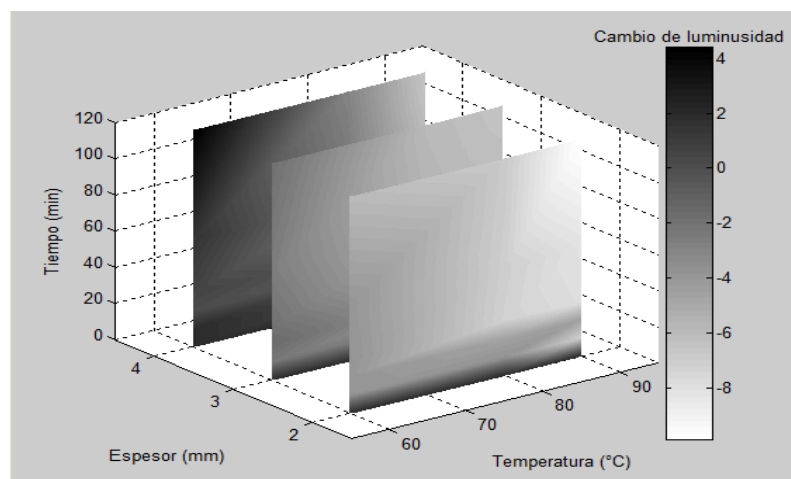


Figura 11. Comportamiento del cambio de luminosidad de pulpa de guayaba durante el secado

Se observa un aumento del parámetro L^* en la mayoría de los tratamientos a través del proceso, siendo más pronunciado para los tratamientos con el menor espesor (2mm) y mayor temperatura (90°C). Este fenómeno se atribuye a la reducción de los pigmentos (carotenos) de la guayaba por efecto de las altas temperaturas, ocasionando luminosidad a las muestras.

Sólo las muestras sometidas a 60°C y 4 mm presentan pérdida de luminosidad (ΔL^* positivo) a una actividad de agua de 0,8759. Esto puede explicarse si se tiene en cuenta que la velocidad máxima de pardeamiento ocurre típicamente en el rango de actividad de agua de mayores a 0.75 (**Labuza y Saltmarch, 1981**) y se intensifica cuando el alimento se expone al ambiente y a temperaturas bajas las cuales no logran inactivar las enzimas (**Fujita et al., 1995; Zhou y Feng, 1991**).

Severini et al. (2003) explican que debido a la alta actividad de agua y la baja temperatura, los pigmentos (carotenos) son más susceptibles al pardeamiento enzimático, donde la peroxidasa (POD), ha sido vinculada junto con la polifenoloxidasas (PFO) como las responsables del pardeamiento enzimático produciendo pigmentos pardos-marrones sobre la superficie de frutas y vegetales durante su procesamiento. Los factores que determinan este tipo de pardeamiento son: la presencia de PPO y POD, la concentración de compuestos fenólicos, el pH, la temperatura, la disponibilidad de oxígeno y la actividad de agua.

Analizando las muestras a un mismo contenido de humedad de 0,35(kg agua/kg total) presentadas en la Figura 12, se observa también la tendencia de aumento de luminosidad en los tratamientos a medida que aumenta la temperatura y disminuye en

espesor, lo que sugiere que esta tendencia está relacionada con la modificación de los pigmentos de la guayaba (carotenos) y no únicamente con su concentración.

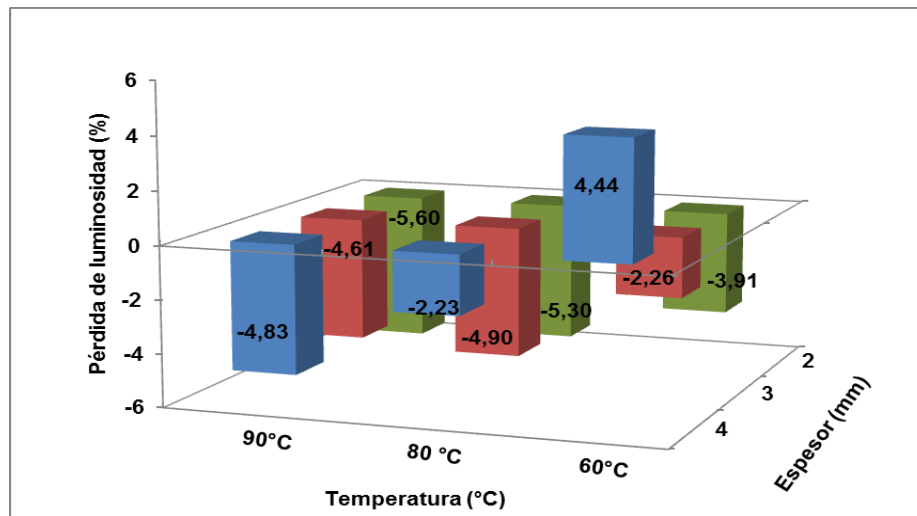


Figura 12. Luminosidad de pulpa de guayaba a humedad de 0,35(kg agua/kg total)

En la Figura 13 se presenta el comportamiento del croma o pureza de color de las muestras secadas durante 120 minutos. Un valor alto significa que tiende a un color más puro sin mezcla de otros colores. La mayor pureza de color se presenta para los tratamientos de mayor temperatura y menor espesor porque el color tiende a ser uniforme. Este comportamiento puede atribuirse a que pigmentos de la fruta se degradan dando un color uniforme en la muestra como se ve en la Figura 14. En resultados encontrados por **Nindo et al. (2003b)** aplicando el método por VR en el secado de espárrago encontraron que la clorofila se concentró en el producto final.

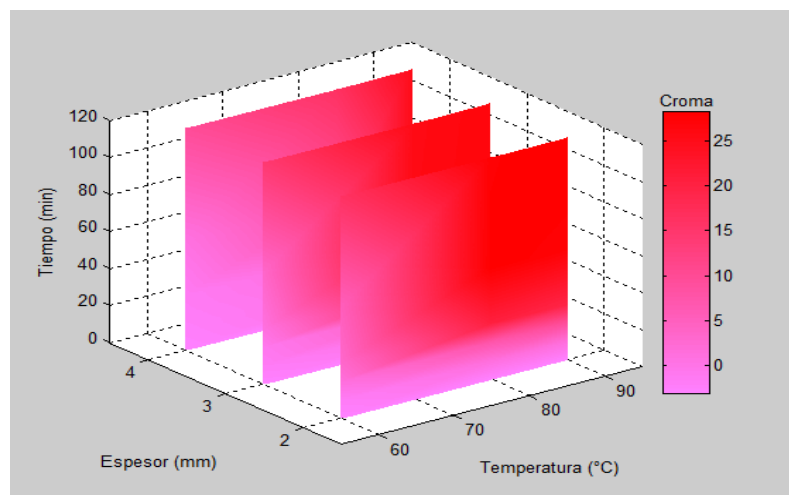


Figura 13. Comportamiento del croma de pulpa de guayaba, relacionando temperatura, espesor y tiempo

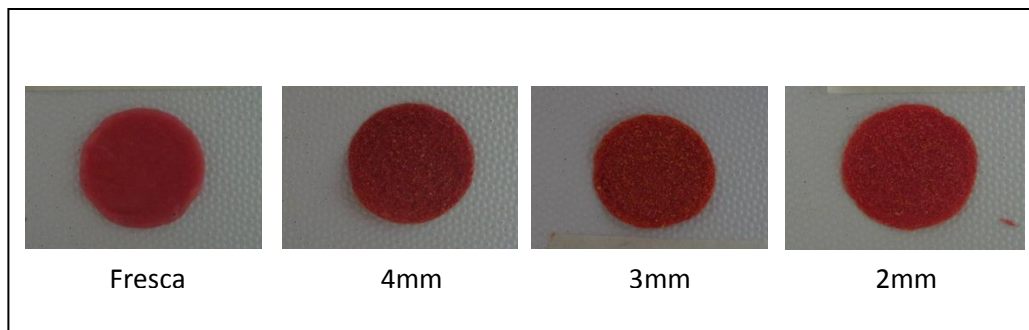


Figura 14. Muestras de guayaba fresca y secadas a 80°C después de 120 minutos

El principal parámetro para describir la variación del color es la diferencia de color (ΔE^*), ya que refleja el cambio total en los parámetros L^* , a^* y b^* . En la Figura 15 se

muestra la evolución de la diferencia de color respecto al tiempo de proceso; puede notarse que en todos los tratamientos se presentó variación de color, evidenciándose mayores cambios de color en los tratamientos sometidos a mayor temperatura y menor espesor. Estos resultados, se deben a la ganancia de luminosidad y croma. Según **Bodart et al. (2008)**, un valor de $\Delta E^* > 3$ indica diferencias de color apreciables por el ojo humano, este comportamiento se evidencia en la Figura 14.

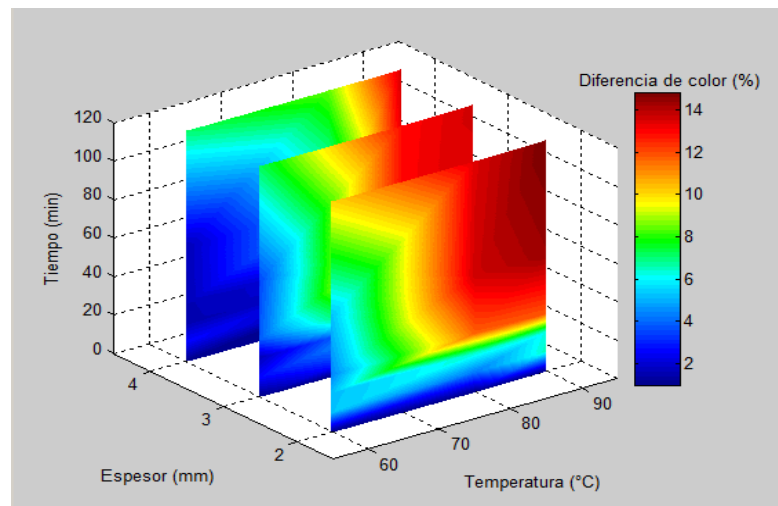


Figura 15. Comportamiento de la diferencia de color de pulpa de guayaba

En las Figuras 16 y 17 se observa la influencia de la temperatura, el espesor y la actividad de agua sobre la diferencia de color en las muestras durante el secado. A menor actividad de agua es mayor la diferencia de color. En todas las variables del color se presenta diferencia significativa en las temperaturas y los espesores del estudio ($p < 0,05$). En el caso del secado con aire, se ha observado que la temperatura y

actividad acuosa tienen marcada influencia sobre la velocidad de pardeamiento (Bruin et al., 1980; Okos et al., 1992; Pezzutti y Crapiste, 1997).

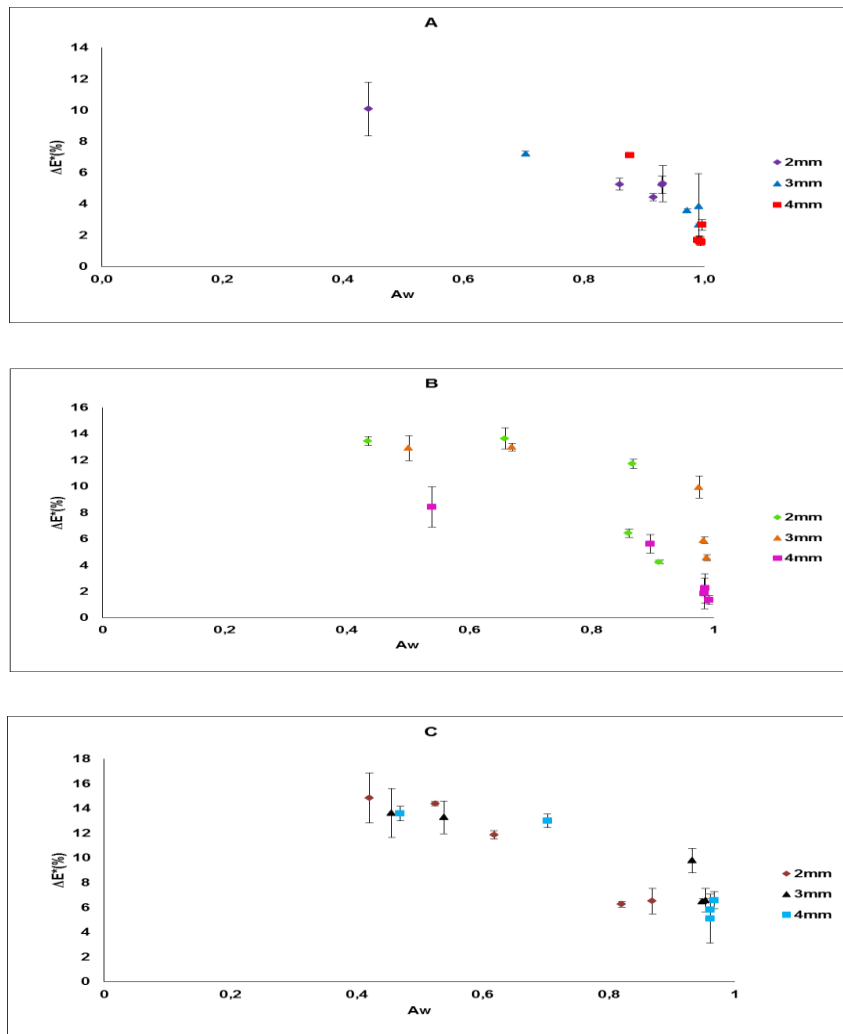


Figura 16. Efecto del espesor sobre la diferencia de color vs actividad de agua de pulpa de guayaba a (A) 60°C, (B) 80°C y (C) 90°C

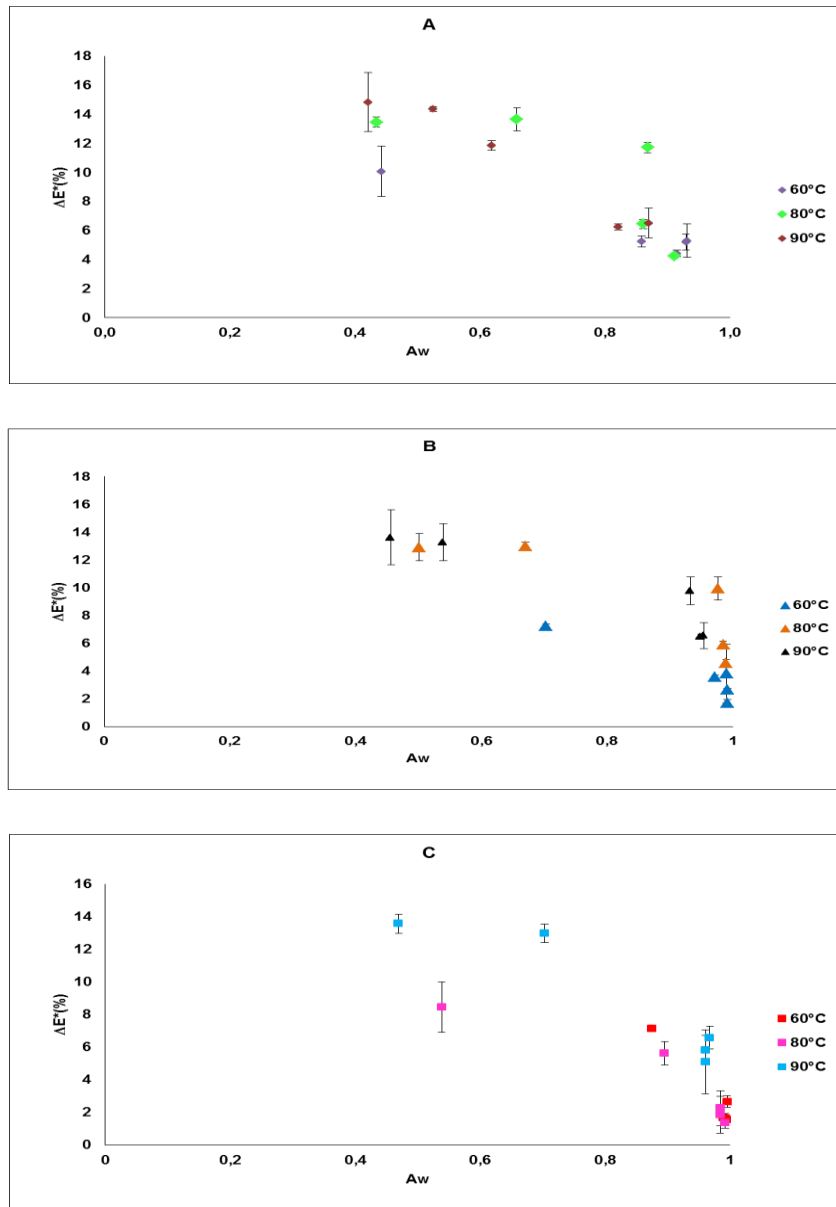


Figura 17. Efecto de la temperatura sobre la diferencia de color vs actividad de agua de pulpa de guayaba a (A) 2mm, (B) 3mm y (C) 4mm)

8.2. DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES ESTRUCTURALES

8.2.1. Densidad real, densidad aparente y porosidad

Los cambios en los volúmenes relativos de las fases líquida y gaseosa del tejido ocasionan cambios en la porosidad del material. Su análisis contribuye a clarificar los cambios estructurales ocurridos. A partir de los datos de masa y volumen de las muestras a diferentes tiempos de tratamiento se estimó la variación de densidad aparente (ρ) (Figura 18). Así mismo, considerando el contenido de agua de cada muestra y suponiendo que el resto de los componentes son carbohidratos con densidad 1590 kg/m^3 (Lewis, 1993), se estimó la densidad real (ρ_r) mediante la Ecuación 11. A partir de los valores de densidad real y aparente se calculó la porosidad (ecuación (12)).

En las Figuras 18 y 19 se observa la tendencia de aumento de las densidades real y aparente. La densidad real aumenta a medida que el agua se elimina tendiendo al valor de la densidad de los sólidos secos (Krokida y Maroulis, 2001). La densidad aparente tiene el mismo comportamiento aumentando hasta el valor de la densidad aparente de los sólidos secos al perder humedad (Krokida y Maroulis, 2001). A nivel estadístico se encontró que la temperatura y el espesor, tienen efecto significativo en la densidad real, la densidad aparente y la porosidad.

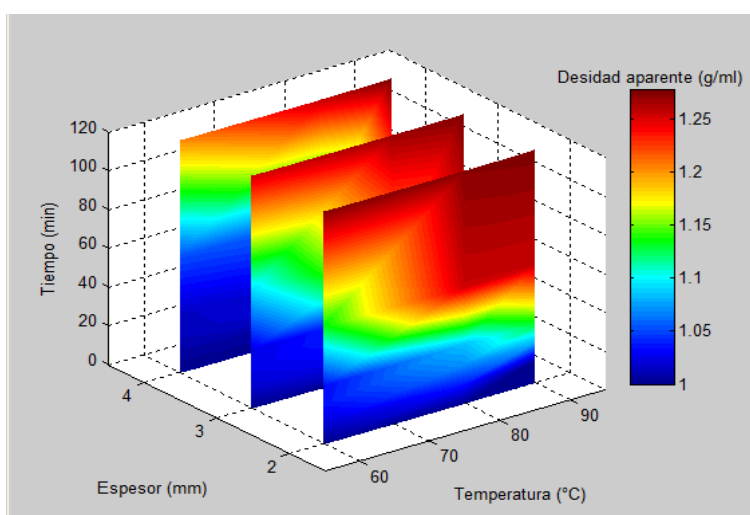


Figura 18. Comportamiento de la densidad aparente en el secado de pulpa de guayaba

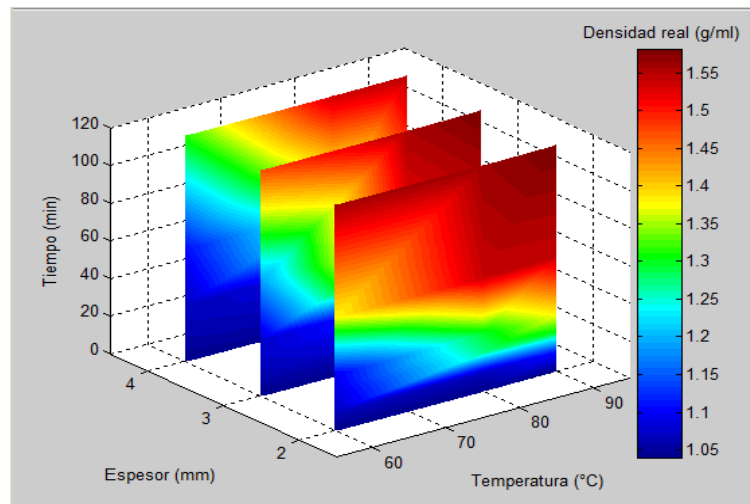


Figura 19. Comportamiento de la densidad real en el secado de pulpa de guayaba

En los productos deshidratados otra propiedad importante es la porosidad, ya permite decidir sobre la aplicación industrial del producto procesado ya sea rehidratado o crujiente. Como la definen **Valle et al. (1998)**, la porosidad es una medida de la capacidad de almacenamiento de agua que poseen los alimentos. En la Figura 20 se observan los valores de las porosidades a través del tiempo del proceso de secado.

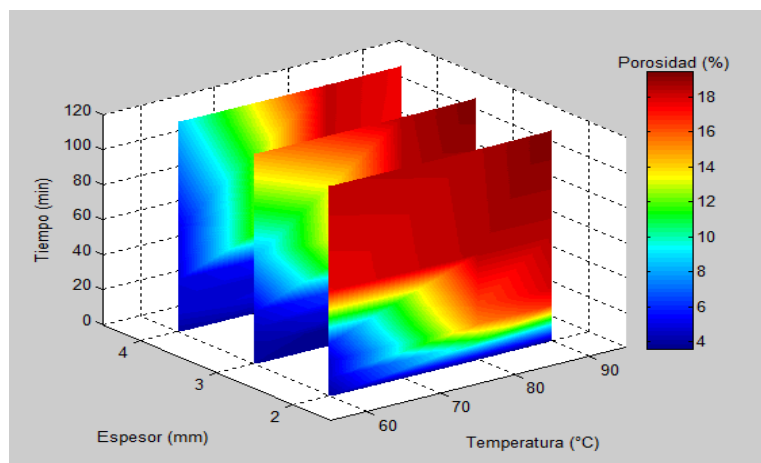


Figura 20. Comportamiento de la porosidad de pulpa de guayaba, relacionando temperatura, espesor y tiempo

La guayaba sin despulpar presenta una porosidad entre 6,4 y 7,4% (**Panadés, 2000**), y la pulpa tiene una porosidad de $3,838 \pm 0,307\%$, lo que significa que hay una reducción de $3,062 \pm 0,1926\%$ en el proceso de despulpado. Esta baja porosidad puede atribuirse daños estructurales en el proceso de despulpado.

La guayaba presenta baja porosidad comparada con otras frutas como manzana (24%) (**Nieto et al., 2004**), piña (11%) (**Yan et al., 2008**) y papaya (8,8%) (**Chavarro et al., 2006**). Se observa que las muestras de menor espesor sometidas a mayor temperatura son más porosas, debido a que la tasa de evaporación es mayor a estas condiciones, es decir el agua sale rápidamente de la estructura generando poros más grandes.

Al comparar los tratamientos para un contenido de humedad de 0,35(kg agua/kg total), se observa un comportamiento similar (Figura 21), debido a que esta variación en la porosidad se atribuye a la tasa de evaporación, este fenómeno es más rápido al aumentar la temperatura y disminuir el espesor. Esto significa que el agua de las muestras de menor espesor y mayor temperatura sale sin dificultad y por esto presenta menor porosidad.

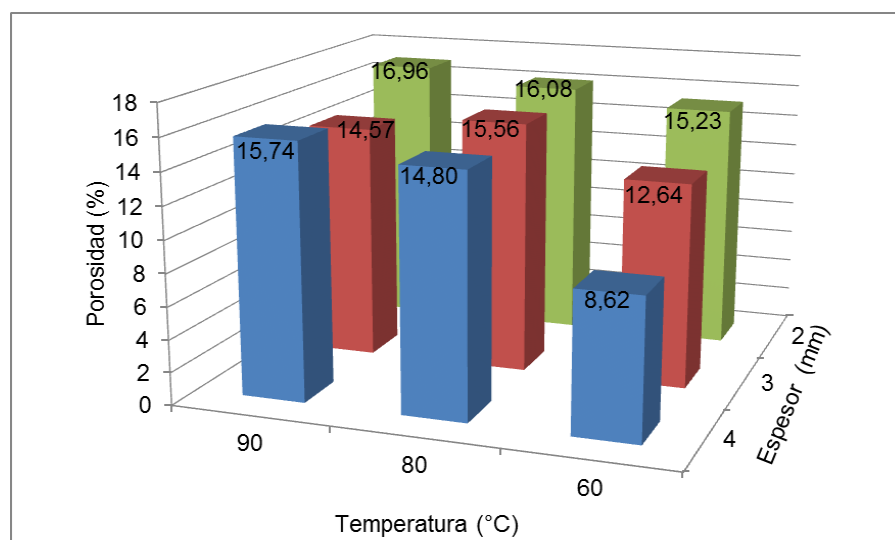


Figura 21. Porosidad de pulpa de guayaba a humedad de 0,35(kg agua/kg total)

8.2.2. Microestructura

En la Figura 22 se observa la estructura microscópica de la pulpa de guayaba fresca (porosidad: $3,838 \pm 0,3074\%$). En las Figuras 23 a 28 se presentan las morfologías de las rodajas de pulpa de guayaba de espesores de 2 y 3 mm secadas a 60, 80 y 90°C, después de 120 minutos de proceso de secado. Después de secar, la estructura fue notablemente diferente de la muestra fresca; las muestras secas se observan porosas, mientras que la muestra de fresca se relativamente densa. La formación de poros después del secado se debe a la evaporación del agua dentro de las muestras. Tal fenómeno a su vez conduce al desarrollo de la presión interna y la rotura de los tejidos, resultando en la formación de poros. Como se muestra en las figuras, los poros producidos son de forma irregular y tamaño aleatorio. El desarrollo de los poros depende fuertemente de la temperatura del agua empleada, las muestras más porosas (porosidad: 19,412%) se observan a 90°C y 2mm, mientras las muestras sometidas a temperatura de 60°C presentan menos porosidad, estos resultados numéricos se pueden corroborar de forma visual en las fotografías SEM. Este comportamiento de relación entre el aumento de la temperatura y la porosidad, se ha presentado en varias frutas como el banano y la manzana (Prachyawarakorn et al., 2008; Vega et al., 2012).

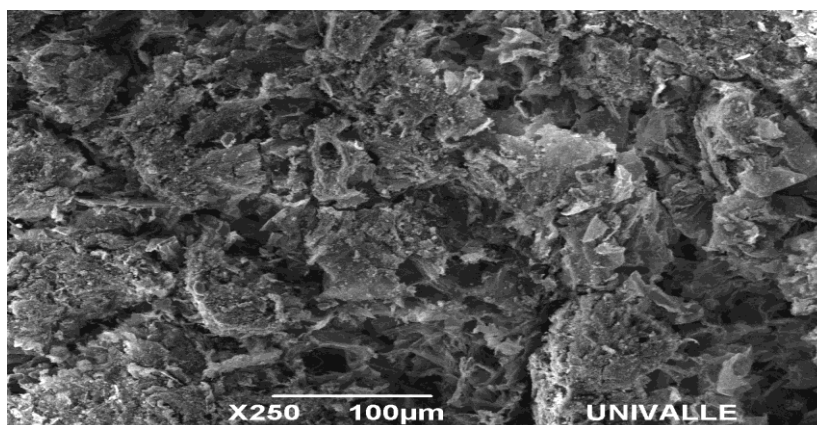


Figura 22. Fotografía SEM de pulpa guayaba fresca

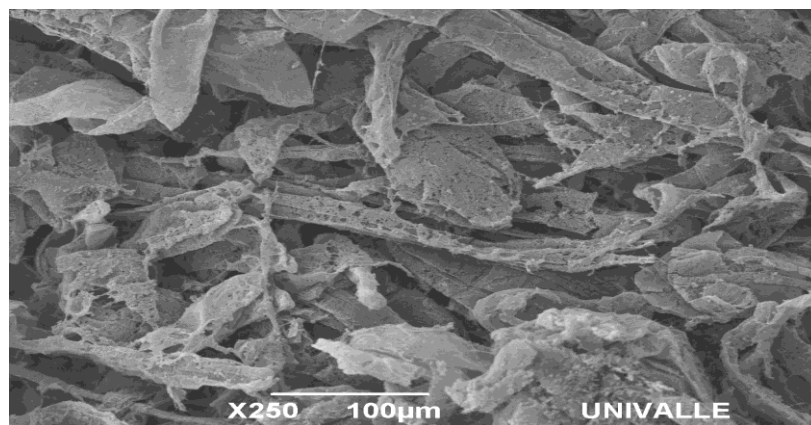


Figura 23. Fotografía SEM de pulpa de guayaba de 2mm secada a 60°C

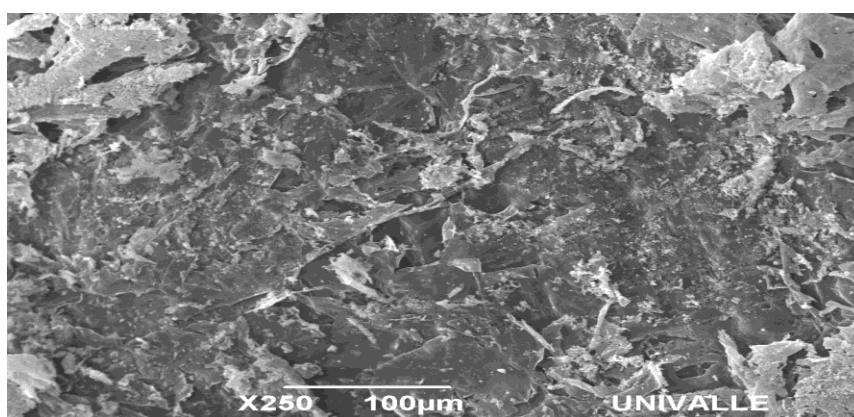


Figura 24. Fotografía SEM de pulpa de guayaba de 3mm secada a 60°C

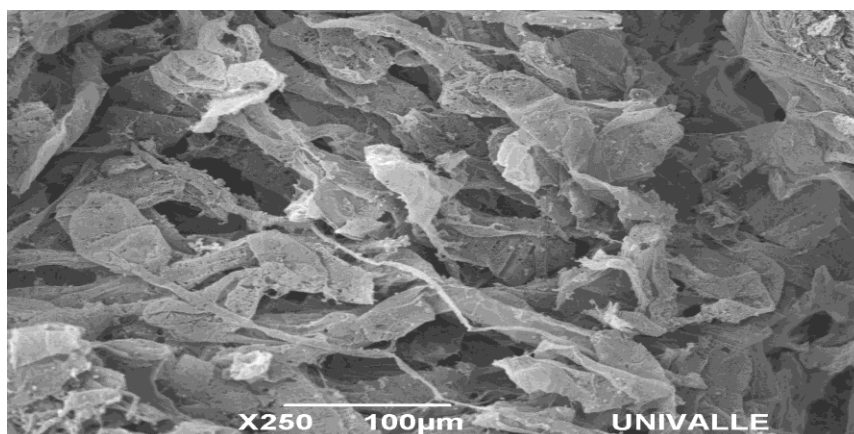


Figura 25. Fotografía SEM de pulpa de guayaba de 2mm secada a 80°C

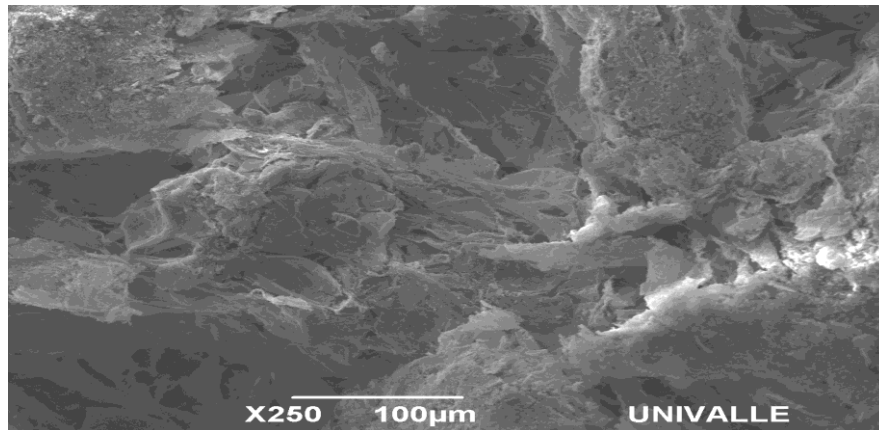


Figura 26. Fotografía SEM de pulpa de guayaba de 3mm secada a 80°C

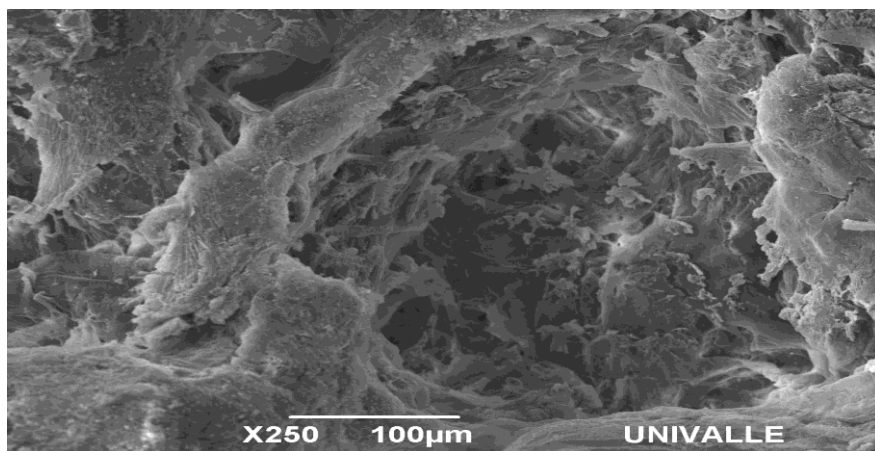


Figura 27. Fotografía SEM de pulpa de guayaba de 2mm secada a 90°C

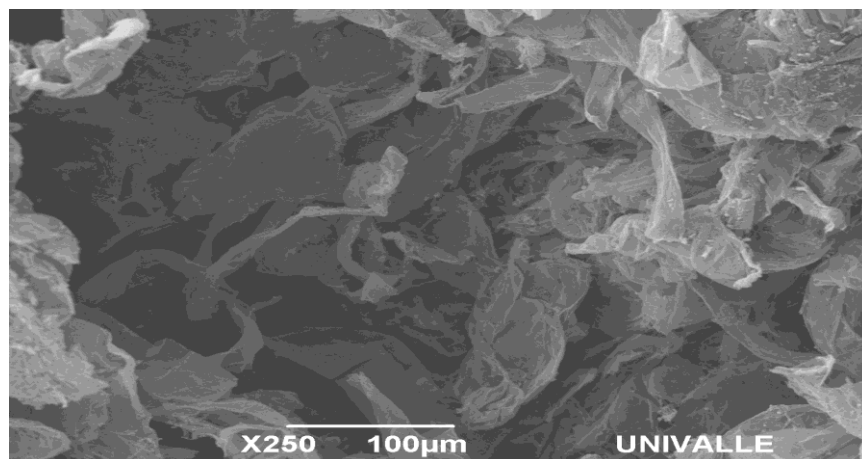


Figura 28. Fotografía SEM de pulpa de guayaba de 3mm secada a 90°C

8.3. DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES NUTRICIONALES

8.3.1. Vitamina C

La vitamina C o ácido ascórbico es uno de los micronutrientes más relacionado con las hortalizas y frutas. Debido a que esta vitamina es sensible a la oxidación química y enzimática, y es soluble en agua, se utiliza como indicador para monitorear la calidad debido a que los otros nutrientes presentes en la fruta tienen una estabilidad igual o superior (Favell, 1998). La pulpa de guayaba fresca presentó un contenido de vitamina C de 68,4 mg/100g, un valor similar al encontrado por **Rojas-Barquera y Narváez-Cuenca (2009)** de $78,2 \pm 15,6$ mg/100g. En la Figura 29, se observa que las muestras sometidas a mayor temperatura y menor espesor presentaron mayores pérdidas como era de esperarse, ya que esta vitamina es termo-sensible. **Badui (1999)** afirma que la degradación de la vitamina C en muestras de pulpas se debe en gran parte a la oxidación que se presenta por la incorporación de aire de ambiente durante el despulpado.

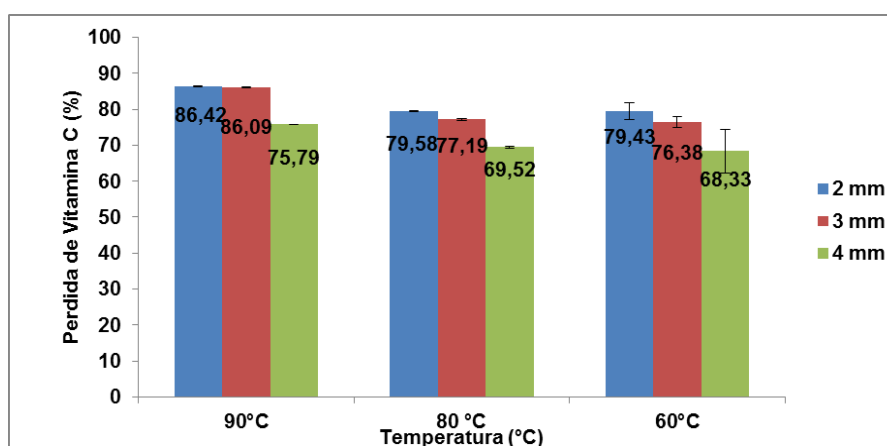


Figura 29. Pérdida de vitamina C en las muestras de guayaba secadas por VR

En estudios realizados en puré de fresas por **Abonyi et al. (2001)**, los autores encontraron pérdidas de vitamina C en secado por VR, mucho menores que las encontradas en este trabajo ($6 \pm 1,3\%$). En un estudio en espárragos, **Nindo et al.**

(2003b), mostraron que el producto seco por VR tuvo un contenido de ácido ascórbico final casi idéntico a la materia prima (2,1mg/g m.s) y superior a la liofilización (1,8mg/g m.s). Estas pérdidas pequeñas en comparación de las encontradas en el presente estudio, se deben a que los purés de espárragos y de fresas tuvieron tiempos de residencia en la banda muy cortos (3-5 minutos), entre menor sea el tiempo de exposición del producto a altas temperaturas es menor la pérdida de la vitamina C. Estadísticamente se observaron diferencias significativas entre los espesores y entre las temperaturas ($p < 0,05$).

8.3.2. Carotenoides

Los carotenoides son los más comunes de todos los grupos de pigmentos naturales, son de color rojo, anaranjados o amarillos y se encuentran en muchas plantas y animales (McLaren y Friggs, 2002). En la guayaba los carotenoides que se presentan en mayor cantidad son el licopeno (76-86%) y el b-caroteno (6-17%) (Gross, 1987); su sensibilidad a la oxidación, la isomerización y la polimerización ocasionan su rápida destrucción, especialmente cuando son adsorbidos como películas de superficie delgada en presencia de luz y oxígeno (McLaren y Friggs, 2002). Se observa en la Figura 30 que las menores pérdidas de carotenoides se presentan en las muestras sometidas a menores temperaturas y las que tienen mayores espesores; esta misma tendencia se muestra en las Figuras 16 y 17 con la variable diferencia de color. La temperatura no presenta diferencia significativa ($p > 0,05$) en los carotenos mientras que el espesor presenta diferencia significativa para esta variable ($p < 0,05$).

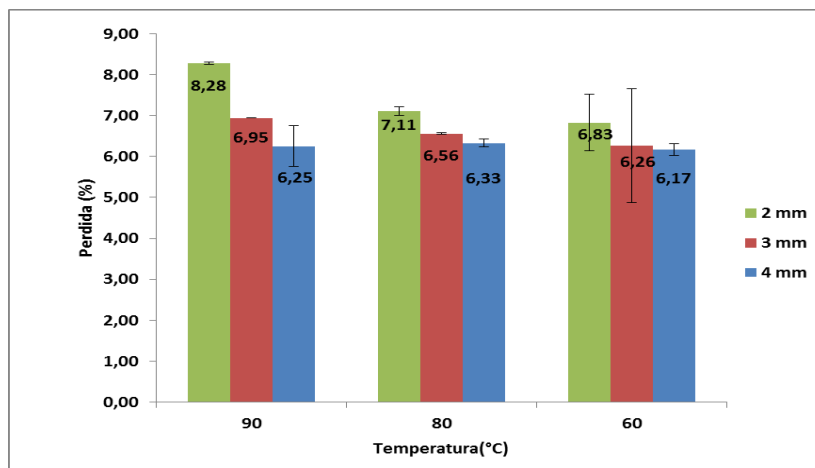


Figura 30. Pérdida de carotenoides en las muestras de guayaba secadas por VR

En varias investigaciones se ha encontrado que la pérdida de carotenos no sólo afecta la calidad nutricional del producto sino que ocasiona pérdida del color. **Koca et al. (2007)** encontraron que existe una relación directa entre el cambio de color y la pérdida de b-carotenos en zanahoria deshidratada. En otras investigaciones se han estudiado los carotenoides aplicando el método de secado por VR. **Abonyi et al. (2001)** encontraron que las pérdidas del caroteno en puré de zanahoria fueron de 8.7% (totales), 7.4% (α -caroteno), y 9.9% (β -caroteno), valores similares en caroteno total a los obtenidos en este estudio con pulpa de guayaba. **Nindo et al. (2004)** encontraron que la retención de la actividad antioxidante total (TAA) en puré de espárragos fue de 88.27 ± 6.2 en la parte externa, 75.27 ± 2.6 en la parte media, 56.27 ± 1.4 en la parte basal y 73.27 ± 3.4 en la parte de la lanza.

9. CONCLUSIONES

- En el secado por Ventana de Refractancia™ se encontró que todas las variables de respuesta (humedad, actividad de agua, luminosidad, croma, diferencia de color, densidad real, densidad aparente y la porosidad) son significativamente diferentes a las temperaturas y espesores estudiados.
- Las muestras procesadas a la temperatura de 90°C presentaron mayor estabilidad microbiológica con rangos de 0,42 a 0,47 de actividad de agua y contenido de humedad entre 1-4,5%.
- Las muestras sometidas a mayor temperatura presentan mayor diferencia de color, cambios en el croma y la luminosidad esto se debe a la concentración de los pigmentos (carotenos).
- La pulpa fresca presenta densidad aparente de $1,0397 \pm 0,0033$ g/mL, densidad real $0,9998 \pm 0,0076$ g/mL y porosidad $3,838 \pm 0,3074$ g/mL, a través del tiempo del proceso aumentan las tres propiedades evidenciándose estos cambios en las micro-fotografías.
- Los valores de coeficiente de difusividad se encuentra dentro de los rangos de los alimentos, con estos valores y los encontrados en los parámetros de los modelos estudiados (Herderson - Pabis, Page y Lewis), se encontró, por medio de la ecuación de Arrhenius, que el parámetro k de Page representa un comportamiento pseudo-difusional.
- La pulpa de guayaba fresca presentó un contenido de vitamina C de 68,4 mg/100g, a través del proceso alcanzó pérdidas entre 86,420 y 68,331%, tanto la temperatura como el espesor presentaron diferencias significativas en esta variable. Mientras que la pérdida de carotenos sólo presentó diferencia significativa en el espesor ($p < 0,05$)

- Se sugiere implementar el método de secado por VR en pulpa de guayaba, a muestras de 3mm y 90°C, debido a sus buenas características fisicoquímicas, estructurales y poca pérdida de carotenos, aunque se requiere mayor investigación en la pérdida de vitamina C.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Abdelrahim, S., Almagboul, A., Omer, M. y Elegamib, A. (2002). Antimicrobial activity of *Psidium guajava* L. *Fitoterapia*. 73, 713–715.
- Abonyi, B., Feng, H., Tang, J., Edwards, C., Mattinson, D. y Fellman, J. (2001). Quality retention in strawberry and carrot purees dried with Refractance Window™ System. *Journal of Food Science*. 67, 1051–1056.
- Ancient Sun Nutrition Inc. (2004). Refractance Window™ Drying Technology. Tomado de: <http://www.ancientsuninc.com/refractancewindowdrying.doc> Fecha de consulta: Marzo de 2010.
- AOAC, (1980). *Official Methods of Analysis*, 13th ed. Association of the Official Agricultural Chemists, Washington, DC.
- Ayhan, T., Hao, F. y Mosbah, K. (2009). The effect of drying method and storage on color characteristics of paprika. *LWT - Food Science and Technology*, 42(10), 1667-1673.
- Badui, S. (1999). *Química de alimentos*. 3º edición, Editorial Pearson. México.
- Banu, K., Ismail, E. y Figen, E. (2008). Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. *Journal of Food Engineering*. 85, 340-349.
- Bello, J. (2000). *Ciencia bromatológica: principios generales de los alimentos*. Madrid: Díaz de Santos, D. L.
- Bodart, M., de Peñaranda, R., Deneyer, A. y Flamant, G. (2008). Photometry and colorimetry characterisation of materials in daylighting evaluation tools. *Building and Environment*. 43, 2046-2058.

- Boulogne, S., Márquez, E., García, Y., Medina, A. y Cayot, P. (2008). Optimización de la operación de secado de la carne de lombriz (*Eisenia andrei*) para producir harina destinada al consumo nacional. *Revista Ciencia e Ingeniería*. 29 (2), 91-96.
- Bruin, S. y Luyben, K. (1980). Drying of food materials: a review of recent developments. In *Advances in Drying*; Mujumdar, A.S.; Ed.; Hemisphere Publishing Corp.: Washington, DC. 1: 155-215.
- Cano, C. y Viveros, J. (2009). Secado de naranja y guayaba empleando la tecnología de ventana de refractancia. Tesis para optar al grado de ingeniería de alimentos. Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle.
- Chavarro, L., Ochoa, C. y Ayala, A. (2006). Efecto de la madurez, geometría y presión sobre la cinética de transferencia de masa en la deshidratación osmótica de papaya (*Carica papaya L., var. Maradol*). *Ciência e Tecnologia de Alimentos*. 26(3), 596-603.
- Chong, C., Law, C., Cloke, M., Hii, C., Abdullah, L. y Daud, W. (2008). Drying kinetics and product quality of dried Chempedak. *Journal of Food Engineering*. 88, 522-527.
- Ciancaglini, P.; Santos L.; Daghasanli P.; Thedei G. (2001). Using a classical method of vitamin C quantification as a tool for discussion of its role in the body. *Biochemistry and Molecular Biology Education*. 29, 110-114.
- Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion* (2nd ed.). Clarendon Press, 114.
- Davies, B. H. (1976). Carotenoids. In *Chemistry and biochemistry of plant pigments*, 2nd edn (ed. T. W. Goodwin), London: Academic. 38-165.
- Doymaz, I. (2005). Drying characteristics and kinetics of okra. *Journal of Food Engineering*. 69, 275-279.
- Doymaz, I. (2004). Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*. 61, 359-364.
- Doymaz, I. y Pala, M. (2003). The thin-layer drying characteristics of corn. *Journal of Food Engineering*. 60, 125-130.

FAO Organización de las naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. Estudio FAO Montes 44/3. Especies Forestales Productoras de frutas y otros alimentos. 3. Ejemplos de América Latina. 245 p. Fotocopias.

Favell, D. (1998). A comparison of the vitamin C content of fresh and frozen vegetables. Food Chemistry. 62 (1), 59-64.

Fellows, P. (1994) Tecnología del procesado de los alimentos: Principios y práctica. Ed. ACRIBIA, S.A., Zaragoza. 549.

Fito, P., Andrés, A., Barat, J. y Albors, A. (2001). Introducción al secado de alimentos por aire caliente. Ed: Universidad Politécnica de Valencia.

Fondo Nacional de Fomento Hortofrutícola. Frutas y hortalizas de Colombia para el mundo. (2003). Disponible en: http://www.frutasyhortalizas.com.co/portal/Business/product_view.

Fujita, S., Bin-Saari, N., Maegawa, M., Tetsuka, T., Hayashi, N. y Tono, T. (1995). Purification and properties of polyphenoloxidase from cabbage (*Brassica oleracea* L.). Journal of Agricultural and Food Chemistry. 43, 1138-1142.

Gazar, G. (1998). Caracterización reológica y microbiológica, cinética de deterioro en cremogenados de melocotón. Tesis Doctorado. Universidad de Lleida.

Gross (1987). Pigments in fruits. London: Academic Press.

Gutiérrez, M., Fermin, G., Paredes, C. y Troconis, T. (2007). Variabilidad genética en materiales de guayabas. <http://www.unesur.edu.ve/genetica/informacion.html>.

Kaymak-Ertekin. F. (2002). Drying and rehydration kinetics of green and red peppers. Journal of Food Science. 67 (1), 168-175.

Kneule, F. (1966). “El secado”; Enciclopedia de la tecnología química 1; Ediciones Urmo.

Koca, N., Burdurlu, H., Karadeniz, F. (2007). Kinetics of colour changes in dehydrated carrots. *Journal of Food Engineering*. 78, 449–455.

Krokida, M.K. y Maroulis, Z.B. (2001). Quality changes during drying of food materials. In *Drying Technology in Agriculture and Food Sciences* (Mujumdar A S, ed). Oxford IBH, Delhi, India.

Labuza, T. y Saltmarch, M. (1981). The nonenzymatic browning reaction as affected by water in foods. In *Water activity: Influences on food quality*; Academic Press: San Francisco. P 605-649.

Laguado, N., Marín, M., Arenas de Moreno, L., Araújo, F., Castro de Rincón, C. y Rincón A. (2002). Crecimiento del fruto de guayaba (*Psidium guajava* L.) del tipo Criolla Roja. *Revista de la Facultad de Agronomía LUZ*. 19 (4), 273–283.

Lewis MJ. (1993). *Physical Properties of foods and food processing systems*. Chichester, England: Ellis Horwood Ltd. 41- 42.

Lozano, J., Toro, C., García, R. y Tafur, R. (2002). *Fruticultura Colombiana. Manual sobre el cultivo del guayabo en Colombia*, Cali: Autónoma del Valle. 278.

Lozano, E. y Ibarz, A. (1992). Nota. Caracterización reológica de pulpas concentradas de ciruela y melocotón. *Revista española de ciencia y tecnología de alimentos*. 32, 85-94.

Lozoya, X., Reyes, H., Chávez, M., Martínez, C., Soto, Y. y Doubova, S. (2002). Intestinal anti-spasmodic effect of a phytodrug of *Psidium guajava* folia in the treatment of acute diarrheic disease. *Journal of Ethnopharmacology*. 83, 19-24.

Marinos-Kouris, D. y Maroulis, Z. (2006). Transport properties in the drying of solids, in *Handbook of drying technology*. Chapter 4. 3th Ed.

Mayor, L. y Sereno, A. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, 61, 373–386.

- McGuire, R. y Hallman, G. (1995). Coating Guavas with Cellulose-or Carnauba-based Emulsions Interferes with Postharvest Ripening. *HortScience*. 30(2), 294-295.
- McLaren, D. y Friggs, M. (2002). Guía de SIGH AND LIFE sobre la vitamina A en los estados de salud y enfermedad. 2ª Ed. Suiza.
- Mejía, J. A. (2006). Análisis de expresión de los genes de la ruta biosintética de carotenos, y cuantificación de carotenos en hojas y raíces de la planta de yuca a diferentes edades. Bogotá: Universidad Javeriana.
- Montes, E., Torres, R., Andrade, R., Pérez, O., Marimon, J. y Meza, I. (2008). Modelamiento de la cinética de secado de ñame (*Dioscorea Rotundata*) en capa delgada. *Revista ingeniería e investigación*. 28: (2), 45-52.
- Mujumdar, A., Tulasidas, T. y Raghavan, G. (1995). Microwave drying of grapes in a single mode cavity at 2450 Mhz. II. Quality and energy aspects. *Drying Technology*. 13 (8-9): 1949-1992.
- Navarro, M., Alcalá, K., Martínez, E. y Ruiz, L. (2007). Inventario florístico en la uma Cipactli, Puerto Vallarta, Jalisco. *ALEPH ZERO* 46.
- Nieto, A., Salvatori, D., Castro, M. y Alzamora, S. (2004). Structural changes in apple tissue during glucose and sucrose osmotic dehydration: shrinkage, porosity, density and microscopic features. *Journal of Food Engineering*. 61, 269–278.
- Nindo, C. y Tang, J. (2007a). Refractance Window Dehydration Technology: A Novel Contact Drying Method. *Drying Technology*. 25, 37–48.
- Nindo, C.I., Powers, J. y Tang J. (2007b). Influence of Refractance Window evaporation on quality of juices from small fruits. *Journal Food Science & Technology*. 40(6), 1000-1007.
- Nindo, C., Tang, J., Powers, J. y Bolland, K. (2004). Energy consumption during Refractance Window^(R) evaporation of selected berry juices. *International Journal of Energy Research*. 28 (12), 1089-1100.

Nindo, C., Feng, H., Shen, G., Tang, J. y Kang, D. (2003a). Energy Utilization and Microbial Reduction in a New Film Drying System. *Journal of Food Processing and Preservation*. 27 (2), 117–136.

Nindo, C., Sun, T., Wang, S., Tang, J., Powers, J., (2003b). Evaluation of drying technologies for retention of physical quality and antioxidants in asparagus (*Asparagus officinalis* L.). *LWT-Food Science and Technology*. 36, 507–516.

Norma Técnica Colombiana (NTC) 1263. (1970). Guayaba.

Ochoa, C., Quintero, T., Ayala, A., Ortiz, M. (2011). Drying characteristics of mango slices using the Refractance Window™ technique. *Journal of Food Engineering*. 109, 69-75.

Okos, R., Narsimhan, G., Singh, K. y Weitnauer, C. (1992). Food Dehydration. En: Heldman D.R. y Lund D.B. (eds), "Handbook of Food Engineering", Marcel Dekker Inc., New York. 437-562.

Olajide, O. y Makinde, J. (1999). Pharmacological studies on the leaf of *Psidium guajava*. *Fitoterapia*. 70, 25-31.

Panadés G. (2000) Procesamiento Mínimo de Guayaba (*Psidium guajabal*.) por deshidratación osmótica, Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia España.

Panchariya, C., Popovic, D. y Sharma, L. (2002). Thin-layer modeling of black tea drying process. *Journal of Engineering*. 52, 349-357.

Peña, A., Díaz, A. y Martínez, R. (1996). Fruticultura Tropical. ICFES. 2da parte. 208.

Pérez Gutiérrez, M., Mitchell, S. y Vargas Solis, R. (2008). *Psidium guajava*: a review of its traditional uses, phytochemistry and pharmacology. *Journal of Ethnopharmacology*. 117(1), 1–27.

Pezzutti, A. y Crapiste, H. (1997). Color changes during dehydration of onion (*Allium Cepa*) and garlic (*Allium Sativum*). *Acta Horticulturae*. 433, 455-462.

- Prachayawarakorn, S., Tia, W., Plyto, N. y Soponronnarit, S. (2008). Drying kinetics and quality attributes of low-fat banana slices dried at high temperature. *Journal of Food Engineering*. 85, 509-517.
- Ratti, C. y Mujumdar, S. (1995). Infrared drying. In *Handbook of Industrial Drying*; Mujumdar, A.S., Ed.; Marcel Dekker: New York. 567–588.
- Rojas-Barquera y Narváez-Cuenca (2009). Determinación de vitamina C, compuestos fenólicos totales y actividad antioxidante de frutas de guayaba (*Psidium guajaba* L.) cultivadas en Colombia. *Quimica Nova*. 32, 2336–2340.
- Sagar, V., & Suresh, K. (2010): “Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review” *International Journal of Food Science & Technology*. 47(1), 15-26.
- Salazar, D., Melgarejo, P., Martínez, R., Martínez, J., Hernández, F., Burguesa, M. (2006). Phenological states of the guava tree (*Psidium guajava* L.). *Scientia Horticulturae*. 108, 157-161.
- Sandu, C. (1986). Infrared radiative drying in food engineering: A process analysis. *Biotechnology Progress*. 2, 109–119.
- Senadeera, W., Bhandari, B., Young, G. y Wijesinghe, B. (2003). Influence of shapes of selected vegetable material on drying kinetics during fluidized bed drying. *Journal of Food Engineering*. 58(3), 277-283.
- Severini, C., Baiano, A., De Pilli, T., Romaniello, R. y Derossi, A. (2003). Prevention of enzymatic browning in sliced potatoes by blanching in boiling saline solutions. *Lebensmann-Wisenthal-Technologies*. 36, 657-665.
- Simal, S., Femenia, A., Garau, C. y Rosselló, C. (2005). Use of exponential, Page’s and difusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *Journal of Food Engineering*. 66, 323-328.

Simpson, R., Johnson, T. y Amara, A. (1988). The box-plot: an exploratory analysis for biomedical publications. *American Heart Journal*. 116 (6 Part 1), 1663-5.

Smith, M. (1994). Heat transfer dynamics. *Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI) Journal*. 77, 239–245.

Subdirección de Inteligencia de Mercados. (2008). <http://www.proexport.com.co/vbecontent/library/documents/DocNewsNo10050DocumentNo7848.pdf>

Turhan, E. y Kaletunç, G. (1992). Modeling of salt diffusion in white cheese during long-term brining. *Journal Food Science*. 57(5), 1082-1085.

Valle, J., Aránguiz, V. y Díaz, L. (1998). Volumetric procedure to assess infiltration kinetics and porosity of fruits by applying a vacuum pulse. *Journal of Food Engineering*, 38 (2), 207-221.

Vallejo, J (2010). Secado de pitahaya amarilla (*Var. Hylocereus Selenicereus*) mediante la técnica de hidrosecado y osmo-hidrosecado. Tesis para optar al grado de ingeniería química. Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle.

Vega, A., Ah-Hen, K., Chacana, M., Vergara, J., Martínez, J., García, P., Lemus, R. y Di Scala, K. (2012). Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (*var. Granny Smith*) slices. *Food Chemistry*. 132 (1), 51-59.

Vega, A., Uribe, E., Lemus, R. y Miranda, M. (2007a). Hot-air drying characteristics of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) and influence of temperature on kinetic parameters. *Food Science and Technology*. 40 (10), 1698–1707.

Vega, A., Tello, C. y Lemus, R. (2007b). Simulación matemática del proceso de secado de la gracilaria chilena (*gracilaria chilensis*), *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*. 15 (1), 55-64.

- Vitali, A. y Rao, A. (1982). Flow behaviour of guava puree as a function of temperature and concentration. *Journal of Texture Studies*. 13, 275-289.
- Williamson, D., Parker, A. y Kendrick, S. (1989). The box plot: a simple visual method to interpret data. *Annals of Internal Medicine*. 110 (11), 916-21.
- Xue, K. (2004). Optimización del secado por aire caliente de pera (*variedad blanquilla*). Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Yan, Z., Gallagher, S. y Liveira, R. (2008) Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. *Journal of Food Engineering*. 84: 430-440.
- Zogzas, N., Maroulis, Z. y Marine-Kouris, D. (1996). Moisture diffusivity dates compilation in foodstuffs. *Drying Technology*. 14(10). 2225–2253.
- Zhou, H. y Feng, X. (1991). Polyphenoloxidase from yali pear (*Pyrus bretschneideri*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 57, 307-313.

11. ANEXOS

En los diagramas de cajas se muestran una caja central que indica el rango en el que se concentra el 50% central de los datos (segundo y tercer cuartil). Sus extremos son, por lo tanto, el primer y cuarto cuartil de la distribución. La línea central en la caja es la mediana. De este modo, si la variable es simétrica, dicha línea se encontrará en el centro de la caja. Los extremos de los "bigotes" que salen de la caja son los valores que delimitan el 95% central de los datos, aunque en ocasiones coinciden con los valores extremos de la distribución, mientras más se aleja la barra de la caja, mayor es la dispersión del dato máximo o mínimo con respecto al valor de la media. Se suelen también representar aquellas observaciones que caen fuera de este rango (valores extremos, valores atípicos) (Simpson et al., 1988, Williamson et al., 1989).

Tabla A. 1. ANOVA de humedad

Variable de respuesta	Humedad			
	Sum sq	Df	F valor	Pr(>F)
Espesor	28.18	2	604.521	1,66E-14
Temperatura	44.99	2	965.189	< 2.2e-16
Tiempo	901.95	5	7.740.152	< 2.2e-16
Espesor:Temperatura	1.77	4	18.941	0,1248
Espesor:Tiempo	15.89	10	68.198	9,10E-07
Temperatura:Tiempo	23.04	10	98.847	3,76E-09
Espesor:Temperatura:Tiempo	6.80	20	14.592	0,1362
Residuales	12.59	54		

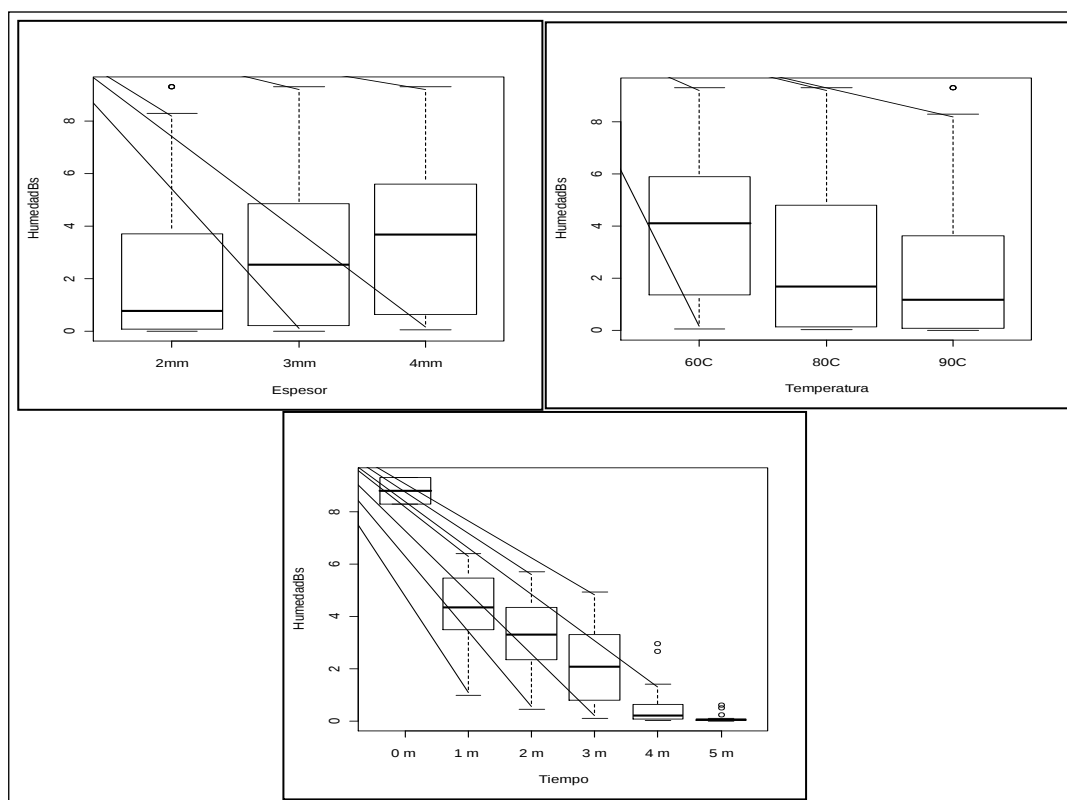


Figura A. 1. Diagrama de cajas de humedad

Tabla A. 2. ANOVA de actividad de agua

Variable de respuesta	Actividad de agua			
	Sum sq	Df	F valor	Pr(>F)
Espesor	0.29194	2	18789.19	<2.2e-16
Temperatura	0.32647	2	21011.71	<2.2e-16
Tiempo	271.889	5	69994.90	<2.2e-16
Espesor:Temperatura	0.00413	4	132.77	<2.2e-16
Espesor:Tiempo	0.12216	10	1572.45	<2.2e-16
Temperatura:Tiempo	0.28914	10	3721.75	<2.2e-16
Espesor:Temperatura:Tiempo	0.16099	20	1036.14	<2.2e-16
Residuales	0.00042	54		

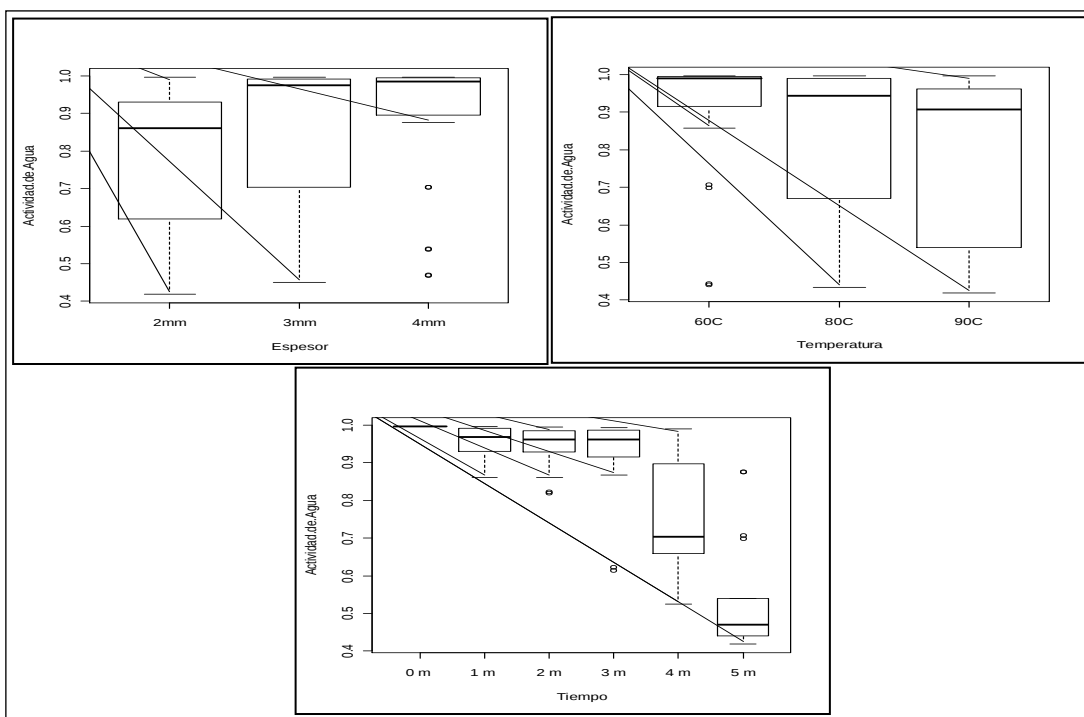


Figura A. 2. Diagrama de cajas de actividad de agua

Tabla A. 3. ANOVA de luminosidad

Variable de respuesta	Luminosidad			
	Sum sq	Df	F valor	Pr(>F)
Espesor	165.220	2	689.370	1,36E-15
Temperatura	261.211	2	1.089.886	< 2.2e-16
Tiempo	278.973	5	465.599	< 2.2e-16
Espesor:Temperatura	98.019	4	204.489	2,65E-10
Espesor:Tiempo	53.618	10	44.744	1,33E-04
Temperatura:Tiempo	91.305	10	76.193	1,96E-07
Espesor:Temperatura:Tiempo	64.066	20	26.731	2,16E-03
Residuales	64.710	54		

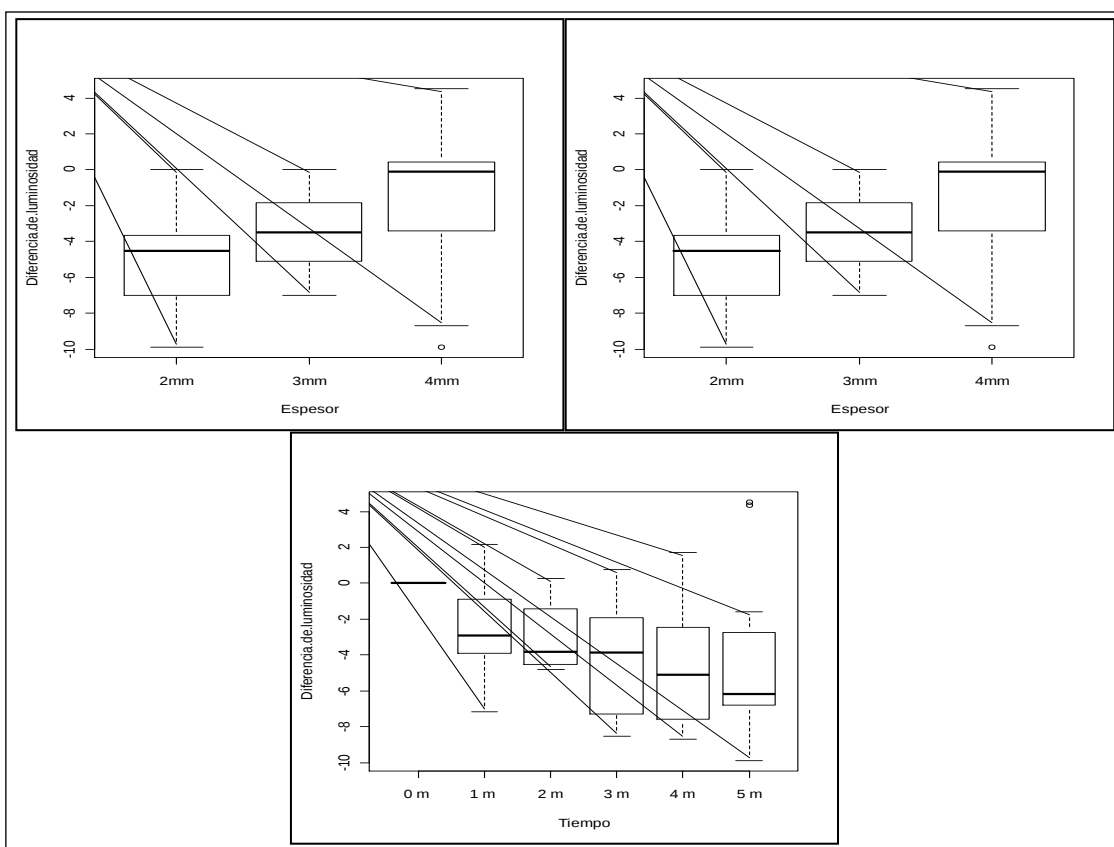


Figura A. 3. Diagrama de cajas de luminosidad

Tabla A. 4. ANOVA de croma

Variable de respuesta	Croma			
	Sum sq	Df	F valor	Pr(>F)
Espesor	328.7	2	136.179	<2.2e-16
Temperatura	2509.9	2	1.039.884	<2.2e-16
Tiempo	7322.3	5	1.213.507	<2.2e-16
Espesor:Temperatura	329.6	4	68.279	<2.2e-16
Espesor:Tiempo	208.9	10	17.313	1,59E-13
Temperatura:Tiempo	1338.6	10	110.922	<2.2e-16
Espesor:Temperatura:Tiempo	255.1	20	10.569	2,83E-12
Residuales	65.2	54		

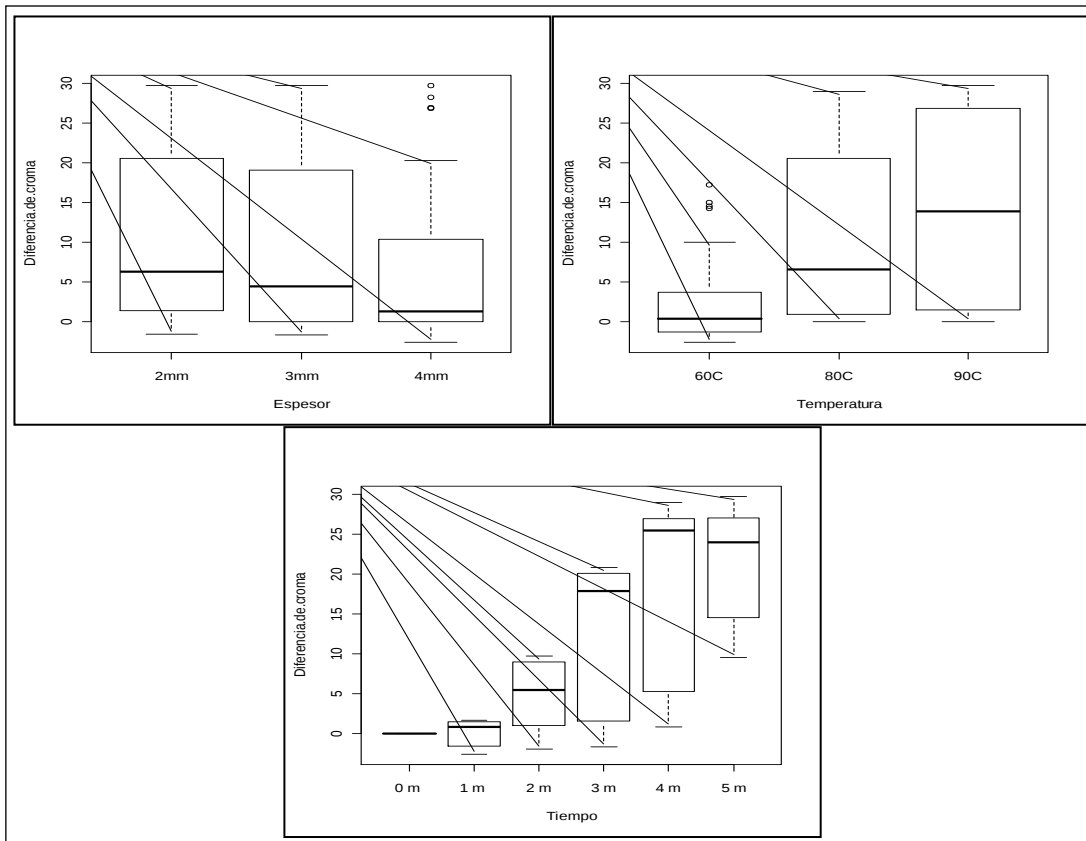


Figura A. 4. Diagrama de cajas de croma

Tabla A. 5. ANOVA de diferencia de color

Variable de respuesta	Diferencia de color			
	Sum sq	Df	F valor	Pr(>F)
Espesor	117.11	2	873.482	< 2.2e-16
Temperatura	486.84	2	3.631.128	< 2.2e-16
Tiempo	1488.49	5	4.440.808	< 2.2e-16
Espesor:Temperatura	111.08	4	414.264	7,49E-16
Espesor:Tiempo	36.22	10	54.032	1,69E-05
Temperatura:Tiempo	241.56	10	360.338	< 2.2e-16
Espesor:Temperatura:Tiempo	53.08	20	39.588	2,88E-05
Residuales	36.20	54		

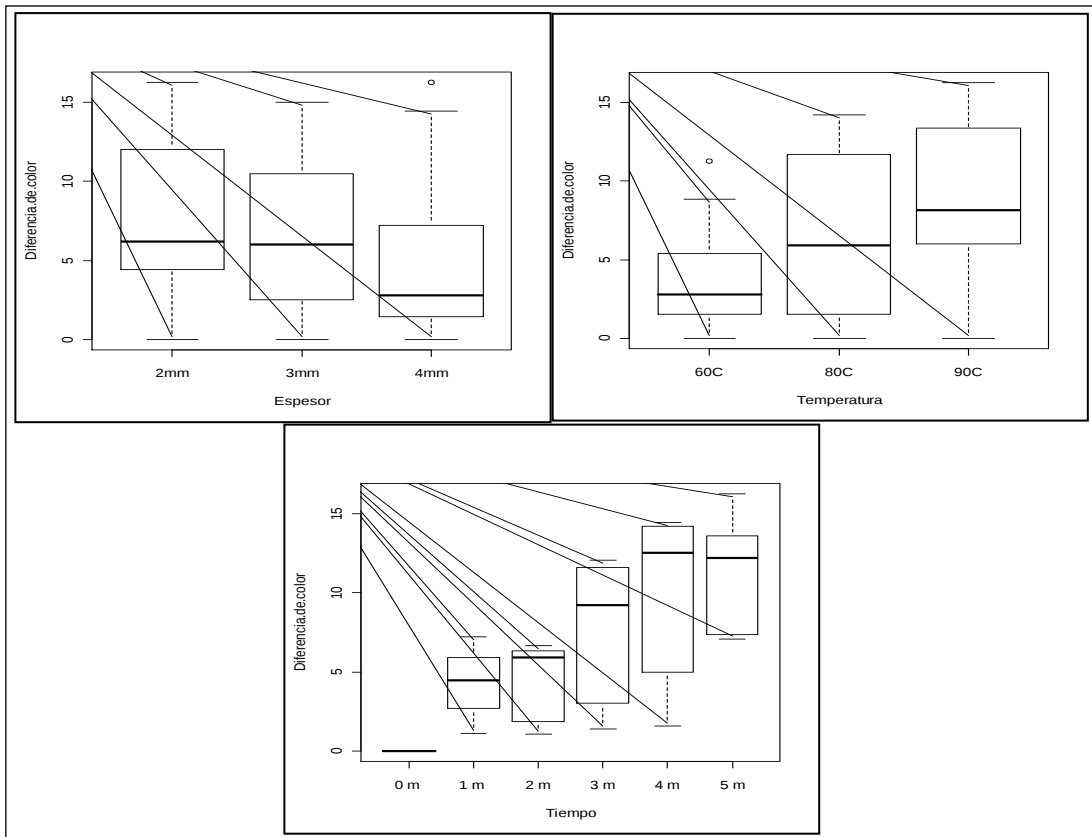


Figura A. 5. Diagrama de cajas de diferencia de color

Tabla A. 6. ANOVA de densidad real

Variable de respuesta	Densidad real			
	Sum sq	Df	F valor	Pr(>F)
Espesor	0.2054	2	1.199.905	< 2.2e-16
Temperatura	0.2774	2	1.620.627	< 2.2e-16
Tiempo	33.005	5	7.713.189	< 2.2e-16
Espesor:Temperatura	0.0044	4	12.948	0,2836
Espesor:Tiempo	0.0963	10	112.527	4,38E-10
Temperatura:Tiempo	0.1758	10	205.473	5,05E-15
Espesor:Temperatura:Tiempo	0.1109	20	64.779	2,12E-08
Residuales	0.0462	54		

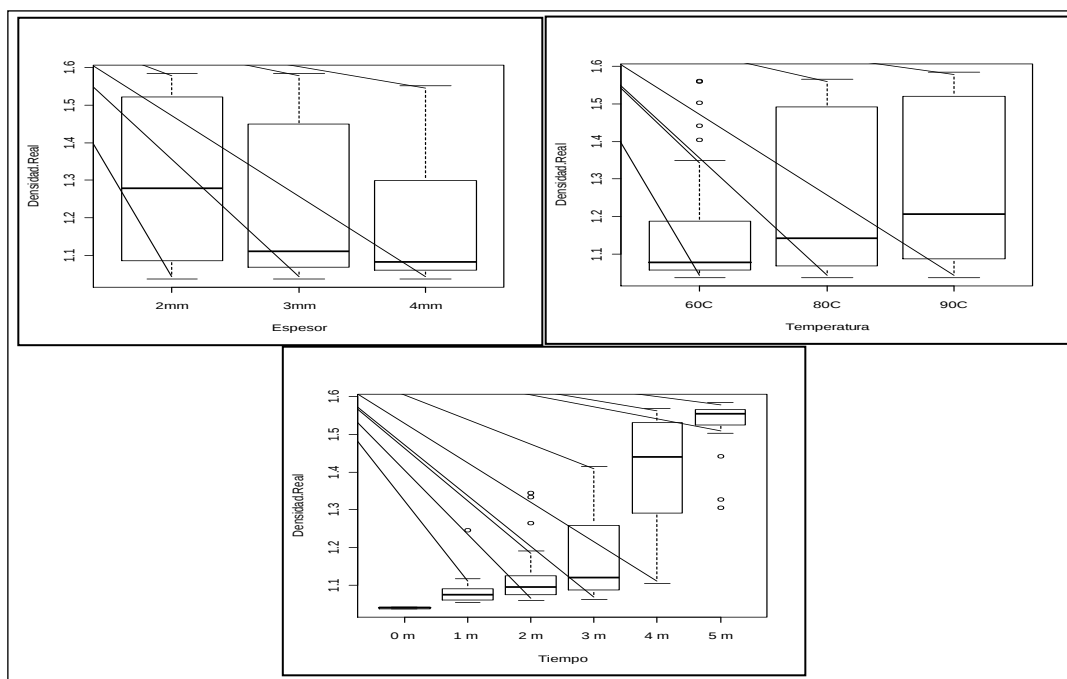


Figura A. 6. Diagrama de cajas de densidad real

Tabla A. 7. ANOVA de densidad aparente

Variable de respuesta	Densidad aparente			
	Sum sq	Df	F valor	Pr(>F)
Espesor	0.13848	2	193.847	4,52E-07
Temperatura	0.12815	2	179.394	1,06E-06
Tiempo	0.50039	5	280.192	7,04E-14
Espesor:Temperatura	0.51639	4	361.435	1,11E-14
Espesor:Tiempo	0.18254	10	51.105	3,19E-05
Temperatura:Tiempo	0.15017	10	42.044	2,48E-04
Espesor:Temperatura:Tiempo	0.46236	20	64.724	2,15E-08
Residuales	0.19288	54		

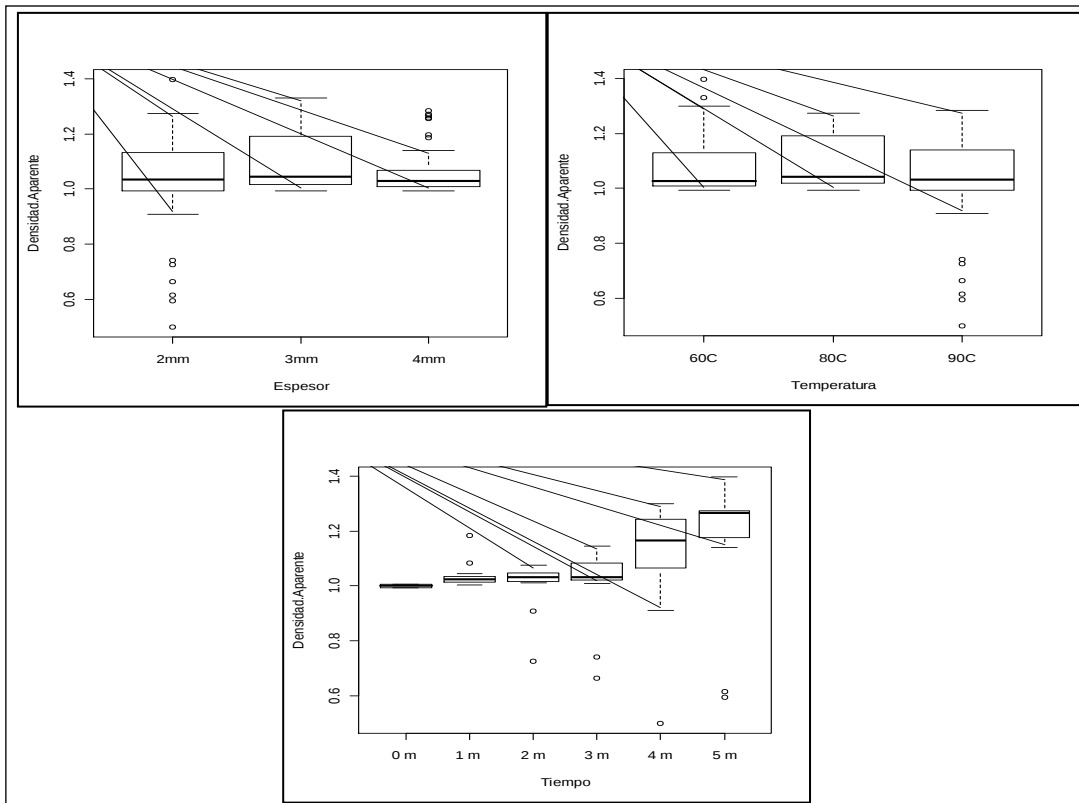


Figura A. 7. Diagrama de cajas de densidad aparente

Tabla A. 8. ANOVA de porosidad

Variable de respuesta	Porosidad			
	Sum sq	Df	F valor	Pr(>F)
Espesor	350.58	2	442.783	4,140E-12
Temperatura	478.16	2	603.914	1,687E-14
Tiempo	2605.42	5	1.316.257	< 2.2e-16
Espesor:Temperatura	6.80	4	0.4293	7,868E-01
Espesor:Tiempo	144.14	10	36.411	9,347E-04
Temperatura:Tiempo	212.75	10	53.742	1,795E-05
Espesor:Temperatura:Tiempo	336.79	20	42.537	1,135E-05
Residuales	213.78	54		

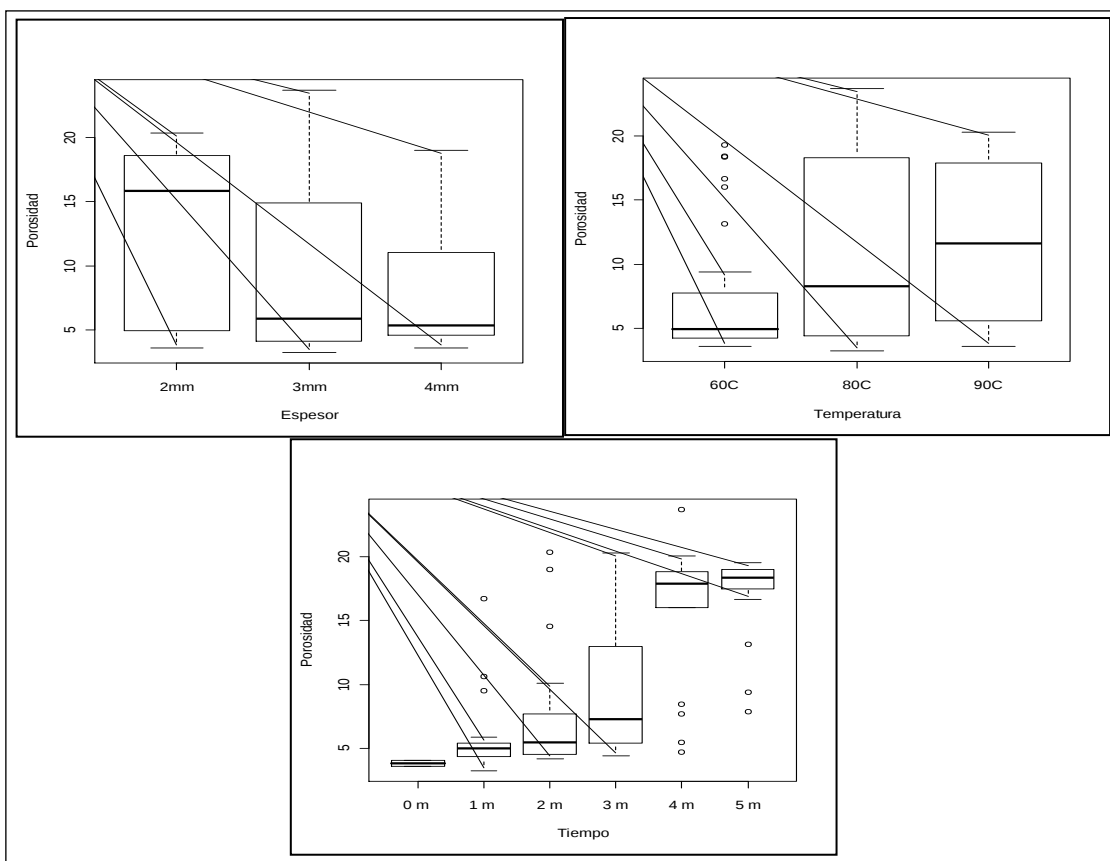


Figura A. 8. . Diagrama de cajas de porosidad

Tabla A. 9. ANOVA de Vitamina C

Variable de respuesta	Vitamina C			
	Sum sq	Df	F valor	Pr(>F)
Espesor	382.33	2	396.362	3.45e-05
Temperatura	238.45	2	247.200	2,21E-04
Espesor:Temperatura	5.73	4	0.2972	8,73E-01
Residuales	43.41	9		

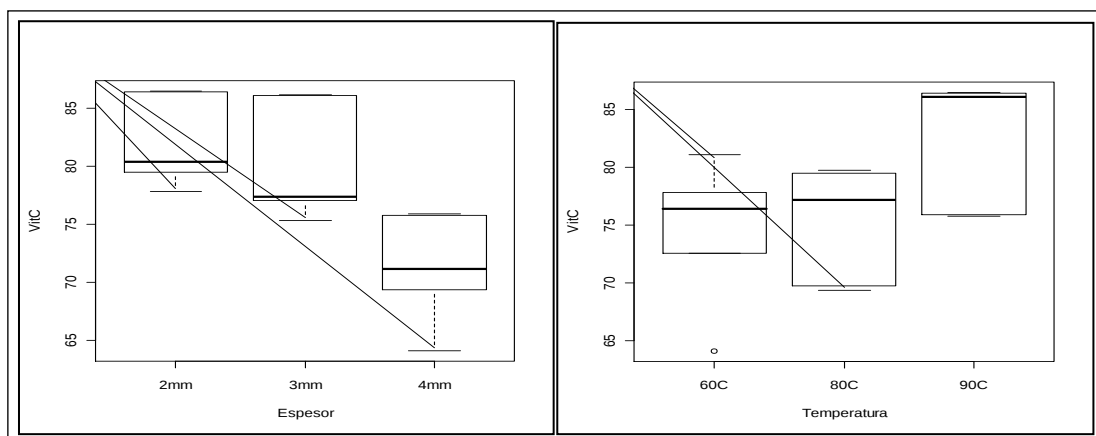


Figura A. 9. Diagrama de cajas de Vitamina C

Tabla A. 10. ANOVA de Carotenos

Variable de respuesta	Carotenos			
	Sum sq	Df	F valor	Pr(>F)
Espesor	42.328	2	70.263	0.01452
Temperatura	16.944	2	28.126	0.11249
Espesor:Temperatura	11.667	4	0.9683	0.47022
Residuales	27.109	9		

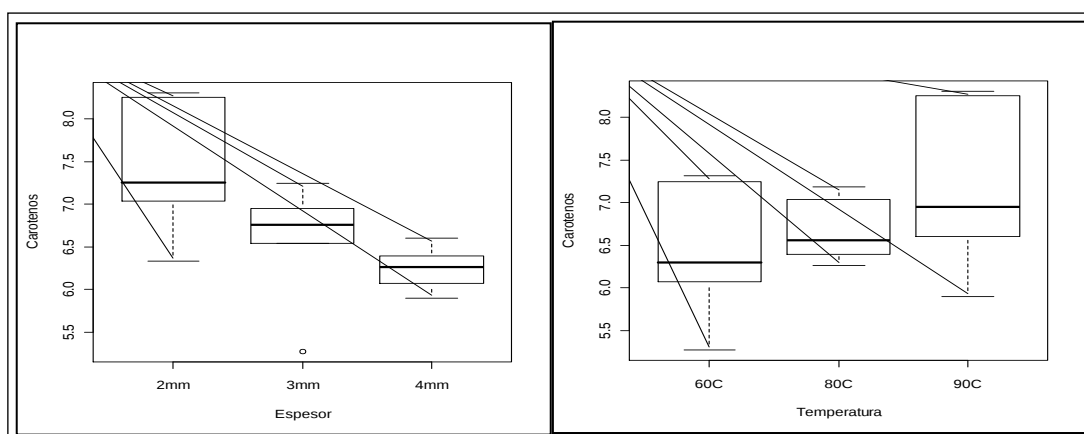


Figura A. 10. Diagrama de cajas de carotenos

Tabla A. 11. Datos de humedad

Notación: el primer número es la temperatura (60, 80 y 90°C), el segundo es el espesor (2, 3 y 4mm) y el tercero es el tiempo (10, 20, 30, 60 y 120)

Tratamiento	Humedad promedio (kg agua/ kg total)	SD	MR	Humedad promedio (kg agua/ kg m.s.)	SD
fresco	8,804	0,718	1,000	0,897	0,008
60-2-10	4,850	1,019	0,550	0,826	0,030
60-2-20	3,705	0,263	0,419	0,787	0,012
60-2-30	2,972	0,103	0,336	0,765	0,009
60-2-60	0,366	0,108	0,039	0,264	0,055
60-2-120	0,041	0,004	0,002	0,033	0,001
60-3-10	5,625	0,642	0,637	0,848	0,014
60-3-20	4,475	0,173	0,506	0,817	0,006
60-3-30	3,951	0,198	0,447	0,806	0,003
60-3-60	1,354	0,076	0,151	0,575	0,014
60-3-120	0,169	0,093	0,015	0,137	0,054
60-4-10	6,253	0,197	0,698	0,861	0,002
60-4-20	5,262	0,651	0,581	0,839	0,016
60-4-30	4,618	0,469	0,504	0,829	0,018
60-4-60	2,817	0,208	0,291	0,737	0,013
60-4-120	0,561	0,080	0,024	0,352	0,024
80-2-10	2,241	0,366	0,253	0,777	0,218

80-2-20	0,887	0,621	0,099	0,438	0,183
80-2-30	0,503	0,395	0,055	0,386	0,004
80-2-60	0,059	0,016	0,005	0,056	0,014
80-2-120	0,028	0,002	0,001	0,028	0,003
80-3-10	4,803	0,407	0,544	0,827	0,012
80-3-20	3,090	0,699	0,349	0,752	0,043
80-3-30	1,676	0,461	0,188	0,678	0,090
80-3-60	0,107	0,104	0,009	0,092	0,086
80-3-120	0,039	0,010	0,002	0,037	0,008
80-4-10	5,312	0,214	0,601	0,841	0,005
80-4-20	4,308	0,214	0,487	0,811	0,007
80-4-30	2,997	0,450	0,337	0,774	0,017
80-4-60	0,618	0,043	0,065	0,377	0,021
80-4-120	0,062	0,023	0,002	0,057	0,021
90-2-10	2,781	0,219	0,316	0,731	0,021
90-2-20	0,637	0,210	0,072	0,382	0,078
90-2-30	0,157	0,071	0,017	0,264	0,077
90-2-60	0,059	0,052	0,006	0,022	0,046
90-2-120	0,007	0,000	0,000	0,010	0,003
90-3-10	3,636	0,213	0,413	0,784	0,010
90-3-20	2,409	0,080	0,273	0,707	0,007
90-3-30	0,927	0,167	0,105	0,479	0,045
90-3-60	0,066	0,013	0,007	0,062	0,011
90-3-120	0,008	0,003	0,001	0,008	0,003

90-4-10	4,115	0,083	0,465	0,804	0,003
90-4-20	2,796	0,407	0,315	0,735	0,028
90-4-30	1,735	0,603	0,194	0,625	0,083
90-4-60	0,214	0,016	0,020	0,176	0,011
90-4-120	0,047	0,002	0,001	0,045	0,002

Tabla A. 12. Datos de actividad de agua

Tratamiento	a_w	Tratamiento	a_w	Tratamiento	a_w
Fresco	0,9954	Fresco	0,9954	Fresco	0,9954
60-2-10	0,9309	60-3-10	0,9909	60-4-10	0,9957
60-2-20	0,9295	60-3-20	0,9910	60-4-20	0,9944
60-2-30	0,9147	60-3-30	0,9901	60-4-30	0,9930
60-2-60	0,8587	60-3-60	0,9715	60-4-60	0,9896
60-2-120	0,4422	60-3-120	0,7029	60-4-120	0,8759
80-2-10	0,9111	80-3-10	0,9890	80-4-10	0,9923
80-2-20	0,8612	80-3-20	0,9846	80-4-20	0,9846
80-2-30	0,8680	80-3-30	0,9760	80-4-30	0,9850
80-2-60	0,6587	80-3-60	0,6700	80-4-60	0,8959
80-2-120	0,4344	80-3-120	0,5011	80-4-120	0,5388
90-2-10	0,8697	90-3-10	0,9539	90-4-10	0,9677
90-2-20	0,8211	90-3-20	0,9493	90-4-20	0,9608
90-2-30	0,6187	90-3-30	0,9328	90-4-30	0,9611
90-2-60	0,5251	90-3-60	0,5390	90-4-60	0,7033
90-2-120	0,4207	90-3-120	0,4562	90-4-120	0,4698

Tabla A. 13. Datos de Color

Tratamiento	□L (prom)	SD	□C*(prom)	SD	□E*(prom)	SD
Fresco	2,01	0,1	-3,02	0,11	1,01	0,61
60-2-10	-3,82	0,14	-1,6	0,02	5,3	1,16
60-2-20	-3,95	1,01	1,53	0,09	5,21	0,54
60-2-30	-3,81	0,01	3,31	0,24	4,41	0,23
60-2-60	-3,93	0,44	5,31	0,07	5,25	0,38
60-2-120	-5,97	0,54	16,15	1,58	10,07	1,72
60-3-10	-2,3	0,22	-1,57	0,13	2,67	0,05
60-3-20	-1,58	0,22	-0,69	0,15	1,68	0,25
60-3-30	-2,02	0,14	1,03	0,31	3,83	2,1
60-3-60	-2,64	0,29	3,63	0,36	3,56	0,12
60-3-120	-1,9	0,41	14,4	0,2	7,22	0,16
60-4-10	1,99	0,26	-2,31	0,34	2,65	0,35
60-4-20	0,13	0,18	-1,78	0,22	1,56	0,05
60-4-30	0,63	0,19	-1,37	0,36	1,61	0,29
60-4-60	1,5	0,3	0,96	0,14	1,67	0,17
60-4-120	4,44	0,12	9,77	0,27	7,12	0,07
80-2-10	-3,79	0,16	1,39	0,12	4,26	0,14
80-2-20	-4,6	0,1	7,46	0,27	6,44	0,32
80-2-30	-7,24	0,06	20,53	0,4	11,71	0,34
80-2-60	-7,09	0,7	27,98	1,41	13,65	0,79
80-2-120	-6,84	0,01	27,71	1,2	13,46	0,35
80-3-10	-2,68	1,03	0,5	0,04	4,58	0,24

80-3-20	-3,89	0,21	5,48	0,55	5,9	0,24
80-3-30	-4,07	0,25	17,88	0,18	9,94	0,85
80-3-60	-5,55	0,26	25,85	0,5	12,98	0,27
80-3-120	-5,89	0,49	25,64	2,01	12,91	0,97
80-4-10	0,42	0,13	0,94	0,09	1,36	0,33
80-4-20	-0,25	0,07	1,05	0,09	1,85	1,15
80-4-30	-0,49	0,02	1,77	0,33	2,24	1,09
80-4-60	-2,17	0,21	9,45	1,88	5,62	0,72
80-4-120	-2,86	0,16	16,23	1,83	8,44	1,54

Tabla A. 14. Datos de densidad aparente, densidad real y porosidad

Tratamiento	Den real (g/mL)	SD	Den aparente (g/mL)	SD	Porosidad (%)	SD
60-2-0	1,040	0,003	1,000	0,008	3,838	0,307
60-2-10	1,069	0,013	1,020	0,006	4,625	1,142
60-2-20	1,086	0,005	1,035	0,021	4,659	0,471
60-2-30	1,095	0,004	1,033	0,080	5,679	0,338
60-2-60	1,376	0,039	1,133	0,019	17,665	2,333
60-2-120	1,560	0,001	1,273	0,175	18,374	0,051
60-3-0	1,040	0,003	1,000	0,008	3,838	0,307
60-3-10	1,060	0,006	1,018	0,016	3,969	0,535
60-3-20	1,073	0,002	1,026	0,012	4,402	0,211
60-3-30	1,077	0,001	1,024	0,005	4,928	0,116

60-3-60	1,187	0,007	1,092	0,146	8,076	0,548
60-3-120	1,472	0,044	1,252	0,109	14,899	2,517
60-4-0	1,040	0,003	1,000	0,008	3,838	0,307
60-4-10	1,054	0,001	1,006	0,002	4,613	0,089
60-4-20	1,064	0,007	1,014	0,004	4,683	0,611
60-4-30	1,068	0,008	1,015	0,011	4,900	0,689
60-4-60	1,108	0,006	1,052	0,018	5,108	0,526
60-4-120	1,317	0,016	1,203	0,088	8,621	1,088
80-2-0	1,040	0,003	1,000	0,008	3,838	0,307
80-2-10	1,069	0,013	1,037	0,003	10,790	4,191
80-2-20	1,268	0,109	1,071	0,006	15,218	3,640
80-2-30	1,295	0,003	1,085	0,003	16,235	0,171
80-2-60	1,540	0,012	1,254	0,004	18,519	0,649
80-2-120	1,564	0,002	1,273	0,000	18,618	0,120
80-3-0	1,040	0,003	1,000	0,008	3,838	0,307
80-3-10	1,065	0,005	1,030	0,010	3,599	0,464
80-3-20	1,102	0,019	1,042	0,004	5,379	1,647
80-3-30	1,137	0,043	1,049	0,037	7,684	3,520
80-3-60	1,510	0,072	1,191	0,007	18,327	3,782
80-3-120	1,556	0,008	1,268	0,005	18,546	0,396
80-4-0	1,040	0,003	1,000	0,008	3,838	0,307
80-4-10	1,064	0,002	1,007	0,016	5,208	0,202
80-4-20	1,075	0,003	1,023	0,009	4,848	0,280
80-4-30	1,092	0,007	1,026	0,009	6,002	0,632
80-4-60	1,301	0,013	1,063	0,011	18,254	0,825

80-4-120	1,538	0,018	1,257	0,002	18,278	0,982
90-2-0	1,040	0,003	1,000	0,008	3,838	0,307
90-2-10	1,111	0,009	0,999	0,071	10,068	0,768
90-2-20	1,298	0,049	1,080	0,130	16,765	3,129
90-2-30	1,377	0,054	1,128	0,054	17,997	3,225
90-2-60	1,541	0,041	1,255	0,291	18,534	2,143
90-2-120	1,582	0,002	1,275	0,014	19,412	0,127
90-3-0	1,040	0,003	1,000	0,008	3,838	0,307
90-3-10	1,087	0,004	1,026	0,020	5,620	0,378
90-3-20	1,122	0,003	1,054	0,008	6,061	0,269
90-3-30	1,240	0,026	1,095	0,002	11,697	1,838
90-3-60	1,534	0,010	1,251	0,010	18,461	0,525
90-3-120	1,582	0,003	1,275	0,009	19,395	0,155
90-4-0	1,040	0,003	1,000	0,008	3,838	0,307
90-4-10	1,078	0,001	1,024	0,003	5,067	0,121
90-4-20	1,109	0,013	1,032	0,003	6,939	1,089
90-4-30	1,162	0,041	1,041	0,003	10,416	3,192
90-4-60	1,440	0,008	1,191	0,007	17,315	0,479
90-4-120	1,549	0,001	1,277	0,010	17,549	0,074