

Baima, José Sebastián

El análisis de imagen como herramienta en los procesos de producción de alimentos: análisis del efecto de la temperatura de deshidratación sobre la calidad de los snacks de banana

**Tesis para la obtención del título de posgrado de
Magíster en Tecnología de los Alimentos**

Director: Ribotta, Pablo Daniel

Documento disponible para su consulta y descarga en Biblioteca Digital - Producción Académica, repositorio institucional de la Universidad Católica de Córdoba, gestionado por el Sistema de Bibliotecas de la UCC.



Esta obra está bajo licencia 2.5 de Creative Commons Argentina.
Atribución-No comercial-Sin obras derivadas 2.5

UNIVERSIDAD CATOLICA DE CORDOBA
Facultad de Ciencias Químicas



UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE CÓRDOBA

Universidad Jesuita

**El análisis de imagen como herramienta en los procesos
de producción de alimentos. Análisis del efecto de la temperatura de deshidratación
sobre la calidad de los snacks de banana**

**Tesis de la Facultad de Ciencias Químicas
de la Universidad Católica de Córdoba conforme
a los requisitos para obtener el título de
Magíster en Tecnología de los Alimentos**

por

José Sebastián Baima

CORDOBA – ARGENTINA

2017

Director del Trabajo Final

Prof. Dr. Pablo Daniel Ribotta
Instituto Superior de Investigación, Desarrollo y Servicios en Alimentos (ISIDSA)
Universidad Nacional de Córdoba

Comisión de Trabajo Final

Dr. Gabriel Raya Tonetti
Gerente Corporativo de Investigación, Desarrollo e Innovación del Grupo Arcor

Dra. María Gabriela Molina
Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Católica de Córdoba

Mgter. Ana Paola Zogbi
Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Católica de Córdoba

Dedicatoria

A mis abuelos, por su esfuerzo y dedicación durante años al trabajo

*A mis padres, por permitirme estudiar y obtener mi título de grado; y durante esta etapa,
por brindarme su apoyo incondicional*

*Con especial cariño a mi nona Laura y mi hermano Ezequiel, con quienes compartí
momentos muy felices de mi vida*

*Al Cura Brochero, hoy San José Gabriel del Rosario Brochero, primer santo argentino que
vivió, realizó su obra y murió en este país, hijo de Villa Santa Rosa, el lugar donde crecí*

Agradecimientos

Al Dr. Pablo Daniel Ribotta, mi director de Tesis, por su valioso aporte de conocimientos, disposición y colaboración durante la realización de este trabajo

Al Instituto Superior de Investigación, Desarrollo y Servicios en Alimentos (ISIDSA) por permitirme utilizar sus instalaciones las veces que fue necesario

A la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales; Facultad de Ciencias Agropecuarias y Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación (FaMAF) de la Universidad Nacional de Córdoba por posibilitar sus equipos en las distintas actividades que se realizaron

A la Cooperativa de Servicios Públicos y Sociales “Villa Santa Rosa” Ltda. (Covisar), por conceder el tiempo necesario para asistir a clases

A mis compañeros de la Maestría, Marcelo Scavone y Gerardo Menichetti, hoy mis amigos, por compartir tantos trabajos, actividades, viajes y horas después de clases

A toda mi familia, por alentarme en este camino, acompañándome en todo y estar siempre presente

A mis amigos, por compartir grandes momentos y estar siempre dispuestos a brindar palabras de ánimo cuando las fuerzas se agotaban

A todos los que formaron parte de este proyecto, MUCHAS GRACIAS!!!

**EL ANALISIS DE IMAGEN COMO HERRAMIENTA EN LOS PROCESOS DE
PRODUCCION DE ALIMENTOS. ANALISIS DEL EFECTO DE LA
TEMPERATURA DE DESHIDRATACION SOBRE LA CALIDAD DE LOS SNACKS
DE BANANA.**

INDICE GENERAL

| | |
|---|-------|
| INDICE DE ABREVIATURAS | x |
| INDICE DE FIGURAS | xii |
| INDICE DE TABLAS | xvi |
| RESUMEN | xviii |
| SUMMARY | xx |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Generalidades sobre la banana | 1 |
| 1.2. Secado | 3 |
| 1.3. Modelado de la cinética de secado | 5 |
| 1.4. Alimentos snacks | 6 |
| 1.5. Análisis de imagen | 6 |
| 1.6. Geometría fractal y análisis de textura de imágenes | 7 |
| 2. HIPOTESIS Y OBJETIVOS | 9 |
| Hipótesis | 9 |
| Objetivos | 9 |
| 3. MATERIALES Y METODOS | 10 |
| 3.1. Obtención de la materia prima y acondicionamiento de las muestras | 10 |
| 3.2. Determinación del contenido de humedad inicial | 11 |
| 3.3. Equipo de secado | 11 |
| 3.4. Adquisición de las imágenes | 11 |
| 3.5. Procesamiento de imágenes | 13 |
| 3.6. Análisis del proceso de secado | 13 |
| 3.6.1. Cálculo del coeficiente de difusión efectivo (D_f) y energía de activación (E_a) | 13 |
| 3.6.2. Determinación de la cinética de secado | 14 |

| | |
|---|----|
| 3.7. Parámetros morfométricos obtenidos a partir del análisis de imágenes. | 16 |
| 3.8. Caracterización de cambios superficiales mediante análisis de textura de imágenes.... | 19 |
| 3.8.1. Algoritmo de <i>Matriz de Co-ocurrencia</i> en escala de grises..... | 19 |
| 3.8.2. Método de <i>Conteo de Cajas Diferencial</i> | 22 |
| 3.8.3. Dimensión Fractal de Contorno (DF_{cont})..... | 24 |
| 3.9. Análisis de color y pardeamiento de las rodajas..... | 25 |
| 3.10. Análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM). | 28 |
| 3.11. Propiedades térmicas del almidón. | 28 |
| 3.12. Análisis instrumental del perfil de textura de los snacks..... | 29 |
| 3.13. Análisis estadístico. | 29 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSION | 30 |
| 4.1. Análisis del proceso de secado de las rodajas de banana. | 30 |
| 4.1.1. Contenido de humedad inicial de la fruta..... | 30 |
| 4.1.2. Características del secado de las rodajas de banana..... | 30 |
| 4.1.3. Cinética de secado..... | 31 |
| 4.1.4. Difusividad efectiva y energía de activación. | 33 |
| 4.2. Aplicación del análisis de imágenes durante secado convectivo de rodajas de <i>Musa Cavendish</i> | 37 |
| 4.2.1. Efecto de la temperatura de secado sobre la apariencia visual de las rodajas..... | 37 |
| 4.2.2. Parámetros morfométricos. | 37 |
| 4.2.3. Análisis Fractal..... | 42 |
| 4.2.4. Relación Humedad – Parámetros Fractales..... | 55 |
| 4.3. Análisis colorimétrico del proceso de deshidratación de las rodajas de banana..... | 57 |
| 4.3.1. Cambios en la Luminosidad (Eje L^*). | 57 |
| 4.3.2. Cambios en la cromaticidad verde-rojo (Eje a^*)..... | 59 |
| 4.3.3. Cambios en la cromaticidad azul-amarillo (Eje b^*)..... | 61 |
| 4.3.4. Cambios de color mediante el ΔE | 62 |
| 4.3.5. Desarrollo de pardeamiento superficial..... | 63 |
| 4.3.6. Efecto de los tratamientos térmicos sobre la tonalidad de grises en pixeles superficiales..... | 64 |
| 4.4. Análisis microestructural de las rodajas, propiedades térmicas del almidón de banana y análisis textural del producto final..... | 67 |
| 4.4.1. Efecto de los tratamientos térmicos sobre la estructura de la matriz. | 67 |
| 4.4.2. Micrografías de los gránulos de almidón. | 67 |
| 4.4.3. Perfil calorimétrico del almidón..... | 70 |

| | |
|--|----|
| 4.4.4. Propiedades texturales de la banana deshidratada..... | 71 |
| 5. CONCLUSIONES..... | 72 |
| ANEXOS..... | 73 |
| GLOSARIO..... | 75 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 76 |

**EL ANALISIS DE IMAGEN COMO HERRAMIENTA EN LOS PROCESOS DE
PRODUCCION DE ALIMENTOS. ANALISIS DEL EFECTO DE LA
TEMPERATURA DE DESHIDRATACION SOBRE LA CALIDAD DE LOS SNACKS
DE BANANA.**

INDICE DE ABREVIATURAS

| | | | |
|----------------------|------------------------------------|-----------|---|
| a*: | cromaticidad verde – rojo | GB: | gigabyte |
| A: | área | GLCM: | Gray Level Co-ocurrence Matrix |
| ASM: | angular second moment o energía | g/L: | gramo por litro |
| b*: | cromaticidad azul – amarillo | IDM: | inverse difference moment u homogeneidad |
| BI _N : | índice de pardeamiento normalizado | JPG: | formato de archivo |
| C: | circularidad | l: | semiespesor de la lámina en secado |
| Cant.: | cantidad | L*: | luminosidad |
| CON: | contraste | MB: | megabyte |
| dF: | diámetro de Feret | MR: | razón de humedad |
| D _f : | coeficiente de difusión efectivo | n, a y b: | constantes de los modelos cinéticos |
| DF _{cont} : | dimensión fractal de contorno | P: | perímetro |
| DF _{sup} : | dimensión fractal de superficie | R: | constante universal de los gases |
| D ₀ : | factor de Arrhenius | RAM: | Random Access Memory |
| DSC: | Differential Scanning Calorimetry | RGB: | Red Green Blue |
| E _a : | energía de activación | SDBC: | Shifting Differential Box Counting |
| Ec: | ecuación | SEM: | Scanning Electron Microscopy |
| ENT: | entropía | | |

T1: temperatura 1

T2: temperatura 2

T3: temperatura 3

USA: Estados Unidos de América

X: humedad a determinado tiempo (kg agua/kg sólido seco)

X_e : humedad de equilibrio (kg agua/kg sólido seco)

X_0 : humedad inicial (kg agua/kg sólido seco)

**EL ANALISIS DE IMAGEN COMO HERRAMIENTA EN LOS PROCESOS DE
PRODUCCION DE ALIMENTOS. ANALISIS DEL EFECTO DE LA
TEMPERATURA DE DESHIDRATACION SOBRE LA CALIDAD DE LOS SNACKS
DE BANANA.**

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Producción/Rendimiento mundial de bananos en el periodo 1994-2014..... | 1 |
| Figura 2. Escala de maduración de la banana de Von Loesecke..... | 3 |
| Figura 3. Estado de maduración de las bananas frescas y su etiqueta comercial..... | 10 |
| Figura 4. Horno eléctrico de convección forzada Philco que se utilizó en el secado..... | 11 |
| Figura 5. Cámara fotográfica Panasonic Lumix utilizada para la captura de imágenes..... | 12 |
| Figura 6. Diagrama de los diferentes objetos intervinientes en la toma de imágenes (a) y su vista en planta (b). | 13 |
| Figura 7. Diámetro de Feret..... | 17 |
| Figura 8. Parámetros morfométricos analizados con el menú <i>Set Measurements</i> del programa Imagej..... | 18 |
| Figura 9. Comando <i>Analyze Particles</i> del Imagej y su parametrización..... | 18 |
| Figura 10. a) Parámetros texturales extraídos con el Imagej y b) Región de interés para análisis de textura de imagen. | 22 |
| Figura 11. a) Región de interés y b) Gráfico de superficie con intensidad de píxeles en escala de grises..... | 23 |
| Figura 12. Gráfico del log del número de cajas (N) vs el log del tamaño de las cajas (r)..... | 23 |
| Figura 13. Crop de 368 x 379 píxeles que abarcó la rodaja completa para el análisis de la DF_{cont} | 24 |
| Figura 14. Resultado de la aplicación del primer macro (a) y la posterior limpieza de los píxeles que interferían en el análisis de contorno (b)..... | 25 |
| Figura 15. Tejidos del banano a analizar..... | 26 |
| Figura 16. a) Menú Imagen y submenú Color del Imagej para obtener el color promedio de la región de interés (b)..... | 26 |
| Figura 17. Cuadro de dialogo Color Inspector 3D del programa Imagej..... | 27 |

| | |
|---|----|
| Figura 18. Efecto de la temperatura del aire sobre la pérdida de humedad de muestras de banana a diferentes tiempos de secado..... | 30 |
| Figura 19. Efecto de la temperatura del aire sobre la velocidad de secado de rodajas banana deshidratadas por convección..... | 31 |
| Figura 20. Curvas de secado experimental (línea de puntos) y teórica (línea continua) de rodajas de banana según el modelo de Page modificado a diferentes temperaturas de aire. | 33 |
| Figura 21. Logaritmo de las razones de humedad versus tiempo de secado para rodajas de banana deshidratadas convectivamente a 80,5 °C (T1), 96 °C (T2) y 130,5 °C (T3)..... | 34 |
| Figura 22. Análisis de regresión lineal para el $\ln D_f$ en función de la inversa de la temperatura de secado (K)..... | 35 |
| Figura 23. Galería de imágenes de rodajas de banana obtenidas durante el secado convectivo por aire caliente en cada temperatura seleccionada. | 38 |
| Figura 24. Efecto del secado sobre el área normalizada de rodaja ($A_{(t)}/A_{(0)}$) en las diferentes condiciones de temperatura de aire. | 39 |
| Figura 25. Efecto del secado sobre el perímetro normalizado de rodaja ($P_{(t)}/P_{(0)}$) en las diferentes condiciones de temperatura de aire. | 40 |
| Figura 26. Efecto del secado sobre la circularidad normalizada de rodaja ($C_{(t)}/C_{(0)}$) en las diferentes condiciones de temperatura de aire. | 41 |
| Figura 27. Efecto del secado sobre el diámetro de Feret normalizado de rodaja ($dF_{(t)}/dF_{(0)}$) en las diferentes condiciones de temperatura de aire..... | 41 |
| Figura 28. Efecto del secado sobre el parámetro textural de energía normalizada ($ASM_{(t)}/ASM_{(0)}$) para rodajas de banana tratadas en diferentes condiciones de temperatura. | 43 |
| Figura 29. Histograma de niveles de gris de rodajas de banana analizadas al inicio y final de cada tratamiento térmico. | 44 |
| Figura 30. Gráfico de intensidades de niveles de grises para una región de interés seleccionada en T1. a) Rodaja fresca (t=0 min). b) Snack final. (t=210 min)..... | 46 |
| Figura 31. Efecto del secado sobre el parámetro textural de homogeneidad normalizada ($IDM_{(t)}/IDM_{(0)}$) para rodajas de banana tratadas en diferentes condiciones de temperatura. | 47 |
| Figura 32. Efecto del secado sobre el parámetro textural de entropía normalizada ($ENT_{(t)}/ENT_{(0)}$) para rodajas de banana tratadas en diferentes condiciones de temperatura. | 48 |

| | |
|--|----|
| Figura 33. Efecto del secado sobre el parámetro textural de contraste normalizado ($CON_{(t)}/CON_{(0)}$) para rodajas de banana tratadas en diferentes condiciones de temperatura..... | 48 |
| Figura 34. Imágenes de regiones de interés de rodajas de banana analizados por <i>GLCM</i> en los tiempos inicial y final de cada temperatura..... | 49 |
| Figura 35. Cambios en la dimensión fractal de superficie (DF_{sup}) en función del tiempo de secado para rodajas de banana tratadas en diferentes condiciones de temperatura. | 51 |
| Figura 36. Topografía superficial 3D (escala de grises) de rodajas de banana en tiempos inicial, intermedio y final de cada tratamiento térmico..... | 52 |
| Figura 37. Cambios en la dimensión fractal de contorno (DF_{cont}) en función del tiempo de secado para rodajas de banana tratadas en diferentes condiciones de temperatura. | 53 |
| Figura 38. Galería de imágenes de muestras de banana durante el secado convectivo por aire caliente a $130,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $0,65\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y sus valores de DF_{cont} correspondientes para cada imagen. | 54 |
| Figura 39. Variación de la entropía en función de la humedad normalizada para los diferentes tratamientos térmicos a) T1, b) T2 y c) T3. | 56 |
| Figura 40. Valores de luminosidad (L^*) en el tejido vascular y mesocárpico de las rodajas de banana para T1 (a), T2 (b), T3 (c) y L^* promedio en todas las temperaturas de secado (d). | 59 |
| Figura 41. Evolución del parámetro a^* en el tejido vascular y mesocárpico de las rodajas de banana para T1 (a), T2 (b), T3 (c) y a^* promedio en todas las temperaturas de secado (d). | 60 |
| Figura 42. Evolución del parámetro b^* en el tejido vascular y mesocárpico de las rodajas de banana para T1 (a), T2 (b), T3 (c) y b^* promedio en todas las temperaturas de secado (d). | 62 |
| Figura 43. Variación de color (ΔE) sobre el área superficial de muestras de <i>Musa Cavendish</i> en diferentes condiciones de temperatura de secado..... | 63 |
| Figura 44. Evolución del índice de pardeamiento normalizado durante el secado convectivo de las rodajas de banana en diferentes condiciones térmicas..... | 64 |
| Figura 45. Modificación de la superficie de rodajas de banana en escala de grises durante el secado convectivo por aire caliente en diferentes condiciones de temperatura. | 66 |
| Figura 46. Morfología de las rodajas de banana obtenidas por SEM en los diferentes tratamientos térmicos. | 68 |

| | |
|---|----|
| Figura 47. Micrografías de gránulos de almidón obtenidas por SEM (350X y 1000X) luego del secado convectivo por aire caliente de rodajas de banana en diferentes condiciones térmicas. | 69 |
| Figura 48. Valores de fuerza máxima encontrados para productos finales de distintos tratamientos térmicos. | 71 |
| Figura 49. Registro de temperatura de horno para T1..... | 73 |
| Figura 50. Registro de temperatura de horno para T2..... | 73 |
| Figura 51. Registro de temperatura de horno para T3..... | 74 |

**EL ANALISIS DE IMAGEN COMO HERRAMIENTA EN LOS PROCESOS DE
PRODUCCION DE ALIMENTOS. ANALISIS DEL EFECTO DE LA
TEMPERATURA DE DESHIDRATACION SOBRE LA CALIDAD DE LOS SNACKS
DE BANANA.**

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla I. Contenido nutricional de la banana (macronutrientes y minerales)..... | 2 |
| Tabla II. Esquema de tiempos de secado para las tres temperaturas..... | 10 |
| Tabla III. Modelos matemáticos empleados en el secado de las rodajas de banana. | 15 |
| Tabla IV. Coeficientes estadísticos de ajuste de los modelos utilizados en el secado de las rodajas de banana. | 15 |
| Tabla V. Ecuaciones de los parámetros texturales del algoritmo de <i>Matriz de Co-ocurrencia</i> en escala de grises. | 20 |
| Tabla VI. Ajuste de los modelos matemáticos para el secado convectivo de rodajas de banana en diferentes temperaturas de aire..... | 32 |
| Tabla VII. Constantes cinéticas obtenidas para los modelos de Page y Page modificado en cada tratamiento de secado..... | 32 |
| Tabla VIII. Ecuaciones matemáticas del modelo de Page modificado para cada temperatura de aire..... | 33 |
| Tabla IX. Coeficientes de difusión efectivo obtenidos para las diferentes temperaturas de secado..... | 34 |
| Tabla X. Correlación de Pearson entre humedad y parámetros morfométricos..... | 42 |
| Tabla XI. Parámetros fractales correspondientes al tiempo máximo de secado de cada tratamiento térmico. | 49 |
| Tabla XII. Correlación de Pearson entre humedad y parámetros fractales <i>GLCM</i> | 50 |
| Tabla XIII. Correlación de Pearson entre humedad y parámetros fractales de rugosidad de superficie y contorno..... | 55 |
| Tabla XIV. Ecuaciones de ajuste de la entropía en función de la humedad normalizada para las diferentes condiciones de temperatura de aire..... | 56 |
| Tabla XV. Modelización del índice de pardeamiento normalizado para el secado de rodajas de banana en diferentes temperaturas de aire..... | 64 |

| | |
|--|----|
| Tabla XVI. Propiedades térmicas del almidón de banana obtenidas en cada temperatura de secado..... | 71 |
|--|----|

EL ANALISIS DE IMAGEN COMO HERRAMIENTA EN LOS PROCESOS DE PRODUCCION DE ALIMENTOS. ANALISIS DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA DE DESHIDRATACION SOBRE LA CALIDAD DE LOS SNACKS DE BANANA.

RESUMEN

La banana es altamente perecedera por su composición y contenido de agua. Su conservación aumenta la disponibilidad de alimentos. El objetivo de este trabajo fue evaluar los cambios morfométricos, fractales y de color durante la deshidratación de rodajas de banana mediante análisis de imágenes y relacionarlos con la pérdida de agua. Las muestras de la parte central de las frutas se sometieron a un tratamiento de inmersión en una solución de ácido cítrico y ácido ascórbico y se deshidrataron. El secado convectivo se realizó entre 75 y 134 °C a una velocidad de aire promedio de 0,65 m.s⁻¹. El modelo de Page modificado fue el que mejor describió la cinética de secado. El efecto de la temperatura sobre el coeficiente de difusión efectivo (D_f) fue evaluado usando la ecuación de Arrhenius ($E_a = 23,66 \text{ kJ.mol}^{-1}$). El análisis de imágenes proporcionó información cuantitativa de los cambios durante el proceso. El área superficial se redujo por efecto de la temperatura, mientras que el perímetro aumentó. Los parámetros de la *Matriz de Co-ocurrencia* describieron los cambios de textura superficial, obteniéndose superficies menos homogéneas y de mayor complejidad y contraste como consecuencia del secado. El análisis de la textura fractal detectó cambios en la intensidad de los píxeles, mostrando superficies rugosas e irregulares a medida que disminuyó el contenido de humedad del producto. La dimensión fractal de contorno, calculada a partir del método de *Conteo de Cajas Diferencial*, aumentó con el tiempo de secado. En relación al color del producto seco, los parámetros a^* y b^* aumentaron, mientras que la luminosidad (L^*) disminuyó, lo que está asociado al oscurecimiento de las rodajas. La velocidad de pardeamiento aumentó con el incremento de la temperatura. Las micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido determinaron la presencia de poros producidos como consecuencia del proceso de deshidratación. El tamaño de estos poros incrementó con la temperatura de secado, lo cual coincidió con el aumento del coeficiente de difusión efectivo. El análisis de imágenes permitió evaluar los cambios producidos durante el secado de rodajas

de banana, lo que facilitó el control del proceso y la determinación de los tiempos de secado, mostrando una alta correlación con la pérdida de humedad.

Palabras Clave: deshidratación, banana, análisis de imágenes

**THE IMAGE ANALYSIS AS A TOOL IN THE PROCESSES OF FOOD
PRODUCTION. ANALYSIS OF THE EFFECT OF DEHYDRATION
TEMPERATURE ON THE QUALITY OF BANANA SNACKS.**

SUMMARY

Bananas are highly perishable due to its composition and water content. Its preservation increases food availability. The objective of this work was to evaluate the morphometric, fractal and color changes during the dehydration of banana slices through the use of image analysis and their association to the water loss. The samples from the central part of the fruit were subjected to a citric acid and ascorbic acid solution treatment and dehydrated. The convective drying was performed between 75 and 134 °C at an average air velocity of 0.65 ms⁻¹, and the modified Page model was the one that best described the drying kinetics. The effect of temperature on the effective diffusion coefficient (D_f) was assessed using the Arrhenius equation ($E_a = 23.66 \text{ kJ. mol}^{-1}$). The images provided quantitative information of the product. The area was reduced by the effect of temperature, and perimeter increased. The *Co-occurrence Matrix* parameters detected changes in the intensity of the pixels, indicating that the surfaces became more complex and irregular as the moisture content of the product decreased. The fractal dimension of the contour, computed on the *Differential Box Counting* basis, increased over drying time. Regarding the color of the dried product, the parameters a^* and b^* increased, whereas the lightness (L^*) decreased, which is associated with the darkening of the slices. The browning velocity increased with increasing temperature. The micrographs obtained by scanning electron microscope determined the presence of pores. The size of these pores increased with temperature, which coincided with the increasing in quantity of the effective diffusion coefficient. The image analysis allowed to evaluate the changes produced during the drying of the banana slices facilitating the control of the process and the determination of the drying times, showing a high correlation with the moisture loss.

Key words: dehydration, banana, image analysis

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades sobre la banana.

La banana es un fruto que pertenece a especies del género *Musa*, dentro de la familia Musaceae, del orden Zingiberales. Es una falsa baya o baya epígina ya que proviene de un ovario ínfero, es decir, ubicado por debajo de los demás componentes de la flor (sépalos, pétalos y estambres). Tiene una forma alargada o ligeramente curvada, con un tamaño que varía entre 7 y 30 cm de largo y hasta 5 cm de diámetro, formando un racimo compacto. Su pericarpo es grueso, de color verde cuando el fruto está inmaduro para posteriormente convertirse en amarillo cuando alcanzó la maduración. Su pulpa blanca o amarillenta es rica en almidón para el fruto inmaduro. Durante la maduración el almidón se convierte en azúcar, haciendo que la pulpa de la fruta sea más blanda, dulce y apetitosa. Es una de las frutas más consumida a nivel mundial y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) coloca al banano en quinto lugar respecto de los cultivos de mayor producción en el mundo después de los principales cereales (maíz, arroz, trigo y cebada). A pesar de ser un importante cultivo en climas tropicales, donde abunda el calor, el sol y el agua, su producción alcanza a más de 120 países con un importante aumento interanual (Figura 1). India es el principal productor mundial de banana con 29.724.550 toneladas en 2014, seguido por China que produjo 11.791.900 toneladas en ese mismo año (1). Ecuador es el principal exportador del mundo con 5.352.000 toneladas en 2013 (2). En Argentina es la fruta más consumida con un promedio anual per cápita de 12 kg (3).

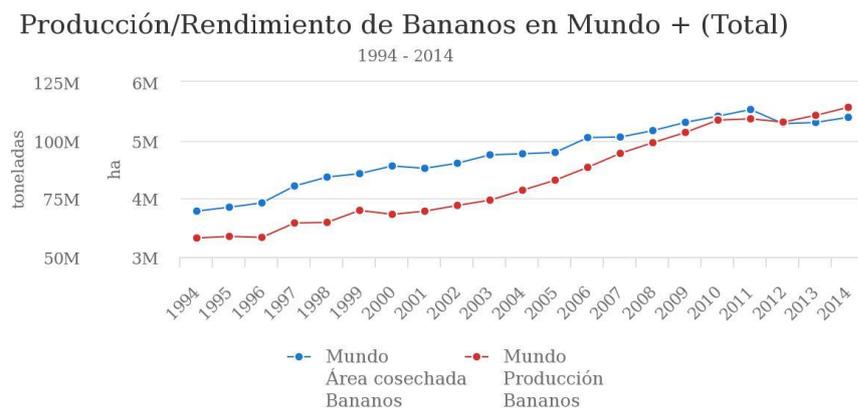


Figura 1. Producción/Rendimiento mundial de bananos en el periodo 1994-2014. (4)

Su contenido en hidratos de carbono – que ofrecen un sabor dulce y agradable – constituye un importante aporte de energía al organismo. Dentro de las vitaminas que posee, podemos mencionar un importante aporte de vitamina C y vitaminas del complejo B como B1, B2 y B3. Tiene un alto contenido en potasio, algo inusual entre las frutas, que lleva a prevenir afecciones habituales como calambres, además de posicionarse como una fruta ideal para reponerse de actividades deportivas. Su pobre contenido en sodio la convierte en un alimento adecuado en casos de hipertensión. Contiene un 75 % de agua y aporta una casi nula proporción de grasas (5). En la Tabla I se muestra la composición nutricional de la banana fresca (6).

Tabla I. Contenido nutricional de la banana (macronutrientes y minerales).

| Nutriente | Cant. (100 g) |
|------------------------|----------------------|
| Agua | 74,91 g |
| Valor energético | 89 kcal |
| Proteínas | 1,09 g |
| Grasas totales | 0,33 g |
| Grasas saturadas | 0,112 g |
| Grasas monoinsaturadas | 0,032 g |
| Grasas poliinsaturadas | 0,073 g |
| Grasas trans | 0,000 g |
| Colesterol | 0,000 mg |
| Carbohidratos | 22,84 g |
| Fibra total | 2,6 g |
| Calcio | 5 mg |
| Hierro | 0,26 mg |
| Magnesio | 27 mg |
| Fósforo | 22 mg |
| Potasio | 358 mg |
| Sodio | 1 mg |
| Vitamina C | 8,7 mg |
| Tiamina (B1) | 0,031 mg |
| Riboflavina (B2) | 0,073 mg |
| Niacina (B3) | 0,665 mg |
| Acido Fólico (B9) | 20 µg |

El problema que presenta esta fruta es su alta susceptibilidad al deterioro por su importante contenido en agua y azúcares. Desde el punto de vista biológico, la banana es una fruta que presenta grandes pérdidas por descomposición después de la cosecha ya que es extremadamente percedera y no permite el uso de la congelación para su conservación (7). Su preservación puede reducir estas pérdidas y aumentar la disponibilidad de la oferta mundial de alimentos (8).

En la Figura 2 se muestra la escala de maduración de la banana realizada por Von Loesecke en 1950 citado en la Revista Intersedes de la Universidad de Costa Rica (9) en donde los distintos colores, que van desde el verde oscuro hasta el muy amarillo, reflejan el grado de madurez. El color de la cáscara es un buen indicador del estado de madurez de la fruta (10).

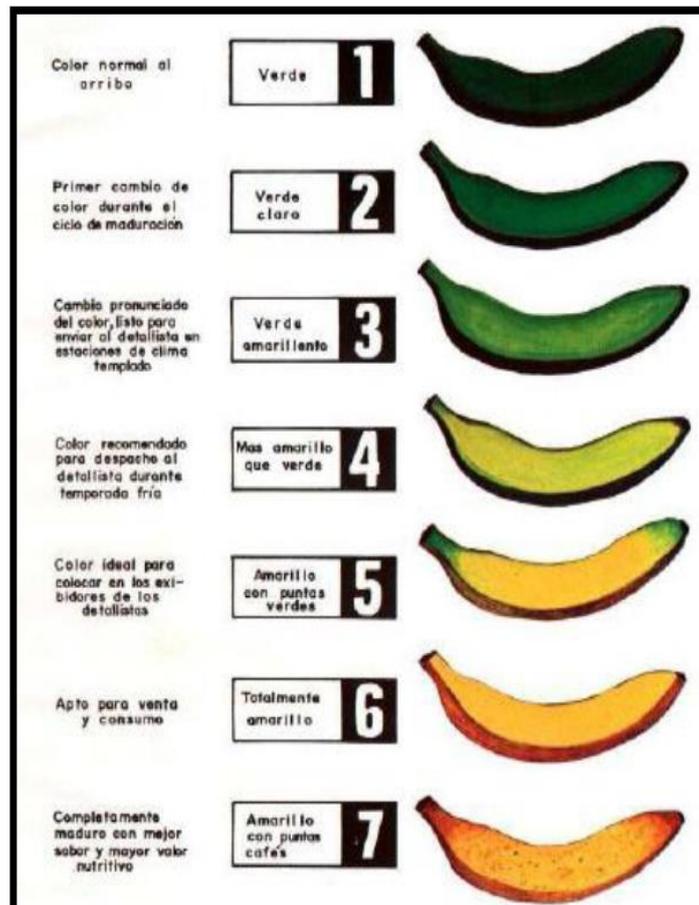


Figura 2. Escala de maduración de la banana de Von Loesecke.

1.2. Secado.

El secado o deshidratación es una operación unitaria muy antigua, pero no por eso menos importante, ya que su fundamento radica en eliminar el agua de los materiales. El artículo 168 del Código Alimentario Argentino (11) refiere a deshidratación como una operación que implica someter a los alimentos a la acción principal del calor artificial para privarlos de la mayor parte del agua que contienen. Es una técnica muy utilizada en materiales biológicos y ampliamente aplicado en la industria de los alimentos ya que permite preservar los productos procesados por un mayor tiempo. La ausencia de agua en los mismos, dificulta el desarrollo de microorganismos y la acción de enzimas, ambos causantes de descomposiciones o cambios químicos no deseados en el producto. La deshidratación es uno de los procesos más comunes utilizados para mejorar la estabilidad de los alimentos, ya que

disminuye considerablemente la actividad de agua del material, reduce la actividad microbiológica y minimiza los cambios físicos y químicos durante su almacenamiento (12). En general, una reducción del contenido de agua por debajo del 10 %, hace que los microorganismos dejen de ser activos. Sin embargo, cuando el contenido de humedad está por debajo del 5 %, los alimentos mantienen su sabor y valor nutritivo, además de poder almacenarse por un periodo de tiempo bastante mayor.

El secado y la deshidratación son los métodos más importantes que se practican ampliamente para frutas y vegetales debido al considerable ahorro en el envasado y almacenamiento (13). El secado convencional con aire caliente, que es el método más antiguo utilizado en la conservación de alimentos, ha sido aplicado para el secado de bananas (14). La deshidratación de banana para formar un snack representa una forma de aprovechar un producto perecedero y poder conservarlo por un periodo de tiempo mayor.

En el transcurso de la etapa de secado se producen cambios físicos (color, textura, forma, porosidad) y cambios químicos (pardeamiento y otras reacciones) en los tejidos celulares (15, 16). Esta serie de cambios afectan las propiedades del alimento. Entre los fenómenos físicos, el encogimiento es uno de los cambios más evidente, el cual raramente es uniforme, ya que el alimento no presenta una elasticidad perfecta porque el agua no se elimina uniformemente de todas las zonas. El encogimiento se produce durante la deshidratación debido a que la matriz viscoelástica se contrae en el espacio previamente ocupado por el agua eliminada (17). Si la velocidad inicial de secado es alta, las capas externas de las piezas se tornan rígidas y el volumen final del producto se fija antes. Al continuar el secado, los tejidos internos se rompen, generando una estructura abierta. Por el contrario, si la velocidad inicial de desecación es baja, durante las primeras fases del secado, la retracción está relacionada con la cantidad de agua eliminada. Hacia el final del secado, la retracción es cada vez menor, de modo que el tamaño y la forma final (o definitiva) del producto se alcanzan antes de terminar el secado. Estas condiciones originan un producto de mayor densidad.

En general, el secado rápido y las altas temperaturas causan mayores cambios en la textura de los alimentos que las velocidades moderadas de secado y las bajas temperaturas. A medida que se elimina el agua durante el secado, los solutos se mueven desde el interior del alimento hasta la superficie. El mecanismo y la velocidad de movimiento son específicos para cada soluto y dependen del tipo de alimento y de las condiciones de secado utilizadas. La evaporación del agua provoca la concentración de solutos en la superficie. Las altas temperaturas de aire (particularmente con frutas, pescados y carnes), causan complejos

cambios químicos y físicos a solutos en la superficie, y la formación de una costra dura e impermeable. Esto se denomina endurecimiento superficial y reduce la velocidad de secado para producir un alimento con una superficie seca y un interior húmedo. Se minimiza controlando las condiciones de secado para evitar gradientes de humedad excesivamente altos entre el interior y la superficie del alimento (18). El desplazamiento de algunos compuestos solubles presentes en el alimento se ve dificultado por las paredes celulares, que actúan como membranas semipermeables. A la migración de estos sólidos dentro del alimento, contribuye también la retracción del producto, que crea presiones en el interior de las piezas. El resultado puede ser la acumulación de componentes solubles en la superficie, al evaporarse el agua.

Por otro lado, dentro de los fenómenos químicos, el principal cambio en los tejidos vegetales desecados, especialmente en la fruta, es el cambio de color asociado al pardeamiento. Este consiste en la reacción de los aldehídos de los azúcares con los grupos amino de las proteínas. El pardeamiento de Maillard o pardeamiento no enzimático, está favorecido por las temperaturas altas y por la alta concentración de grupos reactivos en presencia de agua. En el curso de la deshidratación los grupos reactivos se concentran y desarrollan en el alimento cambios importantes, fundamentalmente asociados al oscurecimiento de la superficie del producto.

Evitar el pardeamiento enzimático con un pretratamiento de las muestras antes del secado mantiene la calidad del alimento y evita la formación de sabores y olores indeseables, cambios de color o en el valor nutritivo de la fruta. Un tratamiento por inmersión es un método eficaz que se puede utilizar para minimizar el oscurecimiento enzimático en frutas y verduras. Los compuestos químicos como el ácido ascórbico y el ácido cítrico, han sido bien estudiados y utilizados en la industria alimentaria, según describe Demirel & Turhan (19). El ácido ascórbico es un antioxidante que conserva la fruta del oscurecimiento durante el secado. El ácido cítrico también actúa como agente anti-oscorecimiento (20).

1.3. Modelado de la cinética de secado.

El secado de frutos es un proceso difícil de describir debido a la complejidad de los fenómenos internos y externos del proceso (21). No obstante, el conocimiento de la cinética de secado de los materiales biológicos permite controlar y optimizar el proceso de deshidratación. Existen varios modelos empíricos que derivan del modelo difusional de la segunda ley de Fick para diferentes geometrías (22) y que permiten interpretar los datos experimentales para estudiar las velocidades de transferencia de materia durante estos procesos. El modelo difusional de Fick considera que el agua migra desde el interior del

sólido a la superficie por un proceso de difusión y a su vez permite obtener el coeficiente de difusión efectivo (D_f) (23).

1.4. Alimentos snacks.

Los alimentos snacks se consumen para satisfacer temporalmente el hambre entre comidas principales, proporcionar una mínima cantidad de energía o simplemente por placer. No son considerados como uno de los alimentos principales del día y muchas veces son clasificados como “comida basura” por tener poco o ningún valor nutricional, exceso de aditivos y no contribuir a la salud general. A pesar de esto, siempre han tenido una parte importante en la vida de las personas ya que son altamente populares, se pueden comer de parado, sin plato y son fáciles de llevar. Aprovechando que su industria es muy variable y que su mercado está en constante crecimiento, en parte porque las empresas tratan de innovar con nuevos productos y muchas otras veces relacionado con cambios en el estilo de vida de los consumidores, este tipo de alimento se puede rediseñar para convertirse en más saludable. El interés en un producto de bajo contenido graso ha aumentado recientemente ya que el exceso del consumo de lípidos saturados es considerado una causante de elevar el colesterol en sangre, la presión sanguínea y las enfermedades cardíacas coronarias (24). Un snack de banana es un producto de alto valor agregado, que además de ser atractivo para todas las edades, representa una alternativa saludable frente a los snacks tradicionales o las golosinas que no contienen aportes nutritivos.

1.5. Análisis de imagen.

La técnica de análisis de imagen es una herramienta muy importante, novedosa y con un campo de aplicación cada vez mayor en los procesos de producción de alimentos. De ella se obtienen parámetros cuantitativos que permiten valorar los cambios que ocurren durante el desarrollo de un proceso, en base a las características extraídas desde las imágenes. Esta técnica efectúa mediciones mucho más precisas y consistentes que las realizadas por los seres humanos, dando una medida objetiva del color y morfología de un objeto que un inspector puede evaluar solo subjetivamente (25). A partir de estos conceptos, la generación de conocimiento durante la etapa de secado permite tener un mejor control del proceso y predecir la calidad del producto final. Para ello el análisis de imagen resulta útil para evaluar la calidad de diversos alimentos en base a sus características físicas. En los últimos años ha aumentado el uso del sistema de visión por computadora para el control de calidad de frutas y vegetales (26). Esta técnica de análisis integra un dispositivo de adquisición de imágenes y una computadora. Su aplicación es cada vez más importante en ciencia y tecnología de alimentos,

principalmente en el área de calidad, ya que reemplaza a los procedimientos convencionales. Tiene la ventaja de ser rápida, exacta y no destructiva (27). Su uso permite valorar características físicas como tamaño, morfología y color además de realizar análisis de textura de alimentos a partir de su imagen digital. Su aplicación puede ser una herramienta eficaz en los procesamientos térmicos ya que la información que brinda representa una forma adicional de controlar los procesos en virtud de las modificaciones que va sufriendo el alimento y que se reflejan en las imágenes tomadas.

La técnica de análisis de imagen se puede dividir en cinco etapas, dentro de las cuales encontramos: (1) la adquisición de la imagen en forma digital, por medio de cámaras o microscopios; (2) el pre-procesamiento de la imagen, que tiene como objetivo mejorar la información de la imagen obtenida; (3) la segmentación de la imagen, que implica categorizar la imagen en partes o zonas a partir de las cuales se extrae la información que nos interesa; (4) mediciones del objeto, lo cual hace referencia a extraer características morfométricas o estructurales como lo son el tamaño, la forma, el color o la textura y (5) clasificación de objetos, que consiste en agrupar los objetos de interés identificados en las imágenes (28).

1.6. Geometría fractal y análisis de textura de imágenes.

El término fractal deriva del latín *fractus* y significa fragmentado o irregular. Fue usado por Mandelbrot en 1975 para referirse a una serie de objetos de una geometría que no podía ser explicada con la geometría clásica o geometría de Euclides. La geometría fractal permite estudiar y describir morfologías irregulares, como por ejemplo, las formas que tienen los objetos creados por la naturaleza. Difiere de la geometría clásica ya que ésta última tiene su base en describir a los objetos ocupando de forma total un espacio dimensional (triángulos, cuadrados, cubos, esferas, etc.) no pudiendo describir objetos que presenten formas complejas. El uso de la teoría fractal ha cobrado mucha importancia en estos últimos tiempos ya que tratar de describir los cambios que ocurren en las matrices alimentarias resulta muy difícil debido a la heterogeneidad intrínseca de estos materiales. Desde que se comenzó a utilizar el concepto de fractal, su aplicación en ciencia y tecnología de los alimentos ha sido relevante. Un claro ejemplo de ello, es el desarrollo de esta teoría en la descripción de la morfología de los productos deshidratados (29, 30, 31). Este concepto también está relacionado con el grado de irregularidad que presenta el contorno de un objeto (32, 33).

La aplicación del análisis fractal, para monitorear los cambios físicos de los alimentos durante su procesamiento, ha resultado de interés en el área de tecnología de alimentos (34). De este análisis se pueden obtener datos de textura de las imágenes que permiten observar la

complejidad de una superficie determinada. Es así, que para caracterizar cuantitativamente la superficie de las rodajas, se puede trabajar con la *Matriz de Co-ocurrencia* en escala de grises (*GLCM, Gray Level Co-Occurrence Matrix*, por sus siglas en inglés) que se aplica para obtener los parámetros texturales desde las imágenes en escala de grises (35, 36) y el método de *Conteo de Cajas Diferencial* (*SDBC, Shifting Differential Box Counting*, por sus siglas en inglés) que permite obtener datos de rugosidad superficial y contorno (37). Estos algoritmos son relevantes cuando las dimensiones euclidianas no son buenos descriptores de complejidad.

2. HIPOTESIS Y OBJETIVOS

Hipótesis.

El análisis de imagen es una herramienta útil y eficaz para comprender y cuantificar los cambios que ocurren en el proceso de deshidratación de rodajas de banana.

La información obtenida a partir del análisis de imagen permite mejorar las condiciones de secado y conseguir productos de calidad superior.

Objetivos.

Objetivo general.

Analizar el proceso de deshidratación de rodajas de banana a través de análisis de imágenes y geometría de fractales y su relación con la cinética de secado y desarrollo de color.

Objetivos específicos.

Caracterizar los cambios estructurales y morfológicos de las rodajas de banana durante el proceso de deshidratación a diferentes temperaturas.

Analizar la cinética de pérdida de humedad y el desarrollo de color durante el proceso de deshidratación de las rodajas de banana a diferentes temperaturas.

Analizar el efecto de la temperatura de deshidratación sobre las características estructurales de la banana.

Relacionar los cambios estructurales y morfológicos de la banana con la pérdida de humedad durante el proceso de deshidratación.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1. Obtención de la materia prima y acondicionamiento de las muestras.

Las bananas se obtuvieron de un supermercado local de Villa Santa Rosa (Provincia de Córdoba, Argentina) y su selección se realizó por tamaño y apariencia. Se trabajó en todos los ensayos con la marca Banana Tropical de origen ecuatoriano (calidad elegida) y variedad *Cavendish* (Figura 3). La madurez de la banana se determinó de acuerdo a la escala de Von



Figura 3. Estado de maduración de las bananas frescas y su etiqueta comercial.

Loesecke con grado de maduración 5 (amarillo con puntas verdes, sección 1.1). Las frutas fueron peladas y se trabajó con la parte central (descartando los extremos) para conseguir una mayor uniformidad en las muestras. Las rodajas se cortaron con un utensilio rebanador de cocina (Mandolin®) marca Cazaux y su espesor aproximado fue de

3 mm. Lotes de 35 rodajas se sumergieron en una solución con 10 g/L de ácido ascórbico y 10 g/L de ácido cítrico durante 1 minuto antes del secado, lo cual fue adoptado sobre la base de una práctica utilizada en la industria alimentaria según describe Pan et al. (14). Luego, las rodajas fueron escurridas sobre papel absorbente y posteriormente deshidratadas en horno por convección a tres temperaturas de aire. A diferentes tiempos de secado (Tabla II) se registró el peso del lote con una balanza analítica (Ohaus, modelo Traveler TA 150), se tomaron muestras de las rodajas de banana y se analizaron.

Tabla II. Esquema de tiempos de secado para las tres temperaturas.

| Temperatura de aire | Tiempo (min) | | | | | | | | | | |
|---------------------|--------------|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| | T1 | 0 | 15 | 30 | 45 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 |
| T2 | 0 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 50 | 60 | 65 |
| T3 | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 28 | 30 | | | |

3.2. Determinación del contenido de humedad inicial.

Para determinar el contenido de humedad inicial de las muestras se realizaron ensayos experimentales en los cuales las rodajas fueron sometidas a calentamiento a 105 °C hasta peso constante en una estufa de secado (38). Los ensayos se realizaron por duplicado.

3.3. Equipo de secado.

Se trabajó con un horno eléctrico de convección forzada Philco HE-PH40W (Figura 4) cuya velocidad de aire fue de 0,65 m.s⁻¹ determinado por anemómetro térmico de hilo caliente Testo 405. El tiempo máximo de secado fue de 3,5 horas y las temperaturas de secado estuvieron comprendidas entre 75 °C y 134 °C. Las temperaturas de trabajo fueron seteadas en el equipo por medio de un sistema de registro con datalogger (Center, modelo 307 con termocupla tipo K) que determinó el rango real de variación. Los rangos fueron: Temperatura 1 (T1) entre 75 y 86 °C (promedio T1=80,5 °C); Temperatura 2 (T2) entre 93 y 99 °C (promedio T2=96 °C) y Temperatura 3 (T3) entre 127 y 134 °C (promedio T3=130,5 °C). Se realizaron ensayos preliminares sobre cuatro lotes para cada temperatura de aire. Posteriormente, los tratamientos a cada temperatura se realizaron por duplicado. La medida de la bandeja donde se colocaron las muestras fue de 30 x 38 cm sobre la cual se colocó una lámina de silicona negra y encima ella las rodajas a deshidratar.



Figura 4. Horno eléctrico de convección forzada Philco que se utilizó en el secado.

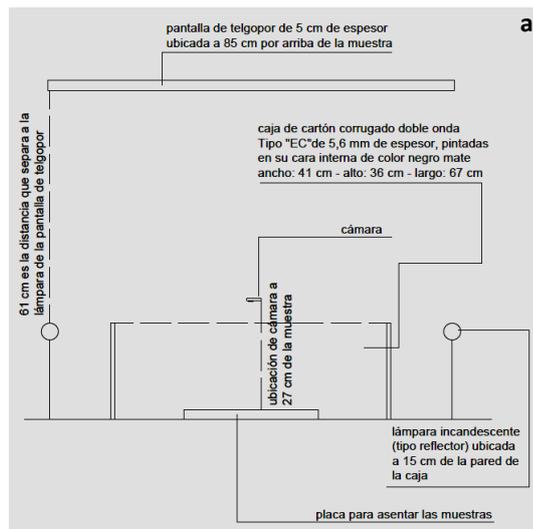
3.4. Adquisición de las imágenes.

Las imágenes de las muestras se obtuvieron con una cámara digital Panasonic Lumix, modelo DMC-TZ3 (Figura 5). Las imágenes RGB en formato de archivo JPG se analizaron posteriormente con el programa de análisis de imagen descrito en la sección 3.5 (a).



Figura 5. Cámara fotográfica Panasonic Lumix utilizada para la captura de imágenes.

La bandeja con las muestras se centró en la base de una caja de 41 x 67 x 36 cm, cuyas paredes internas fueron pintadas de color negro mate para no generar ningún tipo de interferencia con la iluminación. Esta última estuvo compuesta por dos lámparas incandescentes tipo reflector, que iluminaron una pantalla blanca ubicada a 85 cm por encima del lugar donde se colocaron las muestras. Las lámparas estuvieron ubicadas por fuera de la caja, a una distancia de 15 cm y a 61 cm de la pantalla. La cámara digital se ubicó a 27 cm por encima de las muestras. La Figura 6 muestra un diagrama de los objetos intervinientes en la adquisición de imágenes. Las fotografías se tomaron sin flash, sin zoom, con autodisparador y en modo macro ya que el mismo permite adquirir mayores detalles. Las imágenes obtenidas fueron de 3072 x 2304 pixeles, de contraste y nitidez normal, con balance de blanco automático y en relación de aspecto 4:3. En cuanto a la calidad de las imágenes, se trabajó con ajustes en “modo fino”, que prioriza la calidad de la imagen en comparación con el modo standard. Se obtuvieron imágenes de la vista superior de las rodajas de banana a lo largo del proceso de secado, en los tiempos anteriormente mencionados en la Tabla II. De esta forma se evaluaron los cambios que ocurrieron en las rodajas de banana.



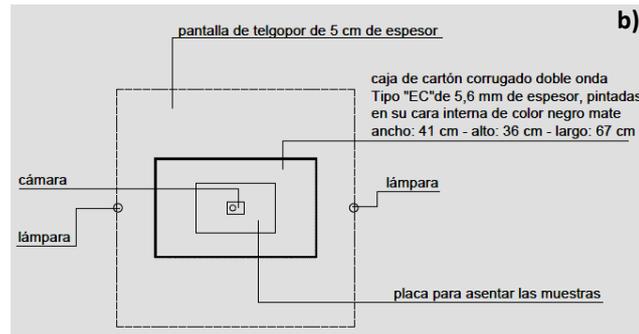


Figura 6. Diagrama de los diferentes objetos intervinientes en la toma de imágenes (a) y su vista en planta (b).

3.5. Procesamiento de imágenes.

El procesamiento se realizó con una notebook Hewlett-Packard HP Pavilion dv 7 con procesador AMD Phenom II N950 Quad-Core Processor, memoria RAM de 4096 MB, disco duro de 445 GB y sistema operativo Windows 7 Home Premium de 64 bits. Este equipo contaba con los siguientes programas instalados:

a) el programa de análisis de imágenes, ImageJ versión 1.49m, el cual es de dominio público creado por National Institutes of Health (USA) y con el cual se realizó el análisis de los parámetros morfométricos, fractales y de color de los snacks de banana.

b) el programa SigmaPlot, versión 10.0 para Windows, que se utilizó para aplicar las ecuaciones de los modelos matemáticos que mejor se ajustaron al secado. Este programa permitió crear y mostrar gráficos de una forma clara y precisa sobre los datos tomados experimentalmente.

c) el programa Infostat (Universidad Nacional de Córdoba) versión Estudiantil (2013e), software estadístico con el cual se realizó el análisis de los resultados obtenidos.

3.6. Análisis del proceso de secado.

3.6.1. Cálculo del coeficiente de difusión efectivo (D_f) y energía de activación (E_a).

Se determinó el coeficiente de difusión efectivo (D_f) aplicando el modelo difusional, utilizado en el estudio de transferencia de masa de productos agrícolas según describen Vega et al. (39) (Ecuación 1) que considera tiempos largos de secado y geometría plana en una dimensión.

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{D_f \pi^2 t}{4l^2}\right) \quad (\text{Ec. 1})$$

En donde MR es la razón de humedad, X es la humedad a cada tiempo (kg agua/kg sólido seco), X_e es la humedad de equilibrio (kg agua/kg sólido seco), X_0 es la humedad inicial (kg agua/kg sólido seco), t es el tiempo (s), l es el semiespesor de la lámina (m) y D_f es el coeficiente de difusión efectivo ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

El efecto de la temperatura sobre la difusividad efectiva se describió utilizando la relación de Arrhenius (Ecuación 2) ya que en los alimentos la influencia de la temperatura de secado sobre el coeficiente de difusión efectivo sigue la tendencia descrita por esta ecuación (40, 19).

$$D_f = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (\text{Ec. 2})$$

En donde D_0 es el factor de Arrhenius ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$); E_a es la energía de activación ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$); T es la temperatura absoluta de secado (K) y R es la constante universal de los gases ($8,314 \times 10^{-3} \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Representando gráficamente el $\ln(D_f)$ en función de $1/T$ (K) se obtiene una línea recta, de cuya pendiente se extrae la energía de activación (E_a) y su ordenada al origen corresponde al factor de Arrhenius (D_0).

3.6.2. Determinación de la cinética de secado.

Para determinar la cinética de secado de las rodajas de banana se ajustaron cinco modelos matemáticos para capa fina utilizados en la literatura. Los modelos seleccionados fueron: Newton, Page, Page modificado, Henderson-Pabis y Wang & Singh. En estos modelos, la variable dependiente es MR que representa la relación de humedad y los coeficientes n, a y b son constantes de los modelos cinéticos. La Tabla III muestra las ecuaciones correspondientes.

Tabla III. Modelos matemáticos empleados en el secado de las rodajas de banana.

| | | |
|--------------------------|--|---------|
| Newton | $MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-bt)$ | (Ec. 3) |
| Page | $MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-bt^n)$ | (Ec. 4) |
| Page Modificado | $MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-bt)^n$ | (Ec. 5) |
| Henderson - Pabis | $MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = a \exp(-bt)$ | (Ec. 6) |
| Wang & Singh | $MR = at^2 + bt + 1$ | (Ec. 7) |

Para evaluar el ajuste de los modelos matemáticos con los datos experimentales, se utilizó un método de regresión no lineal, considerando los siguientes determinantes estadísticos: R (coeficiente de correlación de Pearson), R^2 (coeficiente de determinación), R^2_{adj} (coeficiente de determinación ajustado, mide el porcentaje de variación de la variable dependiente teniendo en cuenta el número de variables incluidas en el modelo) y S_{XY} (error estándar de aproximación). La Tabla IV muestra las ecuaciones correspondientes.

Tabla IV. Coeficientes estadísticos de ajuste de los modelos utilizados en el secado de las rodajas de banana.

| | | |
|--|--|----------|
| Coeficiente de correlación de Pearson | $R = \frac{\partial_{XY}}{\partial_X \partial_Y}$ | (Ec. 8) |
| Coeficiente de determinación | $R^2 = \frac{\partial_{XY}^2}{\partial_X^2 \partial_Y^2}$ | (Ec. 9) |
| Coeficiente de determinación ajustado | $R^2_{adj} = 1 - \left[\frac{SS_{Error}}{n - k} / \frac{SS_{Total}}{n - 1} \right]$ | (Ec. 10) |
| Error estándar de aproximación | $S_{XY} = \sqrt{\frac{\sum Y^2 - a \sum Y - b \sum XY}{n - 2}}$ | (Ec. 11) |

Siendo ∂_{XY} la covarianza de XY, ∂_X la desviación estándar de la variable X, ∂_Y la desviación estándar de la variable Y, SS_{Error} sumatoria de cuadrado de errores, SS_{Total} suma del cuadrado de las desviaciones de los datos respecto a la media, n y k constantes estadísticas de ajuste. Estos coeficientes obtenidos con el programa SigmaPlot 10.0 se evaluaron para determinar cuál fue el modelo que mejor se ajustó a la cinética de secado.

3.7. Parámetros morfométricos obtenidos a partir del análisis de imágenes.

Se aplicó análisis de imágenes durante el secado para evaluar cambios en los parámetros geométricos como lo son el tamaño y la forma de las rodajas. Entre los parámetros seleccionados encontramos cuatro de nuestro interés:

- Área (A): es un descriptor dimensional (41) y se refiere al número total de píxeles que caen dentro del contorno del elemento analizado, multiplicado por el área de un píxel. Este parámetro se utilizó para describir el encogimiento global de las rodajas. Los resultados se expresaron en valores normalizados según la Ecuación 12.

$$\text{Area Normalizada} = \frac{A_{(t)}}{A_{(0)}} \quad (\text{Ec. 12})$$

En donde, $A_{(t)}$ corresponde al valor promedio de área en cada tiempo de secado y $A_{(0)}$ corresponde al valor promedio de área inicial de las rodajas de banana.

- Perímetro (P): es un descriptor dimensional y se lo define como el número total de píxeles pertenecientes al contorno del objeto, en este caso, la longitud del contorno de la rodaja de banana. Los resultados se expresaron en valores normalizados según la Ecuación 13.

$$\text{Perímetro Normalizado} = \frac{P_{(t)}}{P_{(0)}} \quad (\text{Ec. 13})$$

En donde, $P_{(t)}$ corresponde al valor promedio de perímetro en cada tiempo de secado y $P_{(0)}$ corresponde al valor promedio de perímetro inicial de las rodajas de banana.

- Circularidad (C): es un descriptor morfológico que expresa cuan similar es un objeto comparado con un referente perfectamente circular. Su valor está comprendido entre cero y uno, siendo que, un valor de uno indica un círculo perfecto. A medida que el valor se aproxima a cero el objeto pierde circularidad, adquiriendo una forma cada vez más alargada (una línea tiene un valor de circularidad de cero). Matemáticamente se define en la Ecuación 14.

$$\text{Circularidad} = 4\pi \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro}^2} \quad (\text{Ec. 14})$$

Los resultados de Circularidad se expresaron en valores normalizados según la Ecuación 15.

$$\text{Circularidad Normalizada} = \frac{C_{(t)}}{C_{(0)}} \quad (\text{Ec. 15})$$

En donde, $C_{(t)}$ corresponde al valor promedio de circularidad en cada tiempo de secado y $C_{(0)}$ corresponde al valor promedio de circularidad inicial de las rodajas de banana.

- Diámetro de Feret (dF): es un descriptor morfológico y se lo define como la distancia más larga de separación entre dos puntos cualesquiera a lo largo del límite de selección del objeto (mayor distancia de separación entre dos píxeles tomados a orientaciones diferentes). Este descriptor, al igual que el área, permitió evaluar el encogimiento global de las rodajas. El diámetro se traza entre tangentes paralelas como se ilustra en la Figura 7. Cabe apropiado aclarar que una misma partícula puede tener diferentes medidas de diámetro de Feret para los casos en que las tangentes se tracen especificando una determinada dirección.

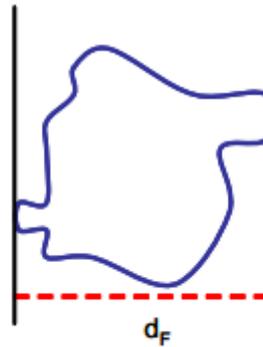


Figura 7. Diámetro de Feret (42).

Los resultados de diámetro de Feret se expresaron en valores normalizados según la Ecuación 16.

$$\text{Diámetro de Feret Normalizado} = \frac{dF_{(t)}}{dF_{(0)}} \quad (\text{Ec. 16})$$

En donde, $dF_{(t)}$ corresponde al valor promedio de diámetro de Feret en cada tiempo de secado y $dF_{(0)}$ corresponde al valor promedio de diámetro de Feret inicial de las rodajas de banana.

El análisis morfométrico se realizó tomando 15 rodajas por cada lote ubicadas en la parte central de la bandeja de secado. Se colocó una regla milimetrada que sirvió como referencia para el análisis de imágenes. Las imágenes RGB se convirtieron a 8-bits (0 negro, 255 blanco) y posteriormente se creó una imagen binaria que permitió obtener los cuatro

parámetros morfométricos antes mencionados. La Figura 8 muestra el cuadro de dialogo del ImageJ de los parámetros analizados.

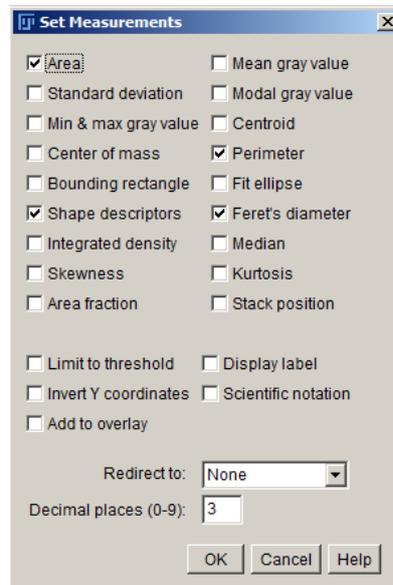


Figura 8. Parámetros morfométricos analizados con el menú *Set Measurements* del programa ImageJ.

Luego se procedió al análisis de las rodajas donde se tuvo en cuenta los parámetros del menú *Analyze Particles* (Figura 9). Este comando permitió medir objetos en imágenes binarias para lo cual se limitó la selección de estos objetos entre 2 y 10 cm² sin discriminar la circularidad.

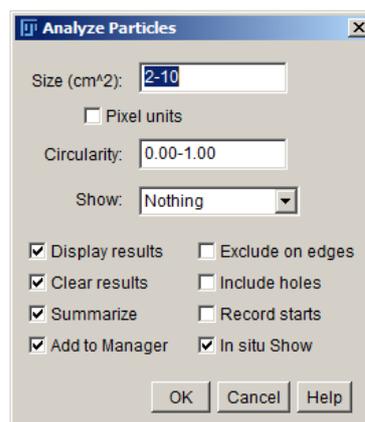


Figura 9. Comando *Analyze Particles* del ImageJ y su parametrización.

Para automatizar las tareas y optimizar los tiempos de análisis se desarrolló una rutina de análisis denominada “macro”. Una macro consiste en una serie de instrucciones que se almacenan para que éstas se puedan ejecutar de forma secuencial mediante una sola orden de

ejecución. La siguiente secuencia muestra cómo se realizó el análisis morfométrico de las fotografías.

1. > run("8-bit");
2. > setAutoThreshold("Default dark");
3. > //run("Threshold...");
4. > //setThreshold(0, 155);
5. > setOption("BlackBackground", false);
6. > run("Make Binary", "thresholded remaining black");
7. > run("Fill Holes");
8. > run("Analyze Particles...", "size=2-10 display clear summarize add in_situ");

3.8. Caracterización de cambios superficiales mediante análisis de textura de imágenes.

3.8.1. Algoritmo de *Matriz de Co-ocurrencia* en escala de grises.

La *Matriz de Co-ocurrencia* en escala de grises (*GLCM*) es el método frecuentemente utilizado para determinar matemáticamente las características de textura superficial a partir de imágenes en escala de grises. La información textural que se obtiene está contenida en la intensidad del nivel de gris que presentan los píxeles. Este algoritmo estadístico es de segundo orden ya que considera la relación de co-ocurrencia entre *grupos de dos píxeles* de la imagen a una distancia determinada. En la Tabla V se muestran los cuatro parámetros texturales comúnmente utilizados, ya que según describe Haralick et al. (35), se pueden obtener hasta catorce parámetros diferentes.

La relación espacial que existe entre los dos píxeles de la pareja, uno de los cuales es llamado pixel de referencia y el otro pixel vecino, presenta las siguientes características: la intensidad en los niveles de grises (i, j) de cada uno de los píxeles está comprendido en el intervalo de 0 (negro) a 255 (blanco); N es el número de niveles de grises posible, que para una imagen de 8 bit son 256 niveles; $P_{i,j}$ es la probabilidad de aparición de la pareja de píxeles con intensidades de gris i y j respectivamente, a una distancia determinada y con un ángulo de separación determinado.

Tabla V. Ecuaciones de los parámetros texturales del algoritmo de *Matriz de Co-ocurrencia* en escala de grises.

| Parámetro textural | | |
|-----------------------------|--|----------|
| Energía (<i>ASM</i>) | $\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j}^2$ | (Ec. 17) |
| Contraste (<i>CON</i>) | $\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} (i - j)^2$ | (Ec. 18) |
| Homogeneidad (<i>IDM</i>) | $\sum_{i,j=0}^{N-1} \frac{P_{i,j}}{1 + (i - j)^2}$ | (Ec. 19) |
| Entropía (<i>ENT</i>) | $\sum_{i,j=0}^{N-1} -P_{i,j} \ln P_{(i,j)}$ | (Ec. 20) |

La descripción de los parámetros texturales se detalla a continuación:

- Energía (*ASM*): también denominada uniformidad o Segundo Momento Angular (*ASM*, Angular Second Moment, por sus siglas en inglés) es una medida de la homogeneidad local de una imagen. Este parámetro presenta altos valores cuando la frecuencia de aparición de las parejas de píxeles en la *Matriz de Co-ocurrencia* tiene la misma intensidad de nivel de gris, a tal punto que es máxima – cuyo valor será 1 – cuando la imagen presente la máxima uniformidad textural. Los resultados de energía se expresaron en valores normalizados de acuerdo a la Ecuación 21:

$$\text{Energía Normalizada} = \frac{ASM_{(t)}}{ASM_{(0)}} \quad (\text{Ec. 21})$$

En donde, $ASM_{(t)}$ corresponde al valor promedio de energía en cada tiempo de secado y $ASM_{(0)}$ corresponde al valor promedio de energía inicial de las rodajas de banana.

- Contraste (*CON*): es una medida de la variación local del nivel de gris en una imagen. Este parámetro aumenta a medida que el nivel de gris de la pareja de píxeles se aleja hacia los extremos de la escala en una imagen de 8 bits, adquiriendo su valor máximo cuando un píxel presenta una intensidad de 0 y su vecino de 255. Al estar elevado al cuadrado, se incrementa exponencialmente a medida que la diferencia $i - j$ sea mayor. Los resultados de contraste se expresaron en valores normalizados según la Ecuación 22:

$$\text{Contraste Normalizado} = \frac{CON_{(t)}}{CON_{(0)}} \quad (\text{Ec. 22})$$

En donde, $CON_{(t)}$ corresponde al valor promedio de contraste en cada tiempo de secado y $CON_{(0)}$ corresponde al valor promedio de contraste inicial de las rodajas de banana.

- Homogeneidad (IDM): también denominada Momento Inverso de la Diferencia (IDM, Inverse Difference Moment, por sus siglas en inglés), es una medida de la diferencia en la intensidad de gris entre pixeles vecinos. Es opuesta al contraste, y al ser una relación inversa, si hubiese una única intensidad de gris en los pixeles de la imagen, el valor de la homogeneidad sería 1 y la imagen tendría un bajo contraste. Los resultados de homogeneidad se expresaron en valores normalizados según la Ecuación 23:

$$\text{Homogeneidad Normalizada} = \frac{IDM_{(t)}}{IDM_{(0)}} \quad (\text{Ec. 23})$$

En donde, $IDM_{(t)}$ corresponde al valor promedio de homogeneidad en cada tiempo de secado e $IDM_{(0)}$ corresponde al valor promedio de homogeneidad inicial de las rodajas de banana.

- Entropía (ENT): es una variable que está relacionada con el orden o desorden que tiene una imagen y se utilizó para caracterizar la textura de la imagen. Imágenes complejas tendrán altos valores de entropía (27). Por el contrario, cuanto más alto sea el valor de $P_{i,j}$ más baja será la entropía y la imagen será más uniforme dentro de la ventana. La entropía puede tener un valor de cero cuando todos los pixeles de la imagen presenten un solo nivel de gris. Los resultados de entropía se expresaron en valores normalizados según la Ecuación 24:

$$\text{Entropía Normalizada} = \frac{ENT_{(t)}}{ENT_{(0)}} \quad (\text{Ec. 24})$$

En donde, $ENT_{(t)}$ corresponde al valor promedio de entropía en cada tiempo de secado y $ENT_{(0)}$ corresponde al valor promedio de entropía inicial de las rodajas de banana.

En los parámetros texturales calculados en este trabajo se consideró como distancia de separación entre pixeles igual a 1, con una dirección específica o ángulo de desplazamiento de 0° . El análisis de la *Matriz de Co-ocurrencia* en escala de grises se realizó sobre 5 rodajas por lote, seleccionando un área de interés de 87×255 pixeles que abarcó desde un extremo al otro de la rodaja, pasando por la parte central (sección de imagen de orientación vertical). La Figura 10 muestra la parametrización de las características de textura y una imagen de la región de interés de la rodaja.

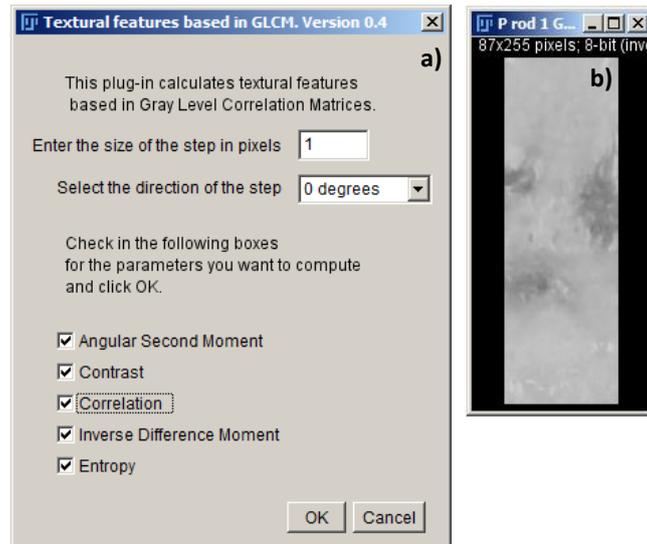


Figura 10. a) Parámetros texturales extraídos con el ImageJ y b) región de interés para análisis de textura de imagen.

Previo a la aplicación de la *Matriz de Co-ocurrencia* se utilizó un macro con el cual se optimizó los tiempos de análisis. El orden de secuencias del macro se muestra a continuación.

1. > run("8-bit");
2. > run("GLCM Texture", "enter=1 select=[0 degrees] angular contrast correlation inverse entropy");

3.8.2. Método de *Conteo de Cajas Diferencial*.

El *Algoritmo Modificado de Conteo Diferencial de Cajas (SDBC)* determinó la textura fractal o dimensión fractal de textura en las imágenes de los snacks de banana. La dimensión fractal es posible utilizarla para caracterizar la textura de las superficies y expresarla como una medida de la rugosidad o irregularidad que presenta la superficie de una imagen (43). Este método consiste en la superposición sucesiva de una cuadrícula – o malla – que varía el tamaño de celda (r) en cada uno de los análisis y registra el número de celdas ocupadas (N) que pertenecen a la estructura de la figura. Este algoritmo está incluido en el plug-in SDBC del ImageJ y se calculó sobre un gráfico de intensidad de superficie generado a partir de imágenes 2 D en escala de grises (coordenadas x,y) y su intensidad en el eje z . El análisis se realizó sobre 5 rodajas por lote (las mismas que se utilizaron para el Algoritmo de *Matriz de Co-ocurrencia* en escala de grises), cuyos “crops” de 87 x 255 píxeles abarcaron la región de interés (Figura 11). El valor de la dimensión fractal de superficie (DF_{sup}) es la pendiente del gráfico de la relación logarítmica del número de cajas ocupadas ($\log N$) en función de la

inversa del logaritmo del tamaño de cajas ($\log r$) (Ecuación 25). Para imágenes en escala de grises los valores de dimensión fractal oscilan entre 2 y 3 (Figura 12). Las superficies lisas, sin rugosidad, presentan valores numéricos próximos a 2 ($DF_{\text{sup}} > 2$), mientras que las superficies altamente rugosas presentan un incremento en los valores de la dimensión fractal (44, 43).

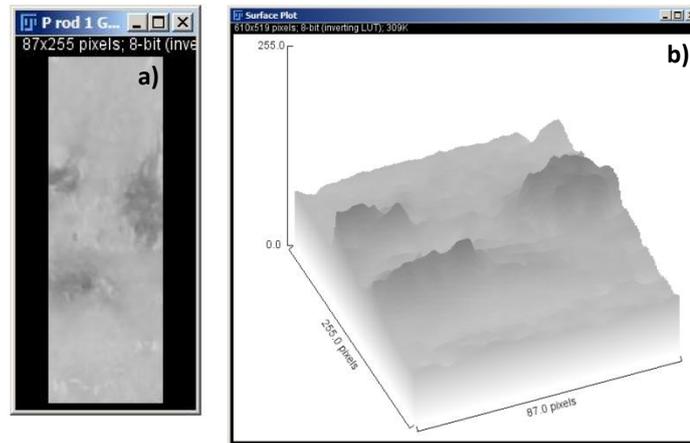


Figura 11. a) Región de interés y b) gráfico de superficie con intensidad de píxeles en escala de grises.

$$DF_{\text{sup}} = \frac{\log(N)}{\log\left(\frac{1}{r}\right)} \quad (\text{Ec. 25})$$

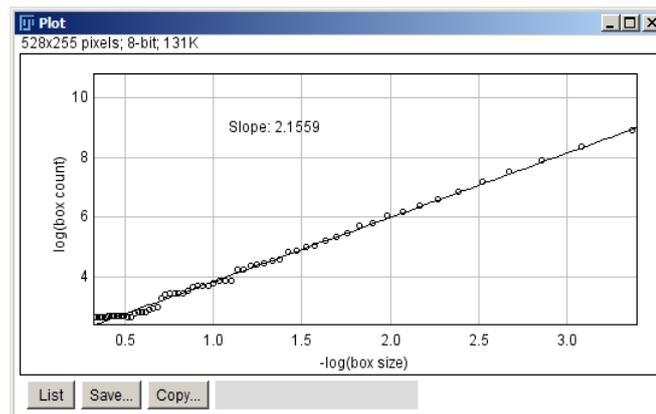


Figura 12. Gráfico del log del número de cajas (N) vs el log del tamaño de las cajas (r).

El macro desarrollado previamente permitió apilar los 5 segmentos de las imágenes, convertirlos a 8 bits, realizar el análisis fractal y posteriormente desapilarlos. Esta herramienta permitió ahorrar tiempo en el análisis de imágenes. La configuración del tamaño de las cajas se consideró como “automático” que es la opción predeterminada por el programa ImageJ y

comprendió tamaños de caja entre 10 y 50 píxeles cuadrados. La siguiente secuencia muestra las ordenes ejecutadas por la macro.

1. > run("Images to Stack", "name=Stack title=[] use");
2. > run("8-bit");
3. > run("SDBC", "start=50 end=10");
4. > run("Stack to Images");

3.8.3. Dimensión Fractal de Contorno (DF_{cont}).

La dimensión fractal de contorno (DF_{cont}) es una herramienta que permitió determinar cuan irregular o sinuoso fue el borde de las rodajas. Asignar un valor al contorno de las rodajas, por medio del uso de fractales, resultó importante debido a que la deformación del material no puede ser explicada por la geometría tradicional de Euclides. La aplicación de este análisis durante el secado permitió seguir los cambios ocurridos sobre el contorno de la fruta. Cuanto más irregular o sinuoso sea el borde de las rodajas, mayor será su DF_{cont} . En este análisis se trabajó con 5 rodajas por lote, las mismas que se utilizaron para los Algoritmos de *Matriz de Co-ocurrencia* en escala de grises y *Conteo Diferencial de Cajas*. La región de interés fue de 368 x 379 píxeles y abarcó toda la rodaja (Figura 13).



Figura 13. Crop de 368 x 379 píxeles que abarcó la rodaja completa para el análisis de la DF_{cont} .

Para este análisis se utilizaron dos macros en donde el primero convirtió la imagen a 8 bits, la binarizó, llenó el espacio correspondiente a la rodaja y finalmente trazó el contorno. La siguiente secuencia muestra las ordenes ejecutadas por la macro.

1. > run("8-bit");
2. > setAutoThreshold("Default dark");
3. > //run("Threshold...");
4. > //setThreshold(0, 133);
5. > setOption("BlackBackground", false);

6. > run("Make Binary", "thresholded remaining black");
7. > run("Fill Holes");
8. > run("Outline");

Posteriormente, se realizó limpieza de los píxeles aislados que aparecían en la imagen para que no interfirieran en los análisis (Figura 14).

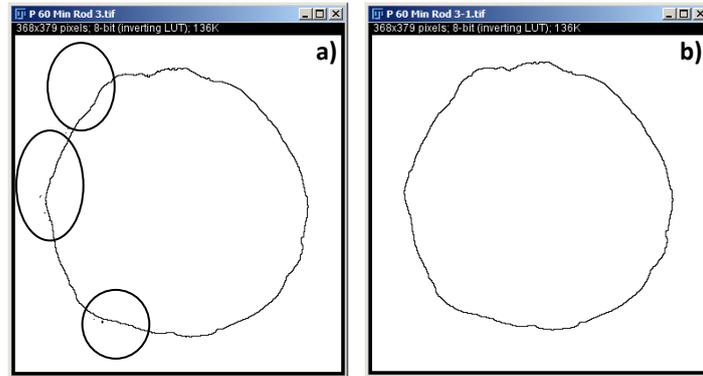


Figura 14. Resultado de la aplicación del primer macro (a) y la posterior limpieza de los píxeles que interferían en el análisis de contorno (b).

Finalmente, se aplicó el segundo macro que permitió calcular la DF_{cont} propiamente dicha. La siguiente secuencia muestra cómo se ejecutó la macro.

1. > setOption("BlackBackground", false);
2. > run("Make Binary");
3. > run("FractalCount", "plot automatic threshold=70 start=24 min=6 box=1.2 number=1);

3.9. Análisis de color y pardeamiento de las rodajas.

El análisis de color se realizó inicialmente con espectrofotómetro de superficie Konica Minolta modelo CM-600d con iluminante D65 “*luz día*” y ángulo de observación de 10° entre la luz emitida y la luz reflejada. El método empleado fue CIE Lab 1976 y el área de medición de 11 mm de diámetro. Las mediciones de color se realizaron sobre el tejido vascular del fruto – centro de la rodaja de banana – y sobre el tejido mesocárpico, que corresponde a la parte más externa, que rodea al tejido vascular (Figura 15). Se analizó un lote por cada temperatura y para cada tiempo de secado se evaluaron los parámetros de color en el espacio tridimensional formado por los ejes L^* , a^* y b^* de este modelo cromático. Las mediciones se realizaron por duplicado tomando dos rodajas que se obtuvieron de la bandeja de secado.

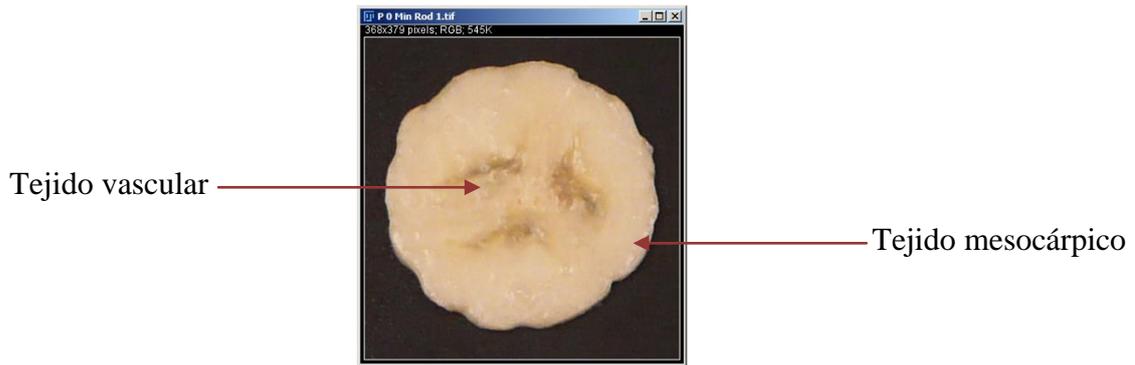


Figura 15. Tejidos del banano a analizar.

Posteriormente, el análisis de color se realizó utilizando las herramientas del programa ImageJ como se muestra en la Figura 16. Para ello se seleccionaron 5 rodajas de cada lote (las mismas que se utilizaron en el análisis fractal) y se evaluó el cambio de color y pardeamiento en la región de interés. Para esta operación, inicialmente, se realizó un promedio de color de todos los píxeles incluidos en el crop, simulando una superficie lisa, uniforme y de una sola tonalidad a partir de la cual se pudieron obtener los distintos parámetros de color.

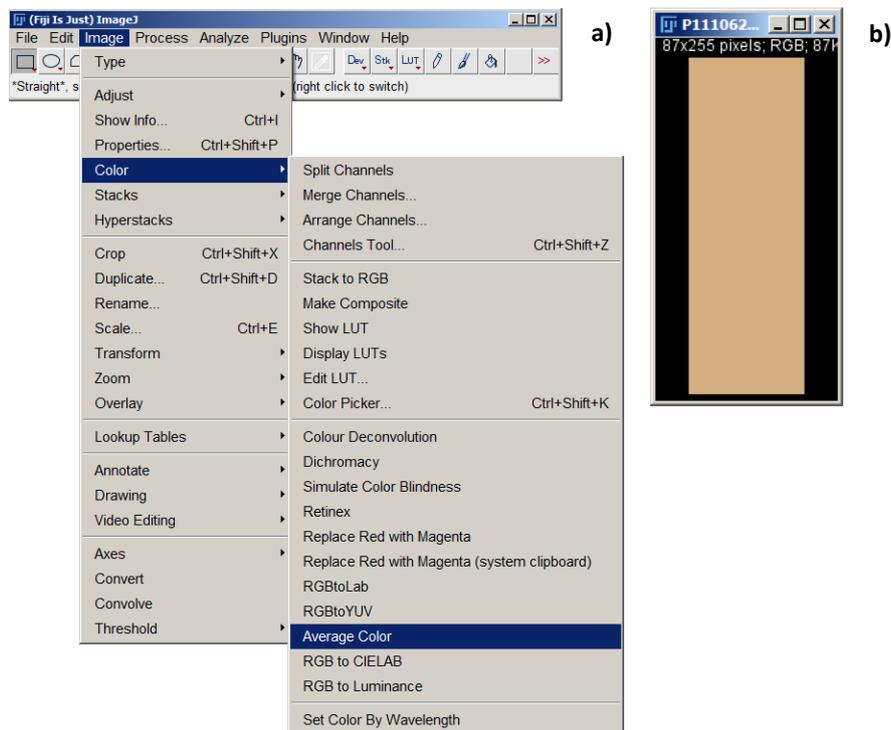


Figura 16. a) Menú Imagen y submenú Color del ImageJ para obtener el color promedio de la región de interés (b).

Las imágenes de tonalidad uniforme conseguidas en el paso anterior se analizaron para cada uno de los tiempos y temperaturas de estudio (Tabla II). Se trabajó con el submenú Color Inspector 3D (v2.3) dentro del menú Plugins seleccionando entre las opciones que ofrece el programa el espacio de color CIELab, a partir del cual se obtuvieron los parámetros de color L^* , a^* y b^* . Los resultados de estos parámetros colorimétricos se expresaron como el promedio de los 5 “crops”. La Figura 17 muestra la obtención de las coordenadas de color.

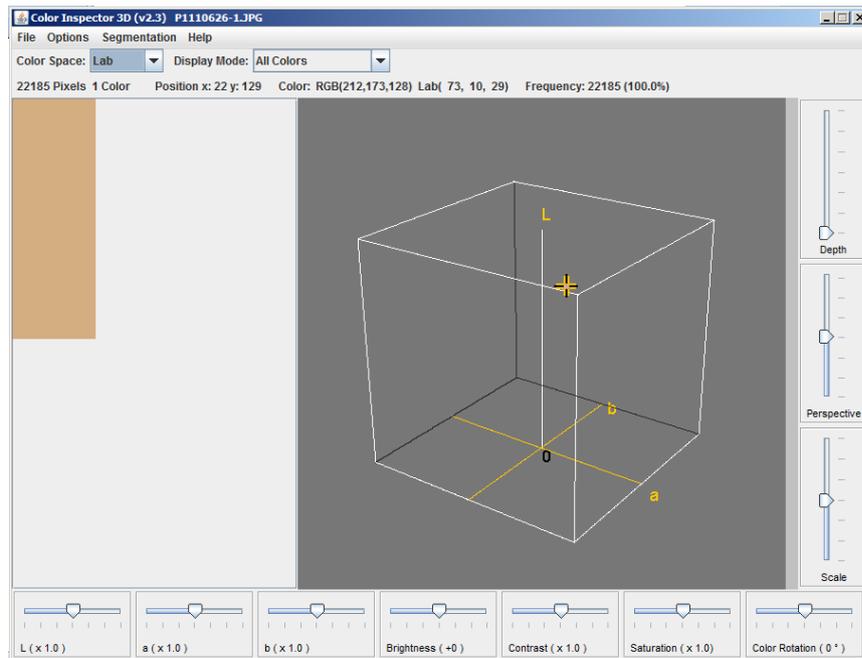


Figura 17. Cuadro de dialogo Color Inspector 3D del programa ImageJ.

La diferencia de color (ΔE , Ecuación 26) se utilizó para describir el cambio de color de las rodajas durante el secado (45). Esta ecuación tiene en cuenta el cambio en cada uno de los colores descrito por los parámetros L^* , a^* y b^* , y puede ser más aplicable que los tres parámetros de color de forma individual para evaluar el efecto de las condiciones de secado en plátanos (46, 47).

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (\text{Ec. 26})$$

En donde el eje L^* representa Luminosidad ($L^*= 0$, negro y $L^*= 100$, blanco), el eje a^* indica la posición entre verde y rojo (valores negativos indican verde mientras que valores positivos indican rojo) y el eje b^* indica la posición entre azul y amarillo (valores negativos indican azul mientras que valores positivos indican amarillo). En la ecuación anterior L_0^* , a_0^* y b_0^* corresponden a valores que presentó la rodaja al inicio de cada ciclo de secado (rodaja

fresca), mientras que L^* , a^* y b^* corresponden a valores que presentó la rodaja en los restantes tiempos de secado de la Tabla II.

El índice de pardeamiento (BI, "*Browning Index*", por sus siglas en inglés) representa la pureza del color marrón y es un parámetro importante en procesos donde el pardeamiento enzimático y no enzimático tiene lugar (48). Para calcular el índice de pardeamiento se utilizó la Ecuación 27.

$$BI = \frac{100 (x - 0,31)}{0,172} \quad (\text{Ec. 27})$$

en donde:

$$x = (a + 1,75L^*) / (5,645L^* + a^* - 3,012b^*)$$

3.10. Análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM).

Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Microscopía Electrónica y Análisis por Rayos X (LAMARX, FaMAF-UNC). Las muestras se prepararon en soportes utilizando cintas y pinturas conductoras. Los fragmentos se colocaron sobre trozos de aluminio, recubiertos con oro bajo vacío, y luego se observaron en un microscopio electrónico de barrido de alta resolución (ZEISS FE-SEM Σ igma, Alemania) para superficie externa, usando un voltaje de aceleración entre 3 y 5 kV. Se analizaron muestras finales de los distintos tratamientos térmicos.

3.11. Propiedades térmicas del almidón.

La temperatura y entalpía de gelatinización del almidón de banana se analizó mediante calorimetría diferencial de barrido con calorímetro DSC Mettler Toledo 823e (Suiza). El análisis térmico de la banana fresca se realizó colocando entre 50 y 60 mg de fruta en las capsulas de aluminio. En el caso de los productos deshidratados, se pesó entre 15 y 20 mg de banana seca y se agregó tres veces la cantidad de agua. Las charolas de aluminio se sellaron herméticamente y se dejaron reposar por 12 horas antes de realizar los análisis térmicos y se utilizó una charola vacía como referencia. Posteriormente, fueron sometidas a un programa de calentamiento en un intervalo de temperaturas de 25 a 120 °C y a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min. Se obtuvieron los siguientes parámetros: temperatura de inicio de la gelatinización (T_0), temperatura de pico o temperatura de gelatinización (T_P), temperatura de finalización de la gelatinización (T_F) y cambio de entalpía de gelatinización

del almidón (ΔH). Estos datos fueron obtenidos directamente usando el programa del equipo. Los análisis se realizaron por duplicado.

3.12. Análisis instrumental del perfil de textura de los snacks.

Las rodajas fueron analizadas con un texturómetro Instron con software Bluehill[®] 2. Los ensayos se realizaron de la siguiente manera: las rodajas secas de banana se colocaron sobre el marco de carga del texturómetro con una distancia de separación entre partes de 11 mm. El cabezal provisto de una sonda de acero con terminación en forma de aguja se desplazó a una velocidad de $2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ hasta tocar la muestra. A partir de allí comenzó la medición de la dureza y el desplazamiento del cabezal fue de $3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ hasta rotura. La fuerza máxima necesaria para producir la fractura del snack en el punto máximo que alcanza la curva, corresponde a la dureza. Los análisis se realizaron sobre 4 lotes por cada temperatura y en cada uno de los lotes se tomó 3 snacks para evaluar el perfil de dureza.

3.13. Análisis estadístico.

Se utilizó el software estadístico InfoStat (Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina) con el cual se analizaron los datos obtenidos mediante el análisis de varianza (ANOVA). Los resultados fueron comparados con el método DGC y las diferencias significativas fueron consideradas cuando $p < 0,05$. La prueba DGC constituye un método particionante (sin solapamiento de letras entre las medias) recomendable para comparar cinco o más medias (49).

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Análisis del proceso de secado de las rodajas de banana.

4.1.1. Contenido de humedad inicial de la fruta.

La humedad inicial de las muestras frescas de *Musa cavendish* fue de 78,11 %, lo cual es equivalente a 3,568 kg agua/kg sólido seco. Similares contenidos de humedad inicial fueron informados por otros autores (8, 50, 51).

4.1.2. Características del secado de las rodajas de banana.

La Figura 18 muestra la influencia de la temperatura del aire de secado ($T_1=80,5$; $T_2=96$ y $T_3=130,5$ °C) sobre la pérdida de humedad de los lotes experimentales de banana. Se encontró que los cambios en el contenido de humedad en función del tiempo fueron diferentes para las distintas temperaturas, ya que cuanto mayor fue la temperatura del aire, más rápidamente se secó el producto y más corto fue el tiempo de procesamiento (52). En la Figura 18 también se puede observar que la mayor proporción de agua se perdió en los tiempos iniciales de cada proceso. Los valores de humedad finales obtenidos fueron inferiores a 0,04 kg agua/kg sólido seco para T_1 e inferiores a 0,02 kg agua/kg sólido seco para T_2 y T_3 .

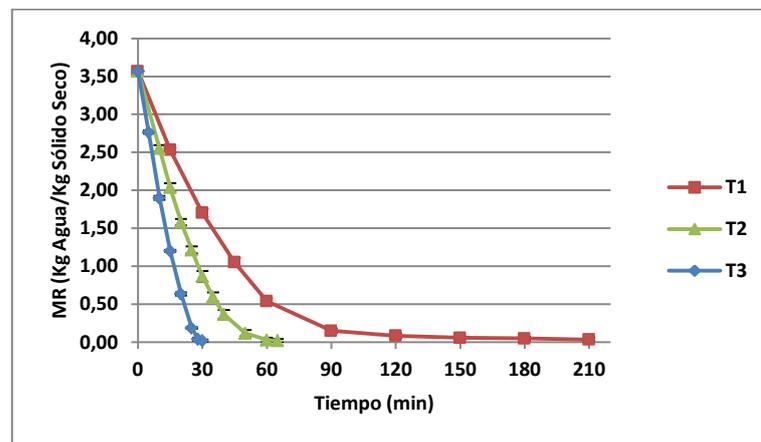


Figura 18. Efecto de la temperatura del aire sobre la pérdida de humedad de muestras de banana a diferentes tiempos de secado.

La disminución del contenido de humedad de la banana presentó similar comportamiento que otros productos de origen agrícola como manzana, arroz, papa y zanahoria según describen Pakowsky y Adamski (53), Simal et al. (54), Poomsa-ad et al. (55) y Srikiatden y Roberts (56).

En la Figura 19 se representa la velocidad de secado experimental de las rodajas de banana para las diferentes temperaturas. Thuwapanichayanan et al. (57), trabajaron en el secado de rodajas de banana y determinaron que la curva de velocidad de secado se dividió en dos periodos de velocidad. En el primero, la velocidad de secado cambió linealmente con el contenido de humedad y en el segundo periodo, la velocidad cambió de manera no lineal. Esto se atribuyó a que en el primer periodo, la velocidad disminuye generalmente en forma lineal con la humedad de la muestra ya que la superficie expuesta saturada de agua se reduce, es decir, está cada vez más seca en virtud que el movimiento de líquido desde el interior es más lento que la transferencia de vapor de agua al aire de secado. Para contenidos de humedad menores, segundo período de velocidad decreciente, toda la evaporación tiene lugar procedente desde el interior del sólido, por esta razón la velocidad de secado disminuye con más rapidez hasta alcanzar el contenido de humedad de equilibrio y la humedad libre es cero (58).

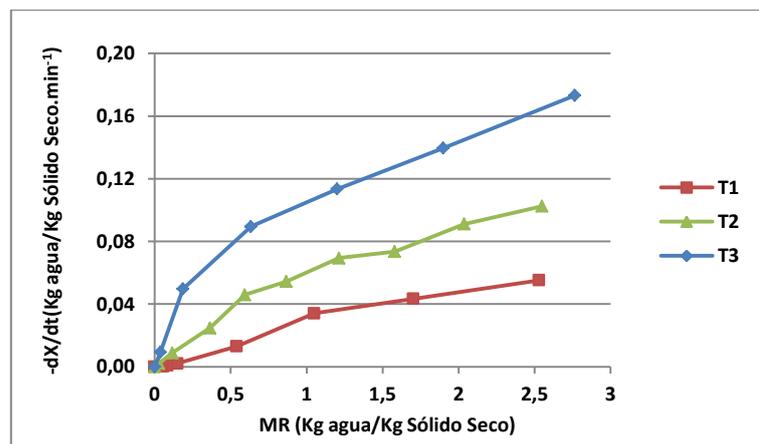


Figura 19. Efecto de la temperatura del aire sobre la velocidad de secado de rodajas banana deshidratadas por convección.

4.1.3. Cinética de secado.

Para determinar el comportamiento de la cinética de secado de las rodajas de banana se ajustaron los datos experimentales a los modelos empíricos de Henderson & Pabis, Newton, Page, Page modificado y Wang & Singh. En la Tabla VI se muestran los resultados de los coeficientes de los diferentes modelos determinados mediante el método de regresión no lineal para cada temperatura de aire analizada.

Al analizar y comparar los cinco modelos, se observó que los coeficientes de Page y Page modificado fueron iguales en todas las temperaturas. La cinética de secado se adaptó satisfactoriamente para ambos modelos, mostrando valores del coeficiente de determinación

(R^2) superiores a 0,99. Para determinar cuál de los dos modelos fue efectivamente el que mejor se ajustó, se evaluaron las constantes de los modelos cinéticos en la Tabla VII.

Tabla VI. Ajuste de los modelos matemáticos para el secado convectivo de rodajas de banana en diferentes temperaturas de aire.

| Temp. | Estadístico | Hend. & Pabis | Newton | Page | Page modificado | Wang & Singh |
|-------|---------------|---------------|--------|--------|-----------------|--------------|
| T1 | R | 0,9970 | 0,9966 | 0,9994 | 0,9994 | 0,9596 |
| | R^2 | 0,9940 | 0,9932 | 0,9988 | 0,9988 | 0,9209 |
| | Adj R^2 | 0,9932 | 0,9932 | 0,9987 | 0,9987 | 0,8983 |
| | Stand Err Est | 0,0289 | 0,0289 | 0,0125 | 0,0125 | 0,1112 |
| T2 | R | 0,9885 | 0,9865 | 0,9993 | 0,9993 | 0,9997 |
| | R^2 | 0,9770 | 0,9731 | 0,9986 | 0,9986 | 0,9993 |
| | Adj R^2 | 0,9744 | 0,9731 | 0,9985 | 0,9985 | 0,9991 |
| | Stand Err Est | 0,0519 | 0,0532 | 0,0127 | 0,0127 | 0,0099 |
| T3 | R | 0,9808 | 0,9780 | 0,9977 | 0,9977 | 0,9992 |
| | R^2 | 0,9620 | 0,9564 | 0,9954 | 0,9954 | 0,9983 |
| | Adj R^2 | 0,9556 | 0,9564 | 0,9946 | 0,9946 | 0,9976 |
| | Stand Err Est | 0,0792 | 0,0785 | 0,0277 | 0,0277 | 0,0186 |

Tabla VII. Constantes cinéticas obtenidas para los modelos de Page y Page modificado en cada tratamiento de secado.

| Modelo | Temp. | Constantes | Coefficient | Std. Error |
|-----------------|-------|-------------|-------------|------------|
| Page | T1 | b | 0,0117 | 0,0017 |
| | | n | 1,2287 | 0,0392 |
| | T2 | b | 0,0125 | 0,0015 |
| | | n | 1,3992 | 0,0363 |
| | T3 | b | 0,0182 | 0,0047 |
| | | n | 1,5431 | 0,0949 |
| Page Modificado | Temp. | Estadístico | Coefficient | Std. Error |
| | T1 | b | 0,0268 | 0,0005 |
| | | n | 1,2286 | 0,0392 |
| | T2 | b | 0,0437 | 0,0005 |
| | | n | 1,3993 | 0,0363 |
| | T3 | b | 0,0744 | 0,0021 |
| | | n | 1,5430 | 0,0949 |

Entre las variables independientes consideradas, la temperatura del aire de secado y la velocidad del aire, son las que más afectan significativamente el parámetro “b” en la ecuación de secado en capa fina. Se encontró que el parámetro “n” en la ecuación se comporta en función de la humedad relativa del aire y contenido de humedad inicial del producto (59). La constante “b” está más ligada a la velocidad del aire y temperatura de secado, mientras el parámetro de “n” depende de la naturaleza del producto y de las condiciones de secado, evidenciando la resistencia interna del producto al proceso de secado. El parámetro “b”

presentó un menor error estándar en el modelo de Page modificado, lo cual da una mejor calidad de ajuste y por lo tanto una mejor aproximación matemática a los datos experimentales. Las ecuaciones matemáticas resultantes del modelo de Page modificado se muestran en la Tabla VIII.

Tabla VIII. Ecuaciones matemáticas del modelo de Page modificado para cada temperatura de aire.

| Temp. | Constante b | Constante n | Ecuación final |
|-----------|-------------|-------------|--|
| T1 | 0,0268 a | 1,2286 a | $MR_{T1} = \exp [-(0,0268.t)^{1,2286}]$ (Ec. 28) |
| T2 | 0,0437 b | 1,3993 b | $MR_{T2} = \exp [-(0,0437.t)^{1,3993}]$ (Ec. 29) |
| T3 | 0,0744 c | 1,5430 c | $MR_{T3} = \exp [-(0,0744.t)^{1,5430}]$ (Ec. 30) |

Medias con una letra diferente en la misma columna son significativamente diferentes ($p < 0,05$)

Finalmente, en la Figura 20 se muestra el ajuste de los datos experimentales sobre las curvas de secado teóricas del modelo de Page modificado y como la proximidad del ajuste justificó la elección de este modelo en cada una de las temperaturas que se trabajó.

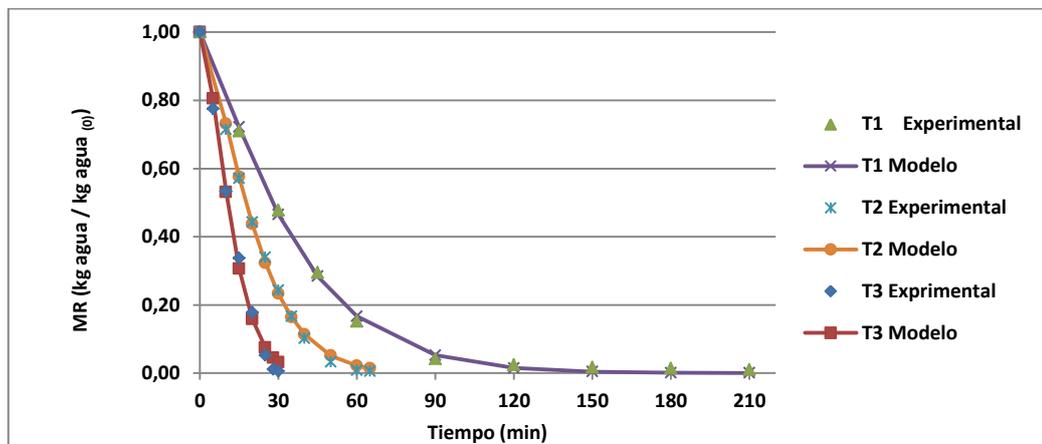


Figura 20. Curvas de secado experimental (línea de puntos) y teórica (línea continua) de rodajas de banana según el modelo de Page modificado a diferentes temperaturas de aire.

4.1.4. Difusividad efectiva y energía de activación.

Se aplicó la ecuación integrada de la segunda ley de Fick (Ec. 1), que considera tiempos largos de secado y geometría plana en una dimensión. Las leyes de difusión de Fick han sido frecuentemente adoptadas en la literatura para describir la difusión de la humedad dentro de los materiales secos, incluyendo bananas secas (8). De la pendiente de la línea recta resultante de graficar el logaritmo natural de la relación de humedad ($\ln MR$) en función del

tiempo (Figura 21), se obtuvo el coeficiente de difusión efectivo (D_f). La Tabla IX muestra los valores obtenidos para cada temperatura de aire.

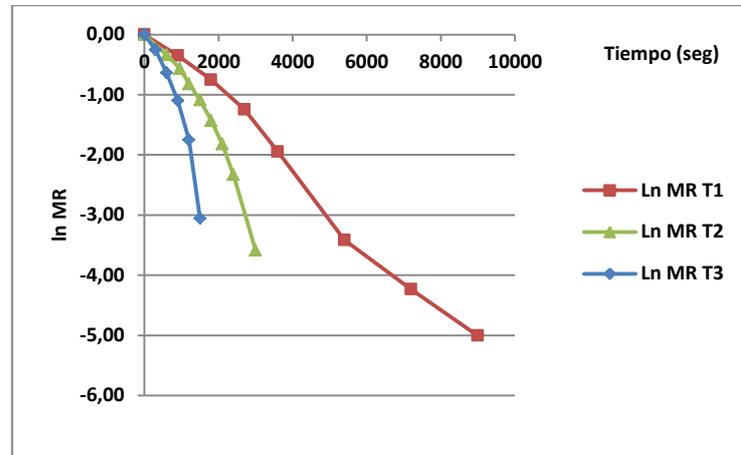


Figura 21. Logaritmo de las razones de humedad versus tiempo de secado para rodajas de banana deshidratadas convectivamente a 80,5 °C (T1), 96 °C (T2) y 130,5 °C (T3).

Tabla IX. Coeficientes de difusión efectivo obtenidos para las diferentes temperaturas de secado.

| Temperatura | D_f ($\times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) |
|-------------|---|
| T1 | $5,4713 \pm 0,0001^a$ |
| T2 | $8,6630 \pm 0,6448^b$ |
| T3 | $15,0462 \pm 0,6448^c$ |

Medias con una letra diferente en la misma columna son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

Los valores obtenidos experimentalmente estuvieron comprendidos en el rango de 5,47 a 15,05 $\times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, de acuerdo con los datos encontrados en la bibliografía para la mayoría de los alimentos, esto es de 10^{-9} a $10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, según Rizvi et al. (60). Se evidenció una clara dependencia del coeficiente de difusión efectivo con la temperatura de secado debido a que los valores de este coeficiente aumentaron significativamente cuando incrementó la temperatura. Esto demostró que existió una menor resistencia interna del producto al aumento de la temperatura durante el secado. Este comportamiento se puede explicar porque a mayores temperaturas hubo un menor encogimiento de la matriz, lo que generó mayor porosidad y consecuentemente una mayor área de transferencia de masa (sección 4.2.2.1). En la sección 4.4.1 se analizarán los resultados de las micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido (SEM) en donde se observó la microestructura de los snacks de banana. En otros trabajos también se encontró que la cinética de secado estuvo influenciada por la temperatura, entre ellos, el secado de papaya chilena descrito por Vega y Lemus (61), el de

pulpa de mango por Ocampo (62) y el secado del alga Gracilaria chilena descrito por Vega Gálvez et al. (63).

En los secadores convectivos el calor se transfiere al alimento mediante una corriente de aire caliente que además de transmitir el calor necesario para la evaporación del agua, es también el agente transportador del vapor de agua que se elimina del alimento (64). Al calentar el producto por convección, el calor penetra hacia el interior del alimento a través de la superficie principalmente por conducción, mientras que la humedad debe salir a través de ella, por lo que el gradiente de temperatura es contrario al gradiente de humedad. En consecuencia, únicamente se produce el secado o la reducción del contenido en agua cuando el interior ha alcanzado suficiente temperatura para que nuevamente emigre la humedad hacia la superficie y, finalmente, al exterior (65). Aunque la fuerza impulsora para el calentamiento es el gradiente de temperatura, para la transferencia de materia lo es, en este caso, el gradiente de concentración de agua existente entre el interior y la superficie seca.

La representación gráfica del $\ln(D_f)$ en función de $1/T$ (K) es una línea recta (Figura 22) de cuya pendiente se obtiene la energía de activación (E_a) y cuya ordenada al origen es el factor de Arrhenius (D_0). El valor obtenido de energía de activación fue de $23,6591 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ y representó la mínima energía requerida por el agua del alimento para ser eliminada durante el proceso de secado. El rango de $12,7$ a $110 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ comprende energías de activación en la que se encuentran la mayoría de los productos agroalimentarios, como por ejemplo zanahoria (66), zanahoria y papa (56), judías verdes (67) y espinacas (68). El factor de Arrhenius presentó un valor de $1,7923 \times 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$.

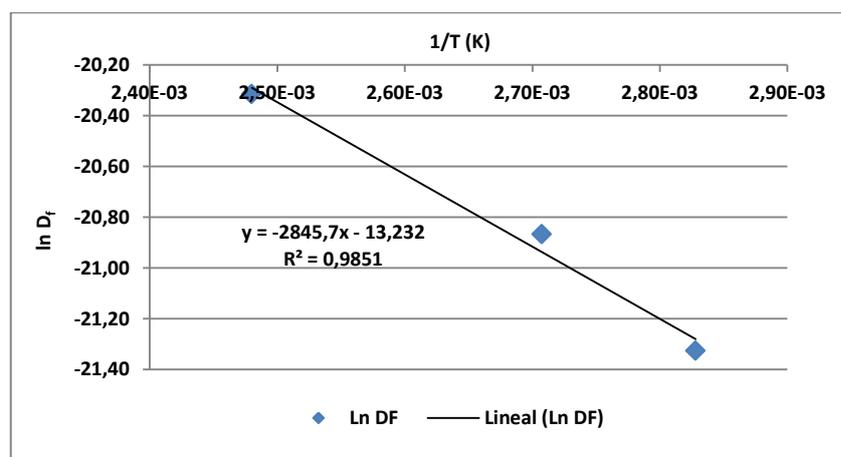


Figura 22. Análisis de regresión lineal para el $\ln D_f$ en función de la inversa de la temperatura de secado (K).

De acuerdo a los resultados, se observó que el secado de rodajas de banana estuvo influenciado por la temperatura en la cual se realizó cada proceso. La cinética del modelo de

Page modificado presentó mejor calidad de ajuste a los datos experimentales y mostró coeficientes de difusividad efectivo comprendidos entre $5,47$ y $15,05 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ con una energía de activación de $23,66 \text{ KJ} \cdot \text{mol}^{-1}$.

4.2. Aplicación del análisis de imágenes durante secado convectivo de rodajas de Musa

Cavendish.

4.2.1. Efecto de la temperatura de secado sobre la apariencia visual de las rodajas.

En la Figura 23 se muestra una galería de imágenes en donde se observan los cambios ocurridos sobre la superficie de las rodajas de banana durante el secado. El cambio más evidente fue el desarrollo de tonalidades crecientes de marrón, atribuido al oscurecimiento no enzimático durante el secado convectivo. En las imágenes también se observó de forma cualitativa que disminuyó el área de rodaja, cambió la forma original del producto y se modificó el borde, todos efectos causados por la eliminación de agua y la contracción de los tejidos de la fruta. La extracción de información de las fotografías tomadas durante el secado, y su posterior análisis, permitió valorar de forma cuantitativa los parámetros morfométricos y fractales. Los resultados se muestran en las siguientes secciones.

4.2.2. Parámetros morfométricos.

4.2.2.1 Área (A).

El área inicial promedio de las rodajas de banana presentó valores entre 6,85 y 7,42 cm². El proceso de secado provocó el encogimiento de las rodajas frescas – fenómeno esperado en este tipo de procesos – que generó snacks con una menor área superficial. Durante el secado convectivo, el agua que se elimina, produce un desequilibrio entre la presión interna del material y la presión externa, generando tensiones de contracción que dan lugar a la contracción o al colapso del material, cambios en la forma y ocasionalmente el agrietamiento del producto (12). En cuanto al espesor de las rodajas se observó que disminuyó durante el secado y a pesar de que no se cuantificó esta disminución, existen datos variables aportados por diversos autores. Prachayawarakorn et al. (69) describieron una menor contracción del espesor de las rodajas cuando aumentó la temperatura de secado en muestras de banana sin tratamientos previos a la deshidratación. Por otra parte, Pan et al. (14) informaron que la previa inmersión de las rodajas en solución de ácido ascórbico/cítrico generó una menor contracción del espesor en relación a las muestras no tratadas. Los resultados obtenidos por Demirel y Turhan (19) no mostraron diferencias entre las muestras tratadas y sin tratar.

| Temperatura | | | | | |
|----------------|---|---------------|---|---------------|---|
| T1 | | T2 | | T3 | |
| t = 0 min |  | t = 0 min |  | t = 0 min |  |
| t = 15 min |  | t = 10 min |  | t = 5 min |  |
| t = 30 min |  | t = 20 min |  | t = 10 min |  |
| t = 60 min |  | t = 25 min |  | t = 15 min |  |
| t = 90 min |  | t = 30 min |  | t = 20 min |  |
| t = 120 min |  | t = 40 min |  | t = 25 min |  |
| t = 160 min |  | t = 55 min |  | t = 30 min |  |
| t = 210 min |  | t = 65 min |  | | |

Figura 23. Galería de imágenes de rodajas de banana obtenidas durante el secado convectivo por aire caliente en cada temperatura seleccionada.

Santacruz-Vazquez et al. (44), estudiaron los efectos del secado convectivo en el encogimiento de placas de manzana y encontraron que éstas presentaron un comportamiento irregular en la contracción y deformación durante el secado, el cual se debió a los procesos de transferencia de masa que tuvieron lugar en las diferentes direcciones de la placa, provocando tensiones de compresión y un consecuente comportamiento no lineal en la reducción del área normalizada.

Durante el secado de las rodajas de banana, la reducción del área normalizada fue significativa a cada temperatura ($p < 0,05$). En la Figura 24 se observa una mayor reducción de área en T1 (13 %) debido a que la deshidratación fue más lenta y provocó un efecto de contracción más acentuado. Por el contrario, cuando la deshidratación fue rápida (T2 y T3) la estructura se rigidizó antes y mostró menor encogimiento y por consecuencia mayor área de rodaja. Al finalizar el secado, el área de los snacks presentó valores comprendidos entre 6,16 y 6,47 cm².

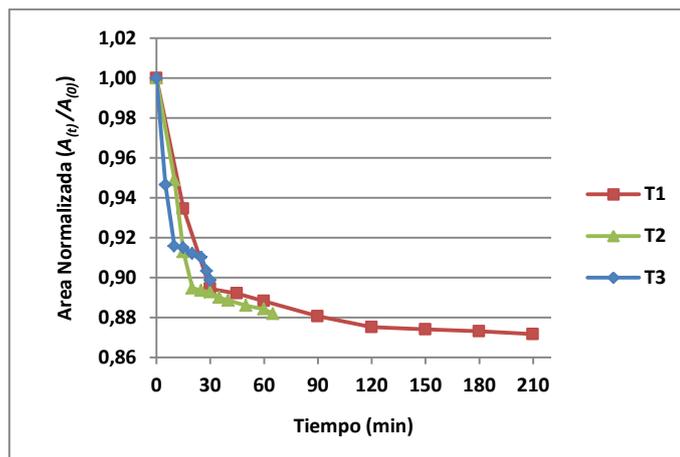


Figura 24. Efecto del secado sobre el área normalizada de rodaja ($A(t)/A(0)$) en las diferentes condiciones de temperatura de aire.

4.2.2.2. Perímetro (P).

El análisis del perímetro normalizado se muestra en la Figura 25. Inicialmente las rodajas presentaron bordes bien definidos con un contorno promedio entre 10,05 y 10,48 cm. En los primeros minutos del procesamiento térmico el perímetro disminuyó, lo cual acompañó a la reducción de área provocada por efecto de la temperatura, pero manteniendo bordes lisos y bien delimitados. Luego, el avance de la deshidratación provocó deformaciones sobre el borde de la fruta y el perímetro aumentó de forma significativa para cada temperatura ($p < 0,05$). Al finalizar el secado, los snacks presentaron valores de perímetro comprendidos entre 11,35 y 12,29 cm.

En la Figura 25 también se puede observar que la velocidad de los cambios del perímetro estuvo directamente relacionada con la temperatura del aire. Una mayor temperatura del aire de secado generó mayor velocidad de cambios del perímetro aunque los valores finales fueron similares.

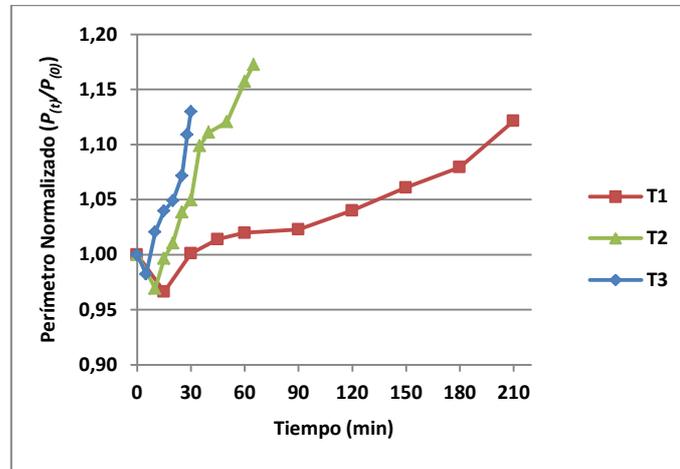


Figura 25. Efecto del secado sobre el perímetro normalizado de rodaja (P_t/P_0) en las diferentes condiciones de temperatura de aire.

4.2.2.3. Circularidad (C).

La Figura 26 muestra la variación de la circularidad durante el secado. Los resultados del análisis de imágenes indicaron que este parámetro disminuyó en función del tiempo. Las rodajas frescas presentaron valores altos de circularidad comprendidos entre 0,84 y 0,86. Durante el procesamiento térmico la forma de los snacks cambió y la circularidad disminuyó de forma significativa ($p < 0,05$), originando productos de forma más alargada. Estos cambios resultaron de deformaciones en la estructura de la fruta ocurridas durante el secado. Aquí debe aclararse, que si bien la disminución de la circularidad estuvo comprendida entre un 30 a 33 % respecto de la inicial, la velocidad a la cual cambió este parámetro estuvo influenciada por la temperatura ya que la pendiente (Figura 26) fue mayor cuanto mayor fue la temperatura de deshidratación. De esta forma, en el procesamiento térmico más drástico (T3), las muestras perdieron circularidad más rápidamente que en las otras temperaturas de secado. Los valores finales estuvieron comprendidos entre 0,56 y 0,61.

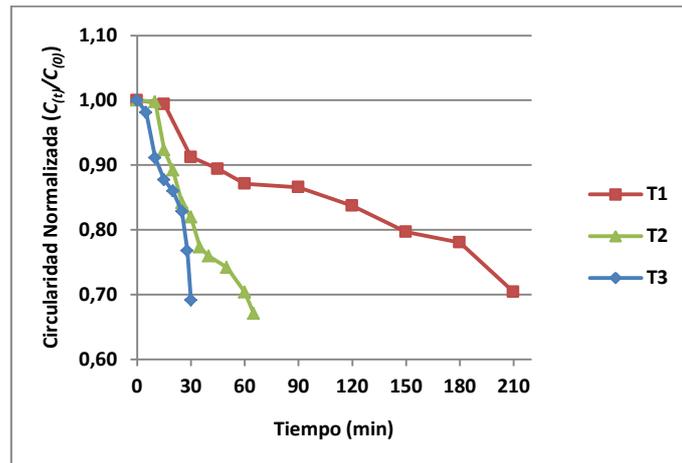


Figura 26. Efecto del secado sobre la circularidad normalizada de rodaja ($C_{(t)}/C_{(0)}$) en las diferentes condiciones de temperatura de aire.

4.2.2.4. Diámetro de Feret (dF).

En la Figura 27 se observa la variación del diámetro de Feret durante el proceso de secado. Las rodajas frescas presentaron valores de diámetro de Feret comprendidos entre 3,14 y 3,26 cm. La temperatura disminuyó la humedad del producto, modificó su estructura y provocó un progresivo encogimiento. Esto redujo de forma significativa el diámetro de Feret durante el secado ($p < 0,05$). También se observó que los snacks de T1 mostraron una mayor reducción de diámetro, lo cual coincidió con la mayor reducción de área a esta temperatura. El diámetro de Feret del producto final estuvo comprendido entre 3,00 y 3,12 cm.

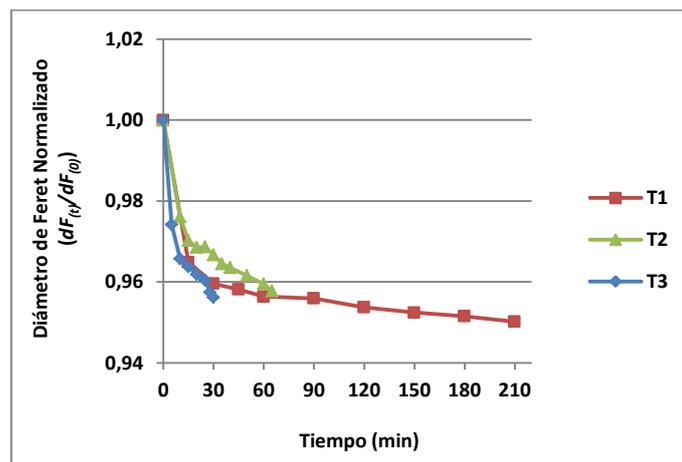


Figura 27. Efecto del secado sobre el diámetro de Feret normalizado de rodaja ($dF_{(t)}/dF_{(0)}$) en las diferentes condiciones de temperatura de aire.

Los parámetros morfométricos de área y diámetro de Feret mostraron que hubo una contracción de las rodajas durante el secado. La disminución de la circularidad indicó que las

rodajas cambiaron su morfología, de una forma circular inicial a una forma más alargada. El perímetro aumentó a medida que el producto se deshidrató mostrando una mayor irregularidad de contorno. En la Tabla X se analizó la correlación entre los parámetros morfométricos y el cambio de humedad de las rodajas. Los resultados indicaron que la disminución de la humedad durante el secado mostró correlaciones positivas y altamente significativas con el área.

Tabla X. Correlación de Pearson entre humedad y parámetros morfométricos.

| | | Humedad (Kg Agua_(t)/ Kg agua₍₀₎) | Área | Perímetro | Circularidad |
|-----------|--------------|---|-------------|------------------|---------------------|
| T1 | Humedad | | | | |
| | Área | 0,95** | | | |
| | Perímetro | -0,72* | -0,59 | | |
| | Circularidad | 0,87** | 0,80* | -0,95** | |
| | D. de Feret | 0,89** | 0,98** | -0,52 | 0,74* |
| T2 | Humedad | | | | |
| | Área | 0,92** | | | |
| | Perímetro | -0,88** | -0,66* | | |
| | Circularidad | 0,96** | 0,81** | -0,97** | |
| | D. de Feret | 0,92** | 0,97** | -0,69* | 0,82** |
| T3 | Humedad | | | | |
| | Área | 0,91** | | | |
| | Perímetro | -0,89** | -0,71 | | |
| | Circularidad | 0,92** | 0,79* | -0,99** | |
| | D. de Feret | 0,90** | 1,00** | -0,71 | 0,79* |

(Sin referencia $p > 0,05$; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$)

4.2.3. Análisis Fractal.

4.2.3.1. Matriz de Co-ocurrencia en Escala de Grises (GLCM).

A partir de las imágenes en superficie de las rodajas de banana, se estimaron los parámetros de textura con el algoritmo de *Matriz de Co-ocurrencia* en Escala de Grises (GLCM). Se calcularon los parámetros de energía (ASM), homogeneidad (IDM), contraste (CON) y entropía (ENT) que permitieron observar los cambios ocurridos en la superficie de las rodajas durante el proceso de secado.

4.2.3.1.1. Energía (ASM) y Homogeneidad (IDM).

Los resultados mostraron que los parámetros de textura energía y homogeneidad presentaron tendencias similares debido a que disminuyeron en función del tiempo y la

temperatura de secado. Los mayores valores de energía encontrados al inicio del tratamiento (Figura 28) se debieron a que en las imágenes en escala de grises (8 bits), las rodajas frescas de banana ($t=0$ min), presentaron una alta similitud en sus parejas de píxeles, cuya intensidad del nivel de gris fue semejante y que además estaban uniformemente distribuidas por toda la superficie. La alta frecuencia de aparición de estas parejas de píxeles denotó una superficie de característica lisa, uniforme y homogénea, con valores observados de energía entre $2,60 \times 10^{-3}$ y $4,10 \times 10^{-3}$. Durante la deshidratación se modificó la textura superficial de la rodaja, ocasionada por la evaporación del agua, y la uniformidad textural comenzó a decaer de forma significativa ($p < 0,05$). La probabilidad de encontrar estas parejas de píxeles con escasa diferencia en sus niveles de grises fue cada vez menor, reflejando la influencia de las parejas de píxeles vecinos dentro de la imagen analizada. Hacia el final del secado, existían parejas de píxeles de variada intensidad en niveles de grises y con amplia distribución espacial, que provocó la disminución de la energía debido a una superficie menos uniforme reflejada en imágenes más complejas. Los valores finales de energía estuvieron comprendidos entre $5,10 \times 10^{-4}$ y $6,97 \times 10^{-4}$.

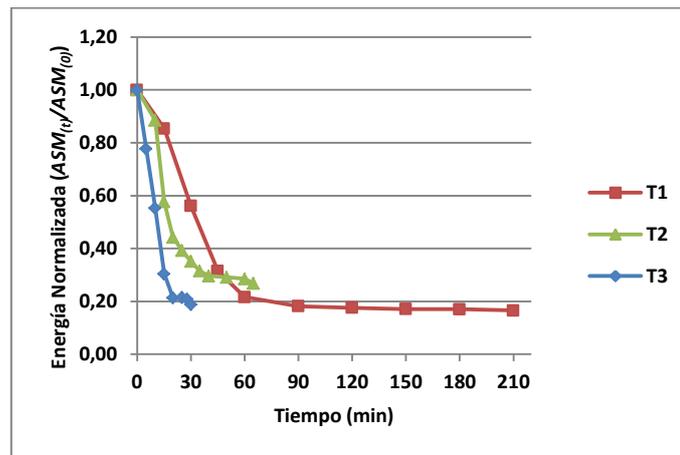


Figura 28. Efecto del secado sobre el parámetro textural de energía normalizada ($ASM_{(t)}/ASM_{(0)}$) para rodajas de banana tratadas en diferentes condiciones de temperatura.

En la Figura 29 se muestran los histogramas de distribución de intensidad de píxeles de rodajas de banana analizadas a cada temperatura. Los resultados señalaron que la rodaja fresca ($t=0$ min) presentó una distribución de píxeles orientada hacia tonalidades de grises

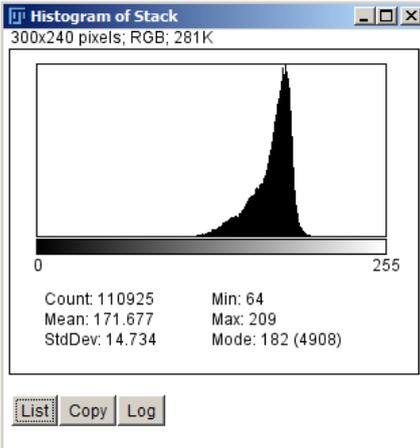
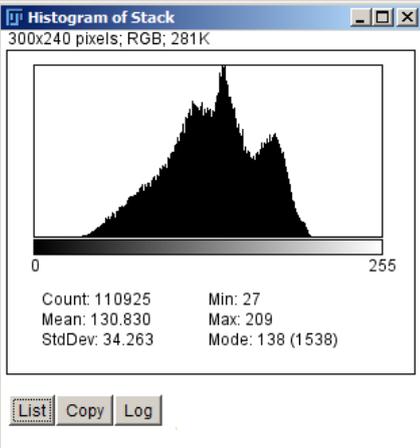
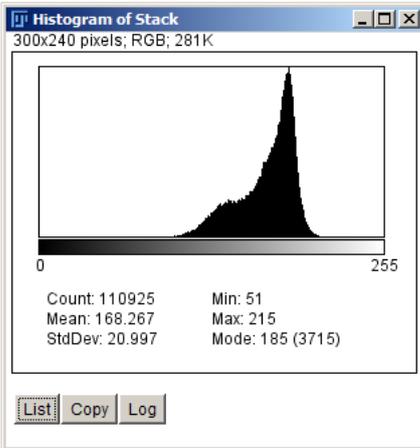
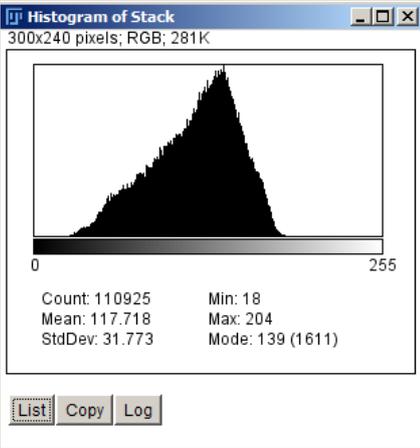
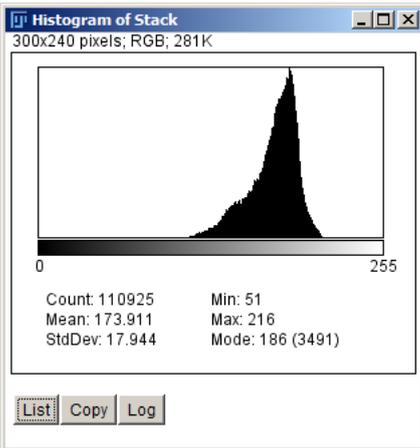
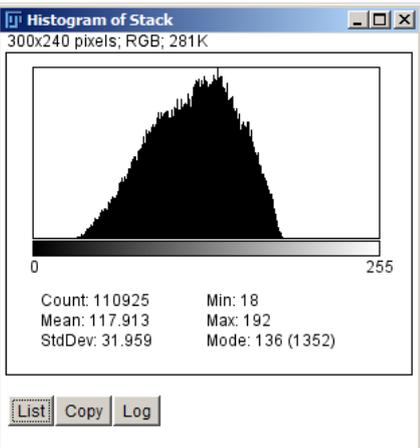
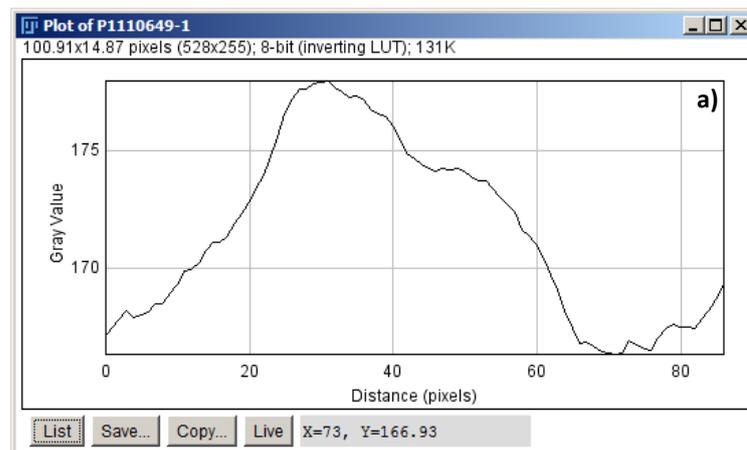
| Temp. | Tiempo inicial (0 min) | Tiempo final de secado |
|-------|--|---|
| T1 |  <p>300x240 pixels; RGB; 281K</p> <p>Count: 110925 Min: 64 Mean: 171.677 Max: 209 StdDev: 14.734 Mode: 182 (4908)</p> <p>List Copy Log</p> |  <p>300x240 pixels; RGB; 281K</p> <p>Count: 110925 Min: 27 Mean: 130.830 Max: 209 StdDev: 34.263 Mode: 138 (1538)</p> <p>List Copy Log</p> |
| T2 |  <p>300x240 pixels; RGB; 281K</p> <p>Count: 110925 Min: 51 Mean: 168.267 Max: 215 StdDev: 20.997 Mode: 185 (3715)</p> <p>List Copy Log</p> |  <p>300x240 pixels; RGB; 281K</p> <p>Count: 110925 Min: 18 Mean: 117.718 Max: 204 StdDev: 31.773 Mode: 139 (1611)</p> <p>List Copy Log</p> |
| T3 |  <p>300x240 pixels; RGB; 281K</p> <p>Count: 110925 Min: 51 Mean: 173.911 Max: 216 StdDev: 17.944 Mode: 186 (3491)</p> <p>List Copy Log</p> |  <p>300x240 pixels; RGB; 281K</p> <p>Count: 110925 Min: 18 Mean: 117.913 Max: 192 StdDev: 31.959 Mode: 136 (1352)</p> <p>List Copy Log</p> |

Figura 29. Histograma de niveles de gris de rodajas de banana analizadas al inicio y final de cada tratamiento térmico.

claros, cercanas a la parte más luminosa de la escala (255). Los gráficos iniciales presentaron picos bien definidos, cuya intensidad de grises tuvo una moda comprendida entre 182 y 186, y que además concentraron un elevado número de píxeles. La información de este análisis dejó en evidencia que hubo una alta paridad entre los píxeles de la imagen haciendo una clara referencia a la uniformidad textural de la fruta fresca. Por el contrario, cuando finalizó el secado, y en cuanto a la moda, los resultados mostraron la disminución de este parámetro, con valores similares entre las temperaturas, comprendidos entre 136 y 139 pero que agruparon una cantidad considerablemente menor de píxeles. Este comportamiento influyó sobre la forma de los gráficos ya que adquirieron una base más ancha, y se obtuvo un mayor rango de niveles de grises, además de comenzar en valores más cercanos a cero (negro). Esta disparidad en la distribución de los píxeles remarcó la existencia de una superficie de características compleja.

La Figura 30 muestra la intensidad en niveles de grises para la misma región de interés seleccionada en T1 cuando inició y finalizó el tratamiento térmico. En el eje de abscisas está representada la distancia de la región analizada (87 píxeles) mientras que en el eje de las ordenadas, se muestra la intensidad de los píxeles promediados para la imagen. La disminución en la intensidad de los niveles de grises fue evidente cuando finalizó la deshidratación.



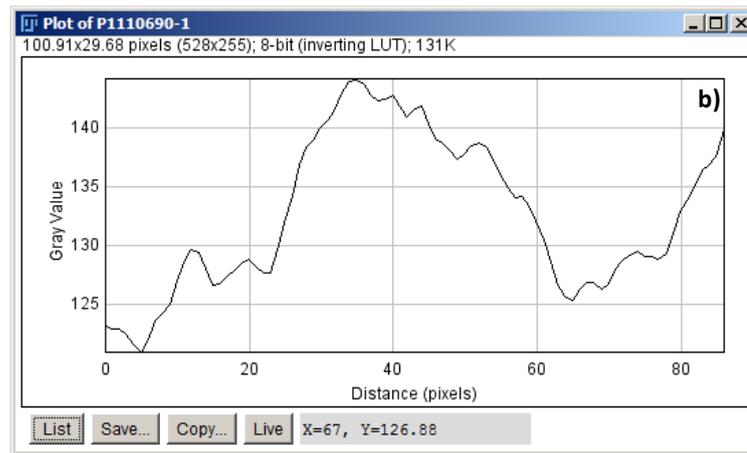


Figura 30. Gráfico de intensidades de niveles de grises para una región de interés seleccionada en T1. a) Rodaja fresca ($t=0$ min). b) Snack final ($t=210$ min).

Por otra parte, la homogeneidad presentó – al igual que la energía – una disminución durante el proceso de secado (Figura 31). Los resultados mostraron que las rodajas frescas de banana presentaron una textura superficial semejante, con altos valores iniciales de homogeneidad (entre 0,385 y 0,460), atribuidos a la uniformidad superficial del tejido fresco de la fruta. Durante el desarrollo del secado, la superficie de las rodajas se vio afectada por acción de la temperatura y la uniformidad disminuyó de forma significativa ($p<0,05$). Este cambio asociado a la transferencia de materia – por la evaporación del agua – produjo la modificación de la textura superficial. En lo que respecta al arreglo espacial, los altos valores de homogeneidad de la banana fresca se atribuyeron a la alta similitud de intensidad en los niveles de grises de cada pareja. Durante el secado, estas parejas de píxeles presentaron una diferencia de intensidad, que fue localmente importante y que por consiguiente, provocaron la disminución de este parámetro. Simultáneamente, la caída de la energía mostró que la superficie de los snacks fue más compleja ya que la distribución de parejas de píxeles de igual intensidad fue mayormente irregular. Las condiciones de secado tuvieron influencia sobre el cambio de homogeneidad ya que una mayor temperatura de aire (T3) provocó que la homogeneidad disminuyera más rápidamente. En el secado de discos de manzana realizado por Fernández et al. (70) se encontró un resultado similar y el mismo fue atribuido a la pérdida de homogeneidad textural observada en las muestras. Los valores de homogeneidad de los productos secos estuvieron comprendidos entre 0,232 y 0,261.

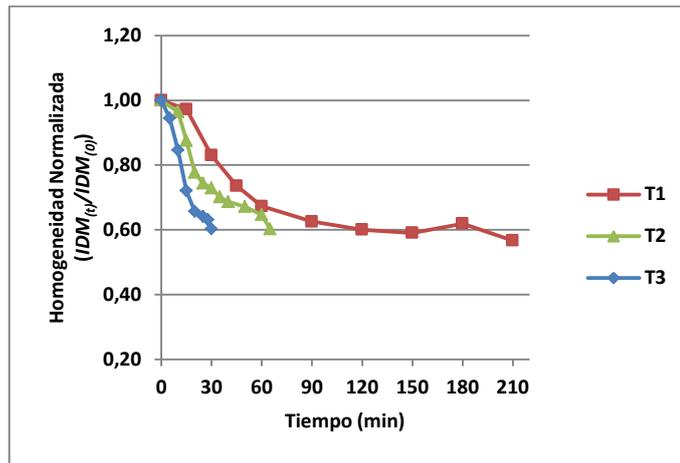


Figura 31. Efecto del secado sobre el parámetro textural de homogeneidad normalizada ($IDM_{(t)}/IDM_{(0)}$) para rodajas de banana tratadas en diferentes condiciones de temperatura.

4.2.3.1.2. Entropía (*ENT*) y Contraste (*CON*).

Los parámetros de entropía y contraste aumentaron a medida que avanzó el secado de las muestras. La entropía es un parámetro opuesto al de energía y como tal manifestó un comportamiento contrario. Los valores iniciales de las rebanadas frescas de banana estuvieron comprendidos entre 6,220 y 6,687. Su incremento fue significativo durante el secado ($p < 0,05$) y se manifestó en imágenes de mayor complejidad en relación a las imágenes iniciales (Figura 32). A su vez, y como sucedió con otros parámetros, una mayor temperatura de secado aceleró el cambio de entropía. En el contexto del procesamiento de imágenes, este aumento reflejó que las parejas de píxeles presentaron un desorden en la distribución de los niveles de grises que aportó información de lo ocurrido en el secado y mostró, como se pudo observar visualmente, que las rodajas adquirieron una superficie menos uniforme y de textura compleja. Cuando finalizó el secado, la entropía estuvo comprendida entre 7,852 y 7,929. Los altos valores entrópicos se evidencian por la elevada propagación de píxeles de variada intensidad y en forma uniforme sobre la imagen espectral (71), demostrando un mayor desorden y deformación superficial consecuencia del proceso de deshidratación. Los histogramas analizados anteriormente en la Figura 29 mostraron una tendencia similar.

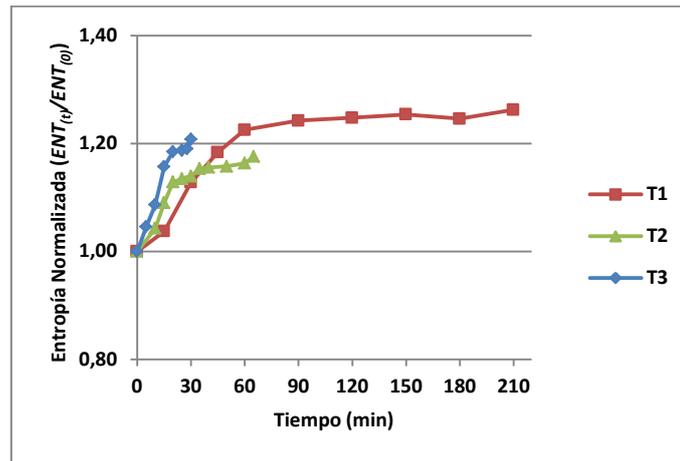


Figura 32. Efecto del secado sobre el parámetro textural de entropía normalizada ($ENT_{(t)}/ENT_{(0)}$) para rodajas de banana tratadas en diferentes condiciones de temperatura.

La variación del contraste en función del tiempo se muestra en la Figura 33. Con valores iniciales comprendidos entre 81,11 y 103,96, el contraste fue incrementándose de forma significativa ($p < 0,05$) durante el proceso de secado y mostró un comportamiento bien definido a cada temperatura. La pendiente de la grafica manifiesta la rapidez con la que ocurrieron los cambios. Al igual que la homogeneidad, el contraste es una medida de la variación local del nivel de gris de pixeles vecinos, por lo que su aumento se atribuyó a la diferente intensidad entre los pixeles de la imagen. Este cambio está asociado al cambio de color en la superficie de las rodajas durante el secado, con pixeles que presentaron intensidad de grises hacia valores más cercanos a cero (aumento del negro), lo cual significó un mayor oscurecimiento provocado por el pardeamiento de las muestras. Los valores finales de contraste estuvieron comprendidos entre 229,27 y 272,47.

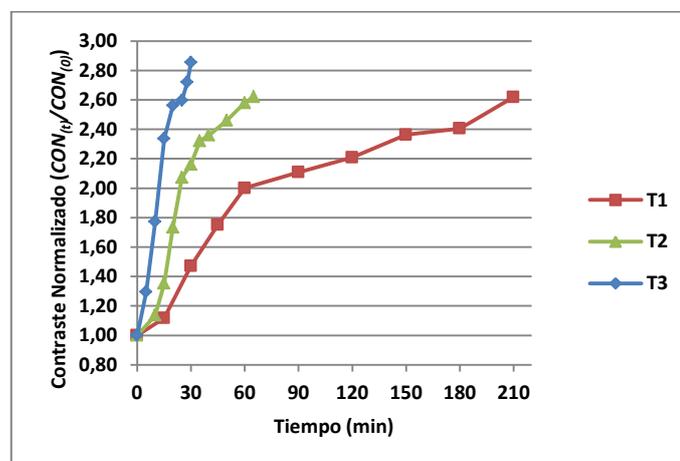


Figura 33. Efecto del secado sobre el parámetro textural de contraste normalizado ($CON_{(t)}/CON_{(0)}$) para rodajas de banana tratadas en diferentes condiciones de temperatura.

En la Figura 34 se muestran ejemplos de regiones analizadas en escala de grises para tiempo inicial y final de cada tratamiento térmico. Como se observa, las rodajas sufrieron cambios a nivel superficial y adquirieron tonalidades más intensas durante el secado debido a la acción térmica. El desarrollo de los parámetros fractales estuvo influenciado por la temperatura del aire, ya que similares resultados en distintas temperaturas, se consiguieron en tiempos de secado considerablemente menores. Esto reflejó la importancia que tiene el control de la temperatura en los procesamientos térmicos y el efecto que se consigue sobre los alimentos como consecuencia de modificar en pocos grados la temperatura a la cual se trabaja. En la Tabla XI se muestran valores de los distintos parámetros fractales al concluir el secado.

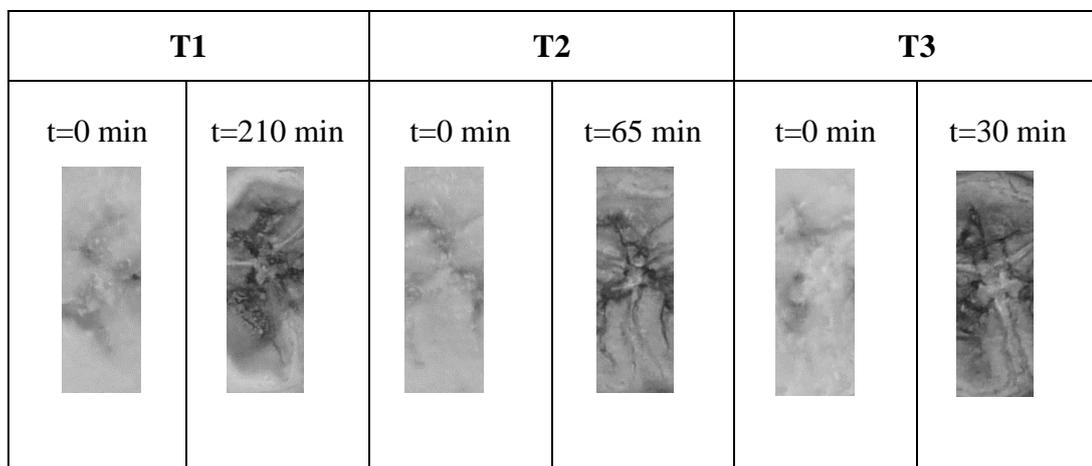


Figura 34. Imágenes de regiones de interés de rodajas de banana analizadas por *GLCM* en los tiempos inicial y final de cada temperatura.

Tabla XI. Parámetros fractales correspondientes al tiempo máximo de secado de cada tratamiento térmico.

| Temp./Tiempo | <i>ASM</i> | <i>IDM</i> | <i>CON</i> | <i>ENT</i> |
|-------------------|------------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| T1/210 min | $6,78 \pm 0,15 (x10^{-4})^a$ | $0,261 \pm 0,010^a$ | $229,27 \pm 22,88^a$ | $7,852 \pm 0,027^a$ |
| T2/65 min | $6,97 \pm 2,20 (x10^{-4})^a$ | $0,232 \pm 0,018^a$ | $272,47 \pm 51,64^a$ | $7,862 \pm 0,199^a$ |
| T3/30 min | $5,10 \pm 0,50 (x10^{-4})^a$ | $0,237 \pm 0,001^a$ | $231,62 \pm 43,65^a$ | $7,929 \pm 0,063^a$ |

Medias con una letra diferente en la misma columna son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

En la Tabla XII se muestra la correlación de Pearson entre el contenido de humedad y los parámetros fractales de la *Matriz de Co-ocurrencia* en escala de grises. Los resultados indicaron que los coeficientes tuvieron una alta correlación y demostraron que cambios en la

humedad del producto están fuertemente asociados a cambios en los parámetros fractales. La disminución de la humedad durante el secado modificó el ordenamiento y la intensidad de los píxeles en las imágenes analizadas por *GLCM*, lo que hizo posible monitorear la deshidratación por análisis de imágenes, hasta obtener valores en donde el producto llegó a su humedad de equilibrio y en consecuencia al tiempo final de secado.

Tabla XII. Correlación de Pearson entre humedad y parámetros fractales *GLCM*.

| | | Humedad (Kg agua_(t)/ Kg agua₍₀₎) | <i>ASM</i> | <i>CON</i> | <i>IDM</i> |
|-----------|------------|---|------------|------------|------------|
| T1 | Humedad | | | | |
| | <i>ASM</i> | 0,99** | | | |
| | <i>CON</i> | -0,96** | -0,94** | | |
| | <i>IDM</i> | 0,98** | 0,98** | -0,98** | |
| | <i>ENT</i> | -0,99** | -1,00** | 0,96** | -0,99** |
| T2 | Humedad | | | | |
| | <i>ASM</i> | 0,96** | | | |
| | <i>CON</i> | -0,98** | -0,94** | | |
| | <i>IDM</i> | 0,98** | 0,97** | -0,99** | |
| | <i>ENT</i> | -0,97** | -0,99** | 0,95** | -0,98** |
| T3 | Humedad | | | | |
| | <i>ASM</i> | 0,98** | | | |
| | <i>CON</i> | -0,99** | -0,99** | | |
| | <i>IDM</i> | 0,99** | 0,99** | -1,00** | |
| | <i>ENT</i> | -0,99** | -0,99** | 1,00** | -1,00** |

(Sin referencia $p > 0,05$; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$)

4.2.3.2. Cambios en la dimensión fractal de superficie (DF_{sup}).

La Figura 35 muestra como cambió la DF_{sup} en cada una de las temperaturas. El análisis de textura fractal detectó cambios en la intensidad de los píxeles, indicando que la superficie de la banana resultó más rugosa e irregular a medida que disminuyó su contenido de humedad ($p < 0,05$). Al inicio del secado, la DF_{sup} estuvo comprendida entre 2,20 y 2,25, asociado a una menor complejidad topográfica expresada por la menor diferencia en los niveles de grises de los píxeles, y por lo tanto, atribuido a una superficie de característica lisa y homogénea. La transferencia de calor durante el secado provocó la disminución de la humedad en el producto y sugirió cambios a nivel superficial. Estas modificaciones provocaron un aumento de la complejidad de la imagen, fenómeno marcado por un comportamiento no uniforme. Los valores finales estuvieron comprendidos entre 2,32 y 2,37. La DF_{sup} y la entropía tuvieron un comportamiento opuesto a la energía y la homogeneidad.

La relación entre ambos señaló que el efecto de la temperatura provocó un cambio en la complejidad superficial del producto que se demostró por el análisis de textura de imágenes.

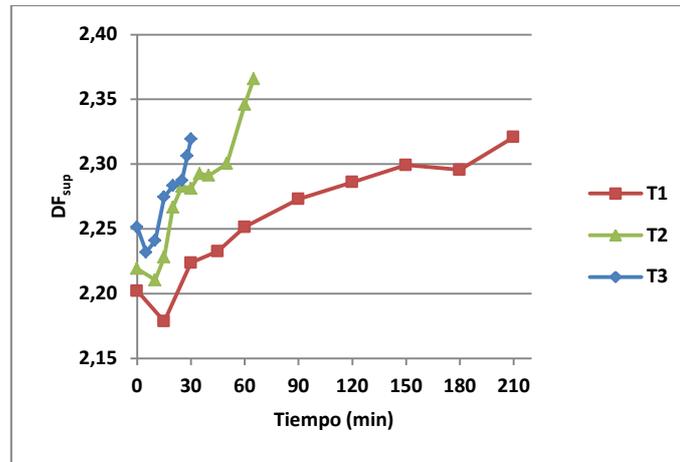


Figura 35. Cambios en la dimensión fractal de superficie (DF_{sup}) en función del tiempo de secado para rodajas de banana tratadas en diferentes condiciones de temperatura.

En la Figura 36 se muestra una galería de imágenes realizada a partir de la topografía de la superficie de los snacks de banana. Para todas las imágenes se utilizó la misma escala de altura y ninguna operación de procesamiento ya que alteraría la información original de la fotografía y podría generar errores en los valores de rugosidad.

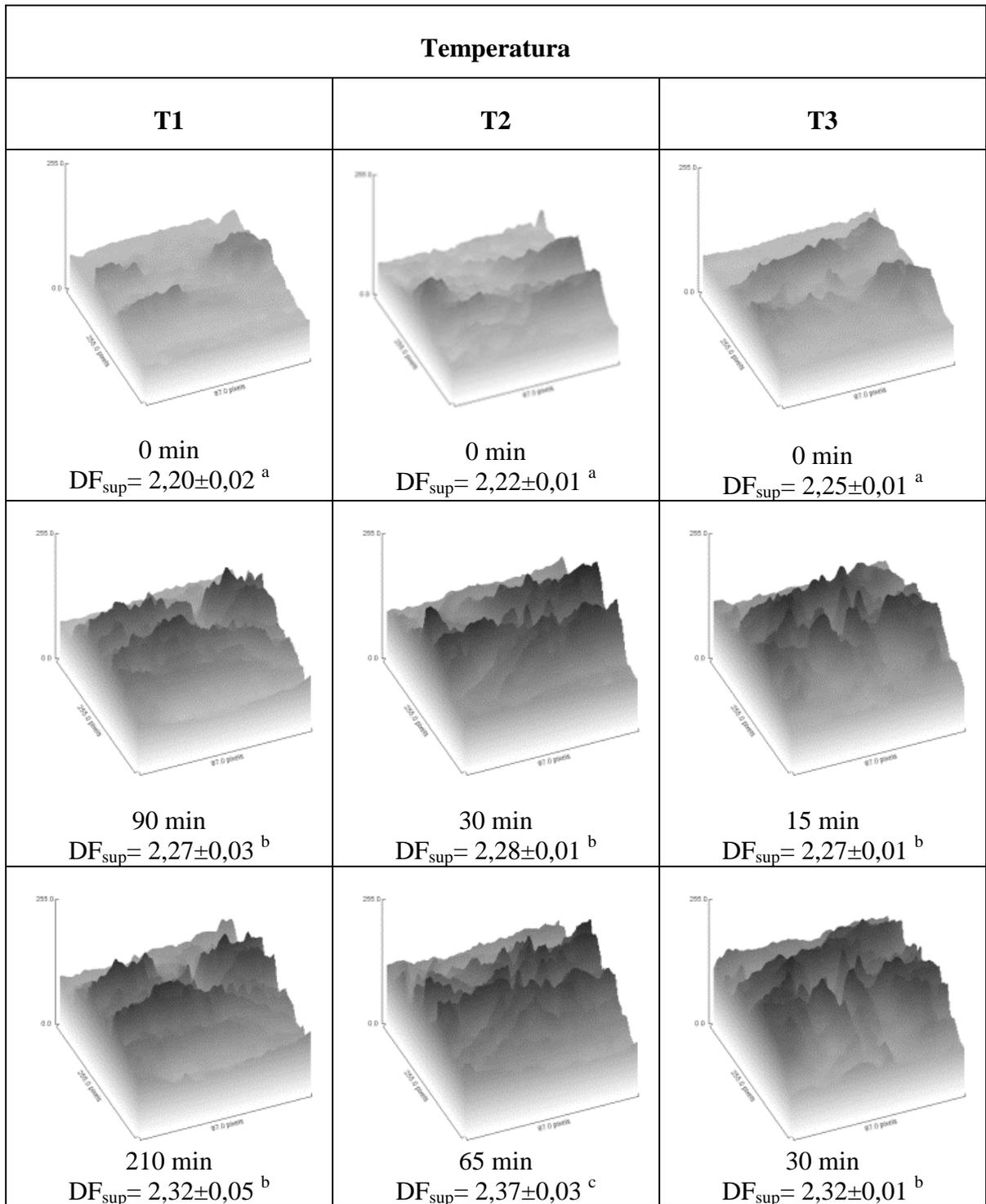


Figura 36. Topografía superficial 3D (escala de grises) de rodajas de banana en tiempos inicial, intermedio y final de cada tratamiento térmico. Medias con una letra diferente en la misma columna son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

4.2.3.3. Cambios en la dimensión fractal de contorno (DF_{cont}).

En la Figura 37 se muestra el efecto de la temperatura sobre la dimensión fractal de contorno (DF_{cont}). La rodaja fresca de banana se caracterizó por presentar un contorno liso y sin alteraciones, con valores más cercanos a la unidad (forma circular). La variación de este parámetro dependió de cada tratamiento térmico. Las muestras sometidas a condiciones de menor temperatura (T1) no mostraron cambios significativos en su contorno ($p>0,05$), mientras que, las rodajas de banana sometidas a condiciones de temperatura más altas (T2 y T3) presentaron bordes irregulares y sinuosos a lo largo del secado ($p<0,05$).

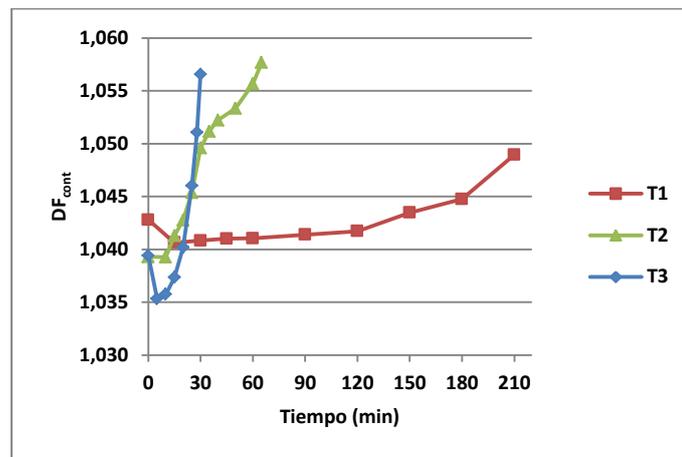


Figura 37. Cambios en la dimensión fractal de contorno (DF_{cont}) en función del tiempo de secado para rodajas de banana tratadas en diferentes condiciones de temperatura.

En la Figura 38 se muestra cómo evolucionó el contorno de las rodajas de banana obtenidas en el tratamiento térmico más drástico (T3). En los primeros 20 minutos de secado, la tendencia de los resultados mostró una disminución de los valores de DF_{cont} , aunque no se observaron diferencias significativas ($p>0,05$) durante este lapso de tiempo. Posteriormente, el avance del secado causó deformaciones sobre el borde de la fruta y la DF_{cont} aumentó de forma significativa hasta finalizar el secado. Este comportamiento observado es opuesto al que generalmente ocurre durante el secado a altas temperaturas, en donde el producto se torna más rígido y el volumen se fija antes de que se complete la deshidratación. Santacruz-Vázquez et al. (72) describieron menores valores de DF_{cont} para condiciones de secado más rápidas (mayor temperatura).

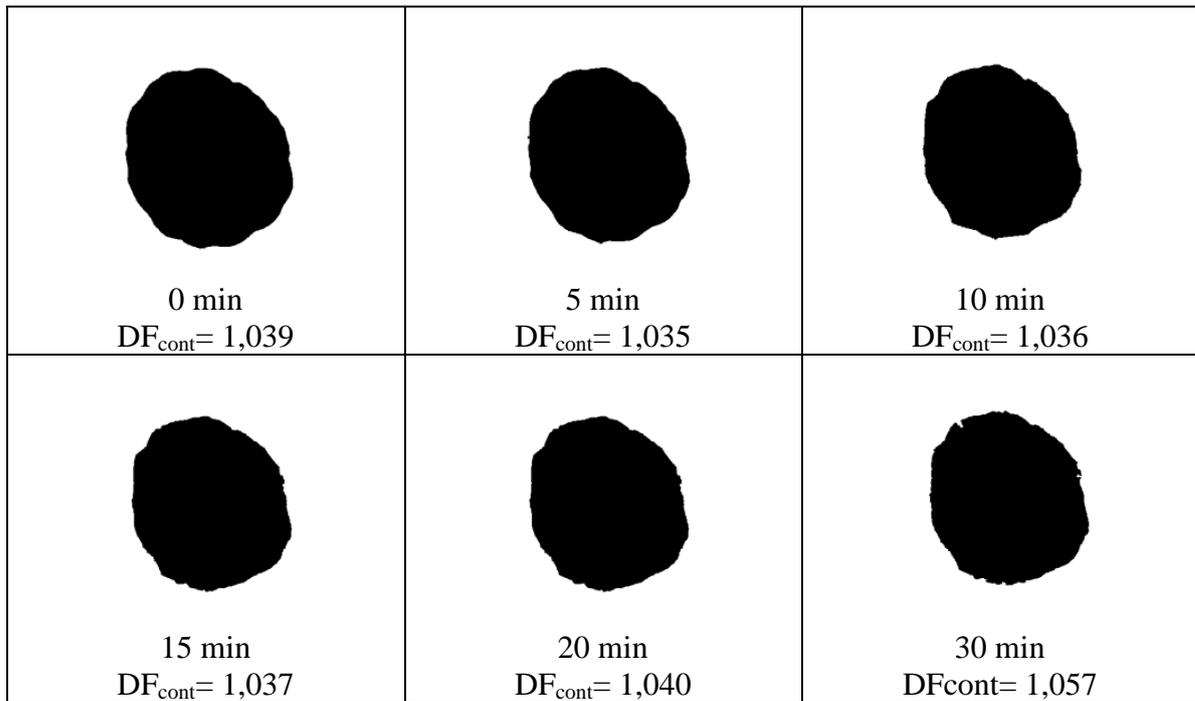


Figura 38. Galería de imágenes de muestras de banana durante el secado convectivo por aire caliente a $130,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $0,65\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y sus valores de DF_{cont} correspondientes para cada imagen.

En la Tabla XIII se muestra la correlación de Pearson entre el contenido de humedad y los parámetros de rugosidad de superficie y contorno de las rodajas de banana. Los resultados mostraron que la dimensión fractal de superficie fue el parámetro que mejor ajustó a los cambios de humedad en los distintos tratamientos térmicos. Como se vio anteriormente, mayores valores de DF_{sup} estuvieron asociados a una mayor complejidad o irregularidad superficial, mostrando que a medida que el producto disminuyó su contenido de humedad, la DF_{sup} aumentó, y por lo tanto, la rodaja adquirió una mayor rugosidad.

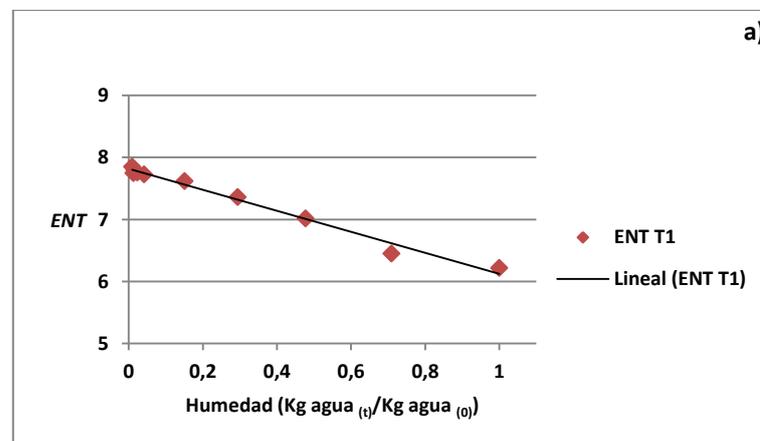
Tabla XIII. Correlación de Pearson entre humedad y parámetros fractales de rugosidad de superficie y contorno.

| | | Humedad (Kg agua _(t) / Kg agua ₍₀₎) | DF _{sup} |
|-----------|--------------------|--|-------------------|
| T1 | Humedad | | |
| | DF _{sup} | -0,89** | |
| | DF _{cont} | -0,36 | 0,68* |
| T2 | Humedad | | |
| | DF _{sup} | -0,89** | |
| | DF _{cont} | -0,94** | 0,95** |
| T3 | Humedad | | |
| | DF _{sup} | -0,87* | |
| | DF _{cont} | -0,72* | 0,91** |

(Sin referencia $p > 0,05$; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$)

4.2.4. Relación Humedad – Parámetros Fractales.

Los resultados encontrados anteriormente aplicando análisis de imágenes, determinaron que los parámetros de textura *GLCM* tuvieron una alta relación con la pérdida de humedad del producto. El análisis de estos parámetros definió que la entropía fue la que mejor describió esta relación. El desorden de las imágenes, que se reflejó en una mayor cantidad de niveles de grises a medida que avanzó el tiempo de secado, guardó una alta relación con la disminución de humedad en el producto. La Figura 39 muestra los gráficos correspondientes para cada temperatura de aire. De esta forma se presentó una alternativa por la cual fue posible seguir el secado sin utilizar los parámetros convencionales de control, tiempo y temperatura. En la Tabla XIV se listan las ecuaciones con sus respectivos coeficientes de determinación (R^2) de la representación gráfica de la entropía vs la humedad normalizada.



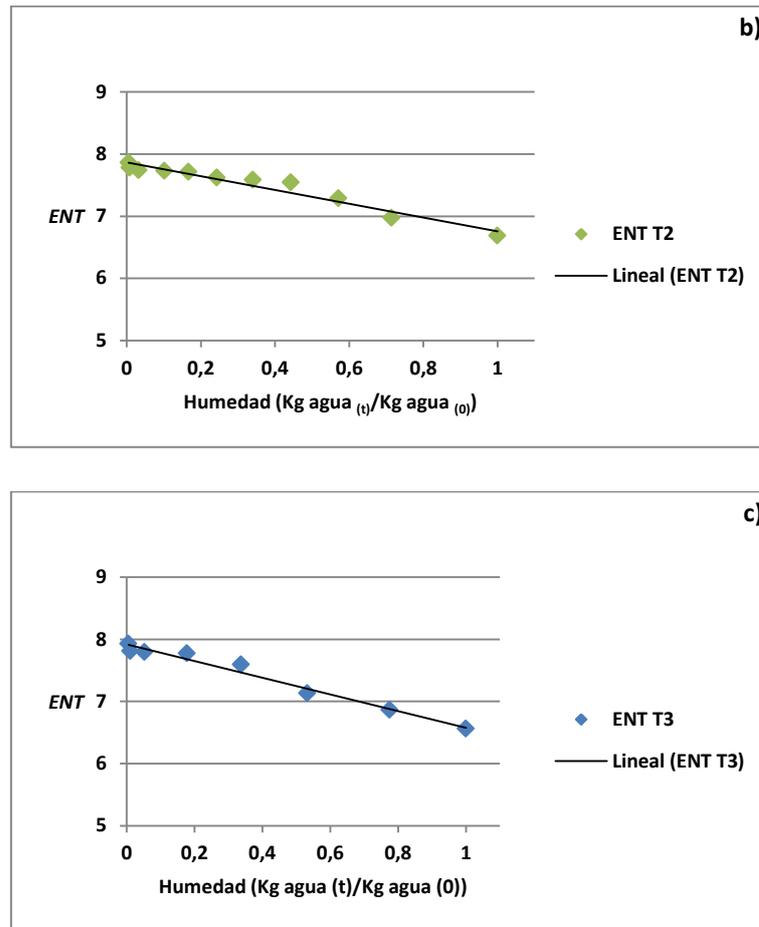


Figura 39. Variación de la Entropía en función de la humedad normalizada para los diferentes tratamientos térmicos a) T1, b) T2 y c) T3.

Tabla XIV. Ecuaciones de ajuste de la entropía en función de la humedad normalizada para las diferentes condiciones de temperatura de aire.

| Temp. | Ecuación |
|-------|---|
| T1 | $y = -1,6949x + 7,8193$ ($R^2=0,9853$) (Ec. 31) |
| T2 | $y = -1,1118x + 7,869$ ($R^2=0,9466$) (Ec. 32) |
| T3 | $y = -1,3458x + 7,9199$ ($R^2=0,9762$) (Ec. 33) |

4.3. Análisis colorimétrico del proceso de deshidratación de las rodajas de banana.

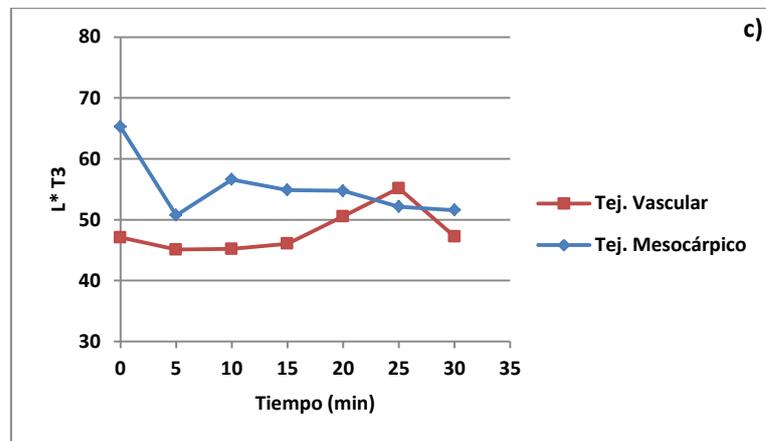
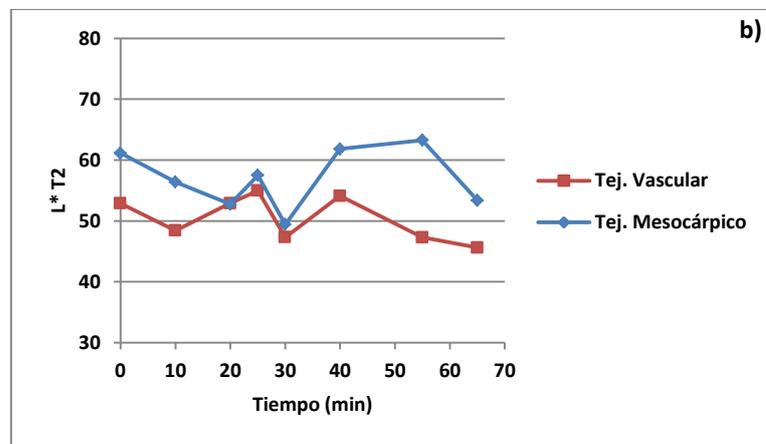
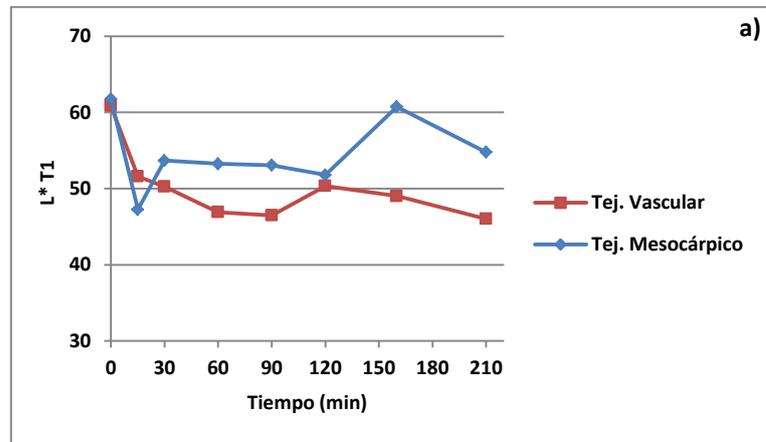
4.3.1. Cambios en la Luminosidad (Eje L*).

En la Figura 40 se muestra la variación de la Luminosidad con el tiempo de secado. Los resultados de las mediciones realizadas con espectrofotómetro de superficie mostraron que sus valores disminuyeron en el tejido vascular (centro de la rodaja) durante el secado en T1 y T2. La excepción fue T3, en donde hubo un ligero incremento, situación improbable para este estudio de secado, debido a que la fruta cambió su color natural a tonalidades oscuras. Los valores iniciales de Luminosidad estuvieron comprendidos entre 47,08 y 60,86, llegando al final del secado a valores entre 45,62 y 47,24. Para el tejido mesocárpico (que rodea al tejido vascular) el comportamiento fue similar ya que la Luminosidad disminuyó, pero esta vez en todas las temperaturas. No obstante, las gráficas de este parámetro en ambos tejidos tuvieron un comportamiento irregular, con zonas de aumento y disminución de sus valores, en los distintos tiempos de secado. Este comportamiento poco claro también fue informado por Krokida et al. (16) y se lo atribuyó al error experimental. Se debe considerar que cuando finalizó el secado, y para todas las temperaturas, el tejido vascular siempre presentó valores de Luminosidad levemente menores, es decir, una tonalidad más oscura con respecto al tejido mesocárpico.

La alta fluctuación de los resultados obtenidos con el espectrofotómetro de superficie llevó a cambiar la metodología con la cual se realizaron los análisis, utilizando las herramientas del programa ImageJ a partir del color promedio de las regiones de interés. Los valores iniciales promedio de L* (rodaja fresca) estuvieron comprendidos entre $71,80 \pm 0,01$ y $74,80 \pm 1,41$. Los resultados mostraron que la Luminosidad disminuyó de forma significativa en todas las temperaturas de aire ($p < 0,05$), debido al oscurecimiento de las rodajas y alcanzó valores finales comprendidos entre $54,50 \pm 3,25$ y $57,30 \pm 0,99$, en los productos secos. Esto demostró que la técnica de análisis de color por medio del uso de análisis de imágenes fue más objetiva debido a que el color observado correspondió al de toda la región de interés y no a una zona puntual donde se realizaron las mediciones como ocurrió con el uso del espectrofotómetro.

Feng y Tang (73) trabajaron en el secado de cubos de manzana en microondas y encontraron que la decoloración ocurrida durante este proceso podría estar relacionada con la reacción de pardeamiento no enzimático. Otros autores determinaron que un proceso a baja temperatura ($50\text{ }^{\circ}\text{C}$) no causó ningún cambio en la concentración de furosina, mientras éste

compuesto de formación temprana en la reacción de Maillard, fue notable para los procesos de alta y muy alta temperatura (110 °C) (74).



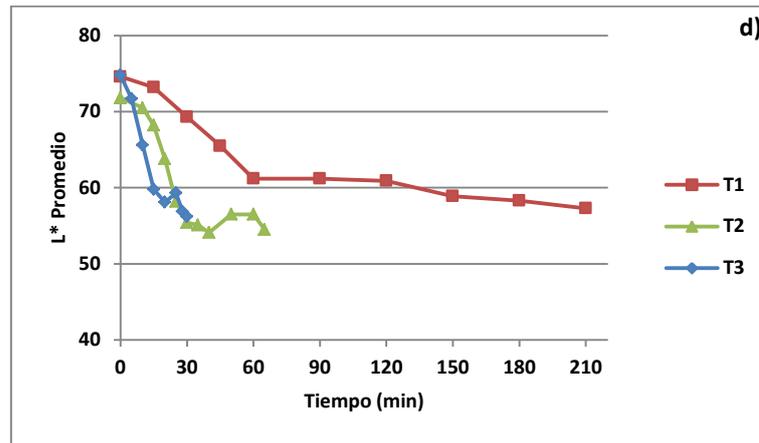


Figura 40. Valores de Luminosidad (L^*) en el tejido vascular y mesocárpico de las rodajas de banana para T1 (a), T2 (b), T3 (c) y L^* promedio en todas las temperaturas de secado (d).

4.3.2. Cambios en la cromaticidad verde-rojo (Eje a^*).

El parámetro a^* aumentó durante el secado (Figura 41). Un incremento de a^* denota una tonalidad más roja, lo que es un indicativo de la reacción de pardeamiento (16) y de la formación de pigmentos marrones (75). El análisis con espectrofotómetro de superficie mostró que el tejido vascular (centro de la rodaja) tuvo un ligero incremento en T3, llegando al final del secado a valor de $12,86 \pm 2,38$, mientras que para T1 y T2 los valores finales fueron de $11,22 \pm 1,21$ y $11,02 \pm 0,52$, respectivamente. Por otra parte, el tejido mesocárpico también presentó un aumento de a^* durante el secado y sus valores finales fueron de $10,65 \pm 0,84$ para T1, $11,88 \pm 1,96$ para T2 y de $14,12 \pm 3,03$ para T3.

La técnica de análisis de imágenes mostró que a^* aumentó de forma significativa durante el secado en todas las temperaturas de aire ($p < 0,05$), lo cual llevó a que los snacks consiguieran una tonalidad marrón/rojizo. En los tratamientos térmicos T1 y T2 no hubo diferencias significativas en los productos finales ($p > 0,05$), alcanzando valores de $19,90 \pm 0,71$ y $18,80 \pm 0,57$, respectivamente. Sin embargo, el producto obtenido en T3 mostró un desarrollo de a^* que fue considerablemente menor, cuyo valor final fue de $15,80 \pm 1,41$, presentando una diferencia estadística que fue significativa ($p < 0,05$) sobre los otros dos snacks. Este resultado se atribuyó a la combinación de dos factores. El primero, fue el menor tiempo de secado en T3, ya que este tratamiento representó condiciones de secado rápido, con solo 30 minutos de exposición de las rodajas a la acción de la temperatura. El segundo factor, estuvo relacionado con el desarrollo de color observado en la región de interés, que en este caso es el color promedio de todos los píxeles, y que no distingue zonas del tejido del fruto.

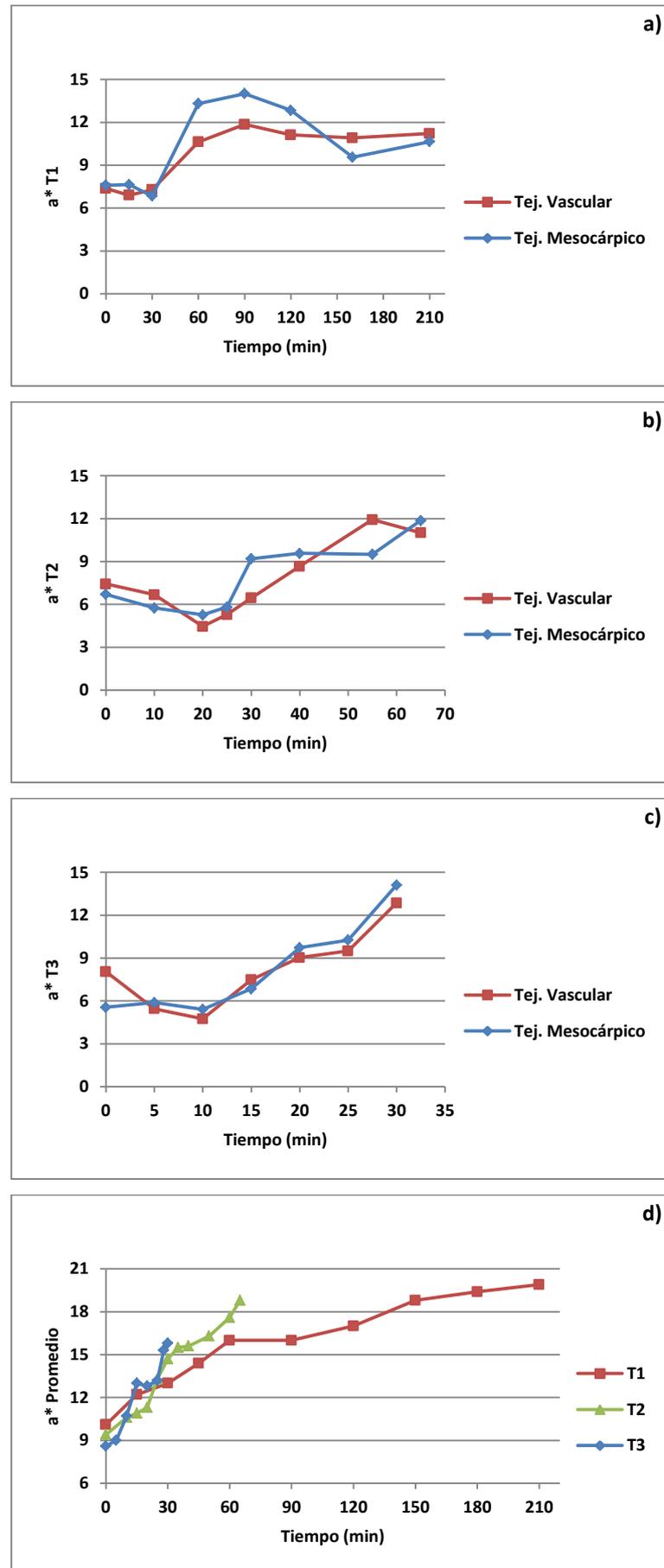
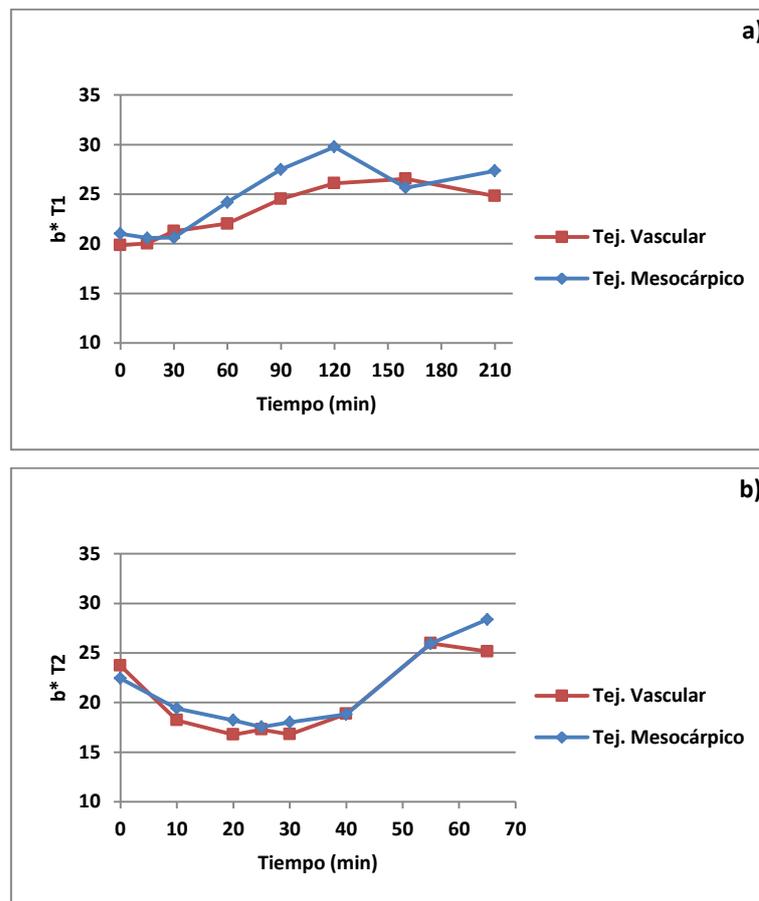


Figura 41. Evolución del parámetro a^* en el tejido vascular y mesocárpico de las rodajas de banana para T1 (a), T2 (b), T3 (c) y a^* promedio en todas las temperaturas de secado (d).

4.3.3. Cambios en la cromaticidad azul-amarillo (Eje b*).

En la Figura 42 se muestra la evolución de b* con el tiempo de secado. Cuando se midió con espectrofotómetro de superficie mostró aumentos en ambos tejidos del fruto, con valores finales comprendidos entre $24,82 \pm 1,29$ y $28,37 \pm 6,56$ en la zona vascular; y entre $27,36 \pm 1,83$ y $33,84 \pm 4,64$ en la zona mesocárpica. El aumento del parámetro b* señaló el desarrollo de color amarillo en los snacks.

Cuando se realizó el análisis de color mediante análisis de imágenes, se encontró un comportamiento similar con aumentos significativos de b* ($p < 0,05$) durante el secado en todas las temperaturas. Los valores de b* promedio en los productos finales estuvieron comprendidos entre $29,10 \pm 0,14$ y $32,90 \pm 0,14$. Pan et al. (14), estudiaron la deshidratación de banana por otros métodos y encontraron que b* aumentó cuando la muestra presentó un alto nivel de reducción de peso, causando pardeamiento.



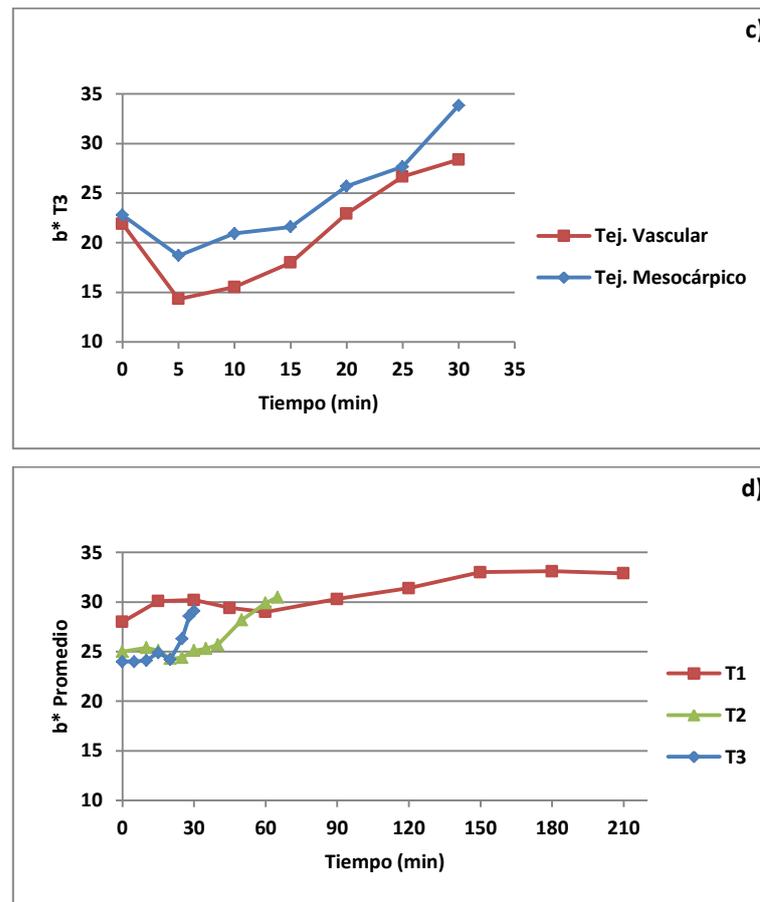


Figura 42. Evolución del parámetro b^* en el tejido vascular y mesocárpico de las rodajas de banana para T1 (a), T2 (b), T3 (c) y b^* promedio en todas las temperaturas de secado (d).

4.3.4. Cambios de color mediante el ΔE .

En la Figura 43 se muestra la relación entre los parámetros de color (ΔE). Esta magnitud reflejó la variación de color durante el secado teniendo en cuenta los cambios en la Luminosidad (L^*), el enrojecimiento (a^*) y la amarillez (b^*) de las rodajas de banana cuando se analizaron las regiones de interés. Los resultados mostraron que la diferencia de color incrementó de forma significativa desde que comenzó el secado ($p < 0,05$), lo cual es de esperar, debido al cambio de tonalidad que sufrieron las rodajas durante los procesamientos térmicos. Los productos secos tuvieron valores de ΔE entre $20,48 \pm 2,81$ y $20,63 \pm 3,37$. La variación de color sobre el tejido de la rodaja fue una modificación evidente ya que el ojo humano es capaz de detectar diferencias de color cuando el ΔE es superior a 5. Como un índice de evaluación importante, el color en cierta medida puede reflejar los efectos de la temperatura sobre los materiales (76). A pesar de conseguir valores similares entre los distintos tratamientos cuando finalizó el secado, en T3 el desarrollo de color fue rápido considerando el corto tiempo de exposición de las muestras a esta temperatura.

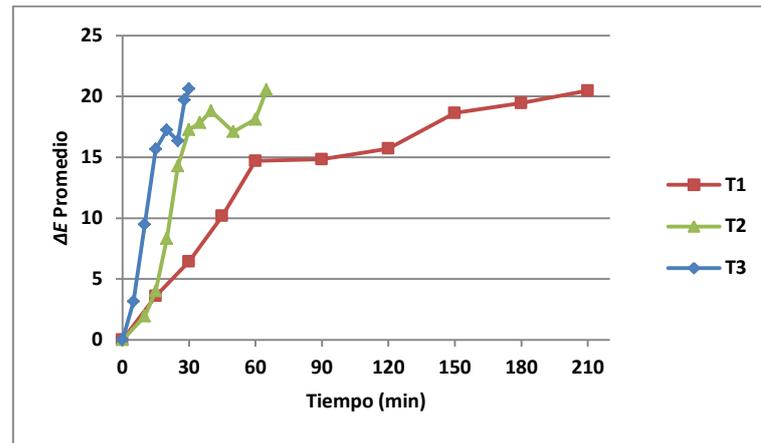


Figura 43. Variación de color (ΔE) sobre el área superficial de muestras de *Musa Cavendish* en diferentes condiciones de temperatura de secado.

4.3.5. Desarrollo de pardeamiento superficial.

En la Figura 44 se muestra el índice de pardeamiento normalizado obtenido por análisis de imágenes. Los resultados indicaron que el pardeamiento sobre la superficie del tejido vegetal incrementó de forma significativa para todas las temperaturas de aire ($p < 0,05$). El color de las rodajas de banana fue ligeramente amarillo antes del secado y oscureció después del secado (57). Los valores iniciales de índice de pardeamiento estuvieron comprendidos entre $46,02 \pm 3,74$ y $55,54 \pm 2,56$, y aumentaron ni bien comenzó la deshidratación. Al igual que el cambio de color, la velocidad de pardeamiento sobre la superficie del tejido estuvo influenciada por la temperatura, debido a que tratamientos térmicos más elevados alcanzaron altos niveles de pardeamiento en tiempos considerablemente cortos. Además, el comportamiento bien definido en cada temperatura guardó relación con el aumento del contraste, ya que ambos parámetros están referidos al oscurecimiento del material. Cuando finalizó el secado, el índice de pardeamiento alcanzó valores entre $90,94 \pm 12,91$ y $105,85 \pm 3,78$.

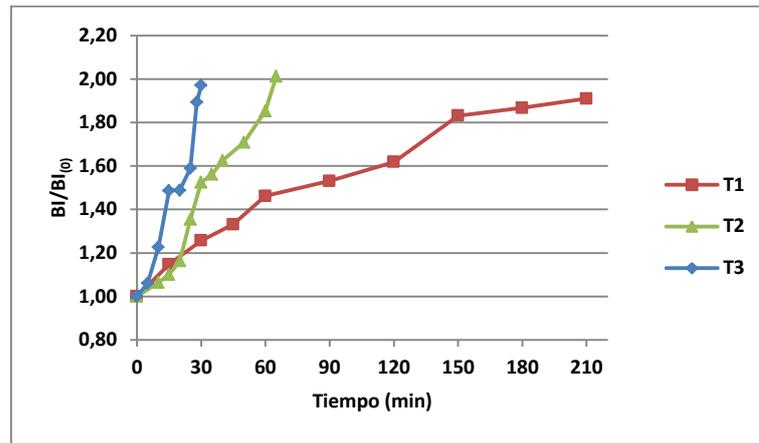


Figura 44. Evolución del índice de pardeamiento normalizado durante el secado convectivo de las rodajas de banana en diferentes condiciones térmicas.

En la Tabla XV se muestra el ajuste de los datos experimentales de índice de pardeamiento normalizado a una ecuación polinómica de segundo orden ($y=ax^2+bx+c$). El modelo describió de forma satisfactoria el comportamiento del pardeamiento en las temperaturas de aire estudiadas, con valores del coeficiente de determinación (R^2) superiores a 0,96.

Tabla XV. Modelización del índice de pardeamiento normalizado para el secado de rodajas de banana en diferentes temperaturas de aire.

| Temp. | Ecuación |
|-----------|--|
| T1 | $BI_N = (-2E-05)x^2+0,0078x+1$ ($R^2=0,98$) (Ec. 34) |
| T2 | $BI_N = (4E-05)x^2+0,0127x+1$ ($R^2=0,96$) (Ec. 35) |
| T3 | $BI_N = (4E-04)x^2+0,0179x+1$ ($R^2=0,96$) (Ec. 36) |

4.3.6. Efecto de los tratamientos térmicos sobre la tonalidad de grises en pixeles superficiales.

En la Figura 45 se muestra en escala de grises gráficos de superficie de rodajas de banana obtenidos con el programa ImageJ en tiempos inicial, intermedio y final de cada tratamiento térmico. En la fruta fresca ($t=0\text{min}$) se observó una superficie con niveles de grises uniformes, con tres pequeñas depresiones en la parte central, que son originarias de la evolución del ovario ínfero trilocular de la flor del banano. En esta zona se encuentran los óvulos que degeneraron y normalmente presenta tonalidades más oscuras que caracterizan al centro de la rodaja (véase Figura 23). A medida que transcurrió el tiempo de secado, el

producto oscureció por efecto de la temperatura que causó pardeamiento superficial. Esto provocó cambios en una importante cantidad de píxeles, que adquirieron niveles de grises de mayor intensidad, y por consiguiente, se ubicaron más cerca del cero dentro de la escala de los 256 niveles posibles. Las depresiones originales de la rodaja fresca presentaron un declive importante y se tornaron profundas sobre la parte central del material. Durante el tratamiento térmico más drástico (T3), la transformación de color fue más significativa ya que las rodajas adquirieron una tonalidad considerablemente oscura. En las imágenes se puede observar que este tratamiento modificó fuertemente toda la superficie –incluyendo píxeles del contorno de la rodaja– que lograron niveles de grises más intensos. Este efecto sobre el contorno se manifestó débilmente en T1 y fue un poco más notable en T2, demostrando la importancia que tiene el control de la temperatura y su efecto sobre el color de los productos en un proceso de deshidratación. En relación a las características fractales, anteriormente se expuso que el contraste se vio influenciado ya que cambió de forma significativa cuando aumento la temperatura de secado, logrando un mayor desarrollo del color negro y por consiguiente la reducción de la Luminosidad (L^*) de la imagen.

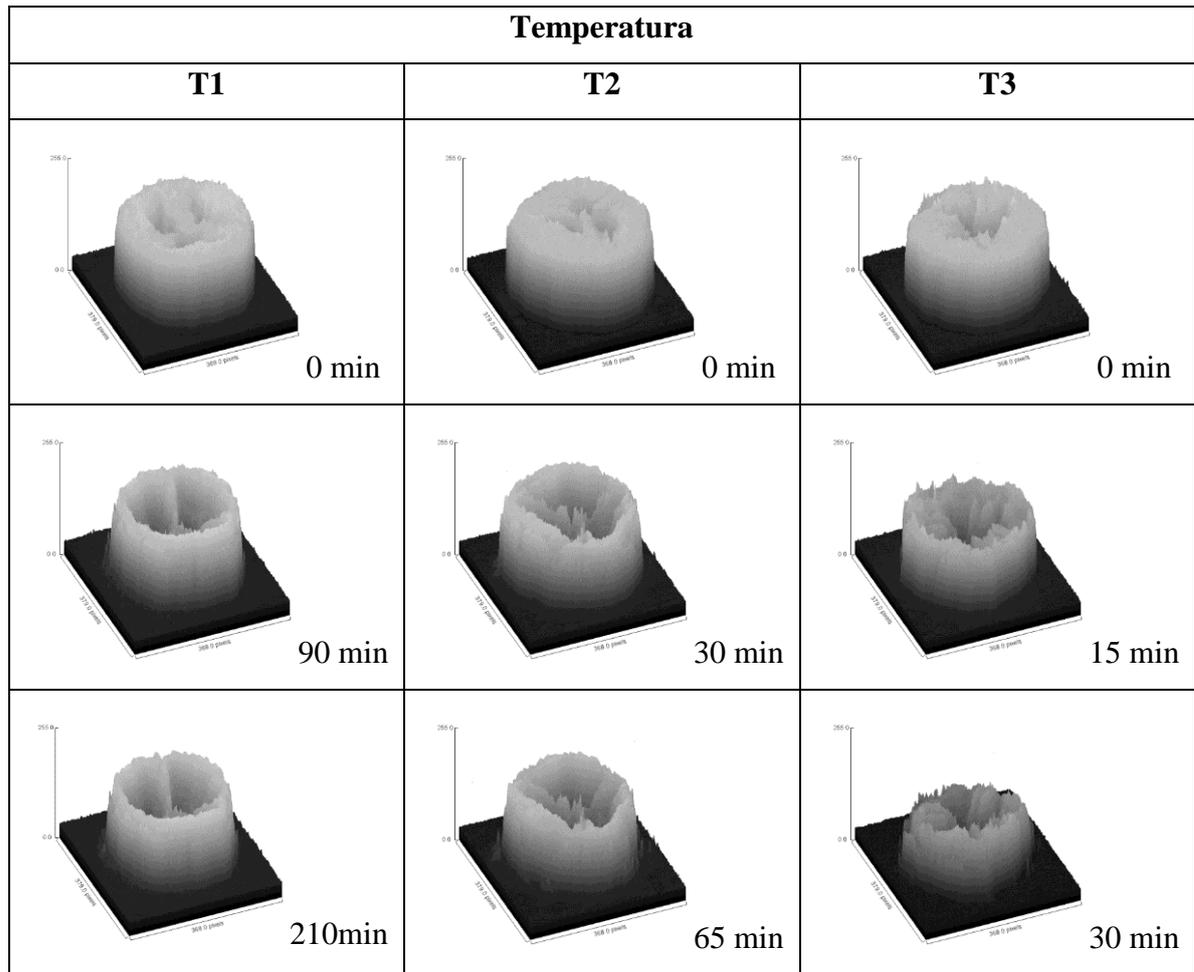


Figura 45. Modificación de la superficie de rodajas de banana en escala de grises durante el secado convectivo por aire caliente en diferentes condiciones de temperatura.

4.4. Análisis microestructural de las rodajas, propiedades térmicas del almidón de banana y análisis textural del producto final.

4.4.1. Efecto de los tratamientos térmicos sobre la estructura de la matriz.

En la Figura 46 se muestran imágenes obtenidas por SEM de los snacks de banana. La temperatura de secado influyó sobre la microestructura del tejido de la fruta ya que incrementó la cantidad de poros. El aumento de la temperatura de secado afectó fuertemente la morfología de la banana seca ya que el tamaño y el número de poros fue incrementándose (57). La porosidad experimenta un rápido aumento después de alcanzar cierto contenido de humedad en la etapa final de secado (77). Los poros presentaron formas irregulares y su distribución en las rodajas no siguió un patrón de referencia, superando en algunos casos los 200 micrómetros. El secado a alta temperatura provoca un aumento en la temperatura de la muestra y por lo tanto genera mayores gradientes de presión en su interior. Estos gradientes conducen a un fuerte movimiento de la humedad, resultando en mayores valores de porosidad (78). Prachayawarakorn et al. (69) encontraron resultados similares en fotografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido, las cuales revelaron la formación de poros de gran tamaño en la estructura de las rodajas secas cuando la temperatura de trabajo superó los 120 °C.

En relación a la superficie de los snacks, en las micrografías de T3 se observó una superficie más homogénea que la observada en T1 y T2. Esto se relacionó con el mayor grado de gelatinización del almidón durante el secado de las rodajas.

4.4.2. Micrografías de los gránulos de almidón.

Las imágenes de la Figura 47 corresponden a las micrografías electrónicas de barrido obtenidas de los gránulos de almidón. Las características morfológicas señalaron que la forma de los gránulos fue predominantemente ovoide-esférica. Por análisis de imágenes se determinó el tamaño de estos gránulos, encontrándose que fue similar al rango observado por Lii et al. (79), comprendido entre 20 a 60 micrómetros.

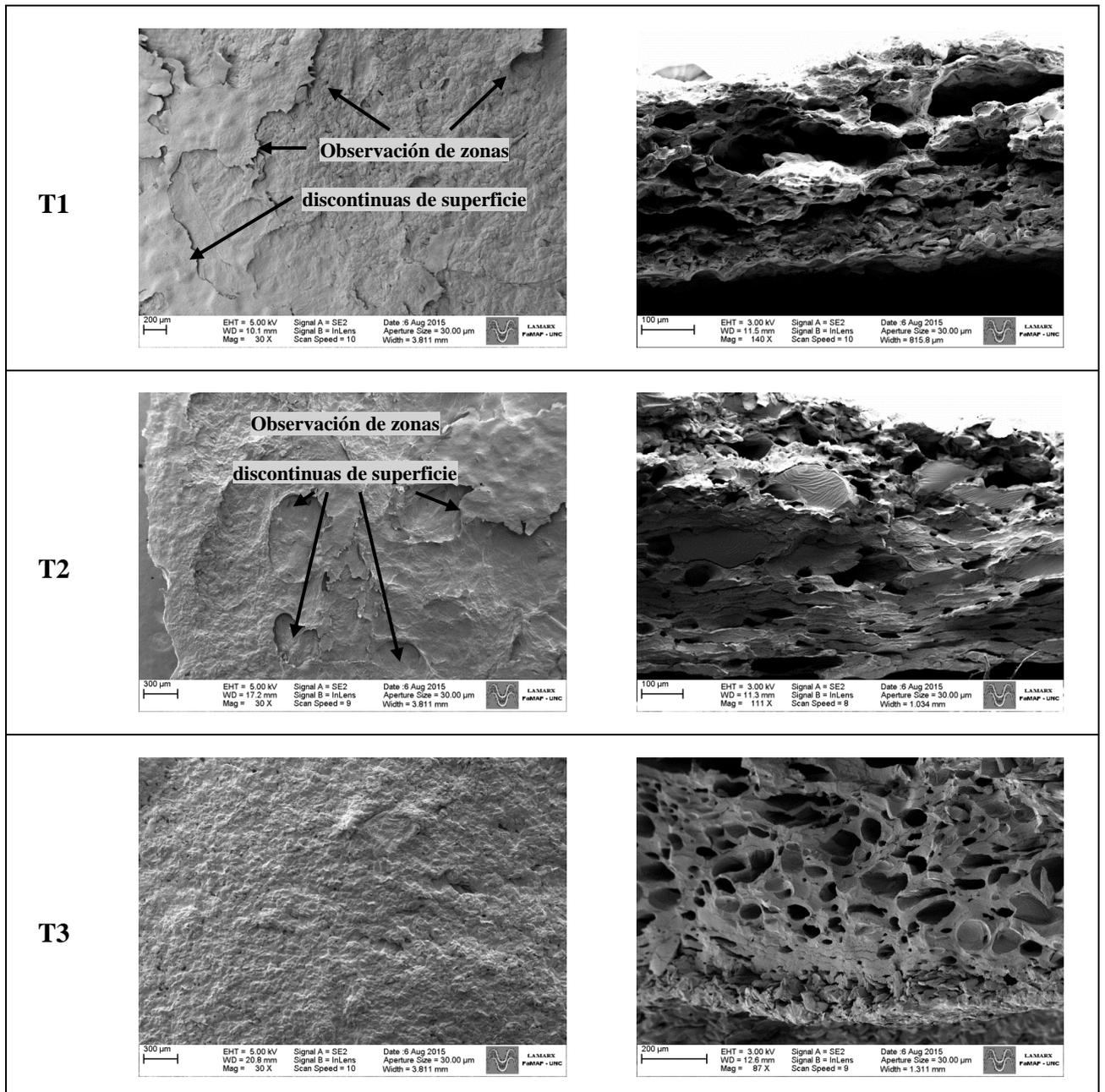


Figura 46. Morfología de las rodajas de banana obtenidas por SEM en los diferentes tratamientos térmicos.

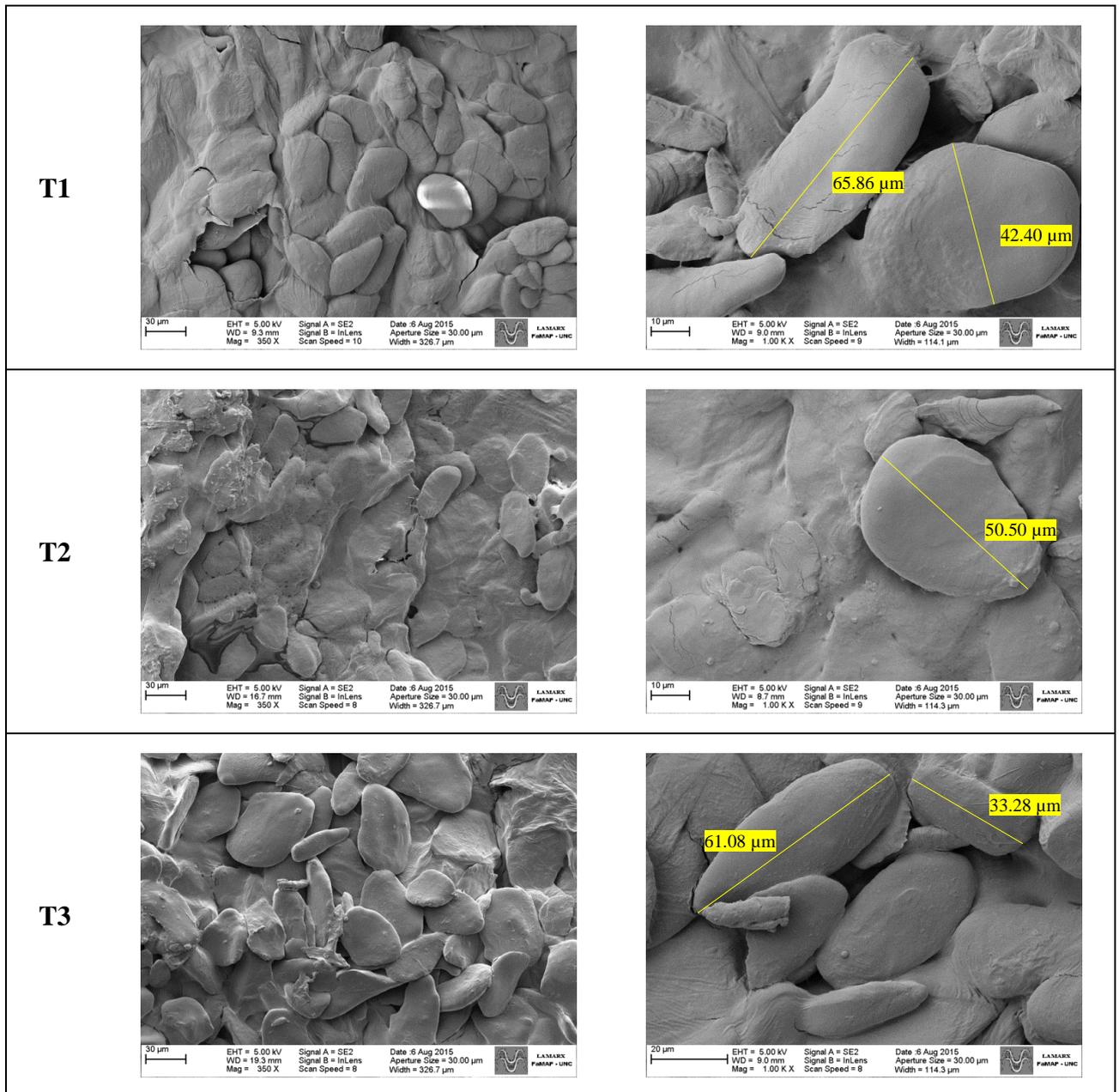


Figura 47. Micrografías de gránulos de almidón obtenidas por SEM (350X y 1000X) luego del secado convectivo por aire caliente de rodajas de banana en diferentes condiciones térmicas.

La superficie de los gránulos fue considerablemente lisa lo que coincidió con las observaciones realizadas por Garcia y Lajolo (80). La pérdida de uniformidad superficial se debió a la acción de la temperatura, que provocó la gelatinización parcial del almidón, y la fusión entre gránulos durante la deshidratación del producto.

4.4.3. Perfil calorimétrico del almidón.

En la Tabla XVI se muestran los resultados obtenidos del análisis calorimétrico diferencial (DSC) usado para estudiar las transiciones de fase que sucedieron durante el calentamiento del almidón en las muestras de banana. La gelatinización es un proceso en donde los gránulos originalmente intactos, insolubles en agua fría debido a su estructura altamente organizada, por acción térmica, comienzan a absorber agua en zonas amorfas, menos organizadas y más accesibles. El incremento de la temperatura hace que el gránulo retenga más agua y comience a hincharse, aumentando su volumen. Esta acción disminuye el número y tamaño de las regiones cristalinas. Al llegar a cierta temperatura, los gránulos alcanzan su volumen máximo y pierden su cristalinidad, marcado por la pérdida de birrefringencia y de su patrón de difracción de rayos X. El momento en que desaparece la birrefringencia corresponde a la temperatura de gelatinización y ocurre normalmente en un estrecho margen térmico. Estas endotermas mostraron un pico que estuvo comprendido entre 80 y 84 °C, que correspondió al proceso de gelatinización del almidón de banana. Otras especies vegetales presentan temperaturas de gelatinización relativamente menores, como por ejemplo: maíz, 61-72 °C; trigo, 53-64 °C y arroz, 65-73 °C (81). La alta temperatura de gelatinización del almidón de plátano puede estar relacionada con la longitud de las cadenas de la molécula de amilopectina (82).

La temperatura inicial de gelatinización (T_0) disminuyó en las muestras obtenidas a mayor temperatura ($p < 0,05$); mientras que en T1 y T2 no presentaron diferencias significativas ($p > 0,05$). Esta temperatura osciló entre 75,6 y 80,4 °C.

Finalmente, la entalpia de gelatinización de las muestras de los tratamientos térmicos T2 y T3 fue menor en relación a la banana fresca y a los snacks de T1 ($p < 0,05$), debido a que las altas temperaturas de estos tratamientos provocaron una mayor gelatinización del almidón durante el secado convectivo. Estos resultados muestran que en T3 aproximadamente un 76 % del almidón gelatinizó durante el secado.

Tabla XVI. Propiedades térmicas del almidón de banana obtenidas en cada temperatura de secado.

| Temperatura | Temperatura de inicio (T_0) ($^{\circ}\text{C}$) | Temperatura de gelatinización (T_p) ($^{\circ}\text{C}$) | Temperatura de finalización (T_f) ($^{\circ}\text{C}$) | Entalpia de gelatinización (ΔH) (J/g) |
|----------------------|--|--|--|---|
| Banana fresca | $80,4 \pm 1,6^a$ | $83,7 \pm 1,9^a$ | $91,5 \pm 3,6^a$ | $-3,97 \pm 0,74^a$ |
| T1 | $77,9 \pm 0,1^{ab}$ | $81,9 \pm 0,04^a$ | $89,1 \pm 0,2^a$ | $-4,33 \pm 0,43^a$ |
| T2 | $77,9 \pm 1,1^{ab}$ | $82,3 \pm 0,8^a$ | $88,7 \pm 0,04^a$ | $-1,91 \pm 0,26^b$ |
| T3 | $75,6 \pm 1,0^b$ | $80,6 \pm 0,8^a$ | $87,3 \pm 0,8^a$ | $-0,94 \pm 0,10^b$ |

4.4.4. Propiedades texturales de la banana deshidratada.

La Figura 48 muestra el análisis textural de snacks de banana obtenidos en cada tratamiento térmico. El perfil de dureza presentó valores entre 2,90 y 3,53 N. A pesar que mostró una tendencia de incremento a medida que aumentó la temperatura de aire, el análisis estadístico indicó que los cambios no fueron significativos cuando finalizó cada tratamiento ($p > 0,05$). En el trabajo realizado por Prachayawarakorn et al. (69) también se encontró que la temperatura de secado tuvo un efecto no significativo sobre la dureza de las muestras.

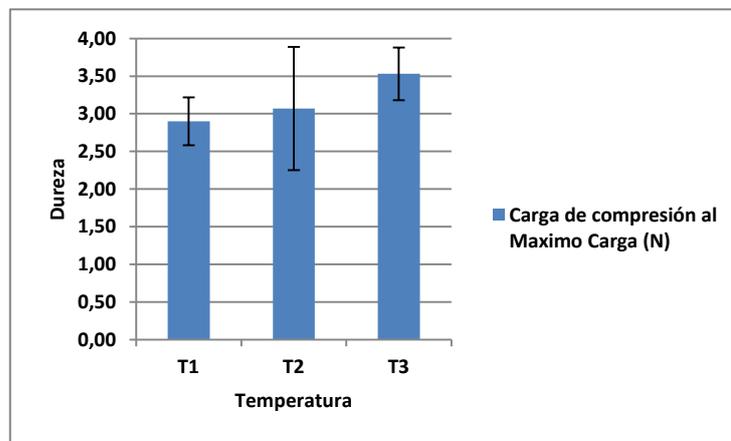


Figura 48. Valores de fuerza máxima encontrados para productos finales de distintos tratamientos térmicos.

5. CONCLUSIONES

Agregar valor a una fruta perecedera como la banana mediante la incorporación de tecnología aumenta la disponibilidad de alimentos y satisface necesidades alimentarias de una población creciente, además de ser un producto saludable frente a los snacks tradicionales.

Es posible establecer que la metodología del procesamiento de imágenes fue una herramienta útil que permitió monitorear de forma efectiva los cambios que ocurrieron durante el secado convectivo de las rodajas. Los datos extraídos desde las imágenes, particularmente la entropía, mostró una alta correlación con la pérdida de humedad del producto, haciendo que esta técnica sea más objetiva que la inspección visual de un operador. Esta metodología se posiciona como una alternativa sobre los parámetros convencionales de tiempo y temperatura, facilita el control del proceso y además tiene la ventaja de ser versátil, de bajo costo y de rápida respuesta.

Mediante microscopía electrónica de barrido se pudo observar y analizar la microestructura del producto. La porosidad de la rodaja aumentó cuando incrementó la temperatura de aire y esto se relacionó con el aumento del coeficiente de difusión efectivo (D_f) en las diferentes condiciones de secado.

Entre otros aspectos relacionados al tema de esta tesis, queda por investigar la estabilidad del producto en diferentes condiciones de almacenamiento, realizar análisis sensoriales, hacer un estudio de mercado orientado a determinar la viabilidad del producto y evaluar los costos de producción.

ANEXOS

Registro de temperaturas del horno de secado.

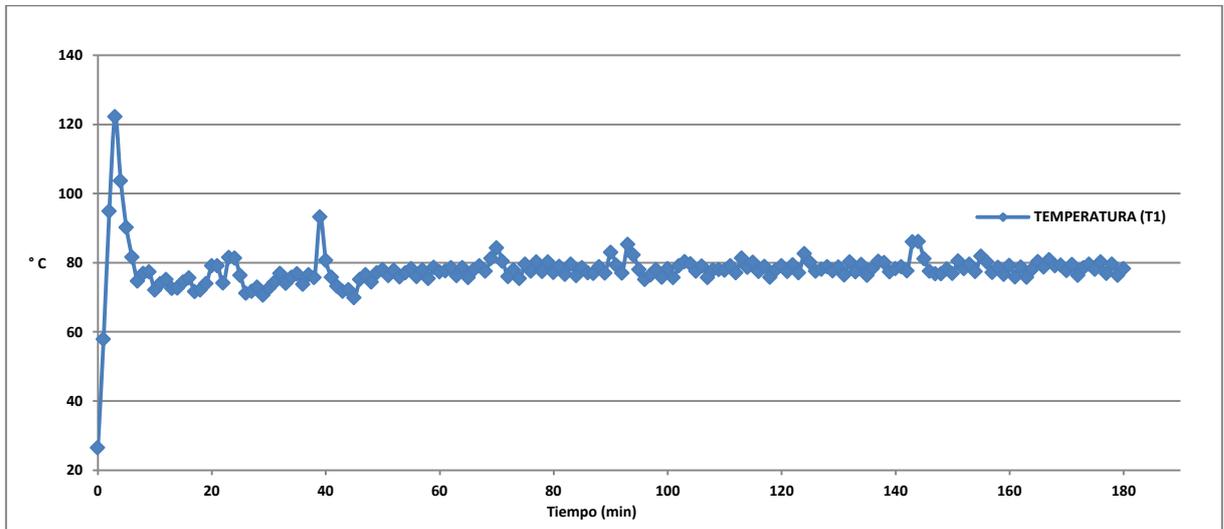


Figura 49. Registro de temperatura de horno para T1.

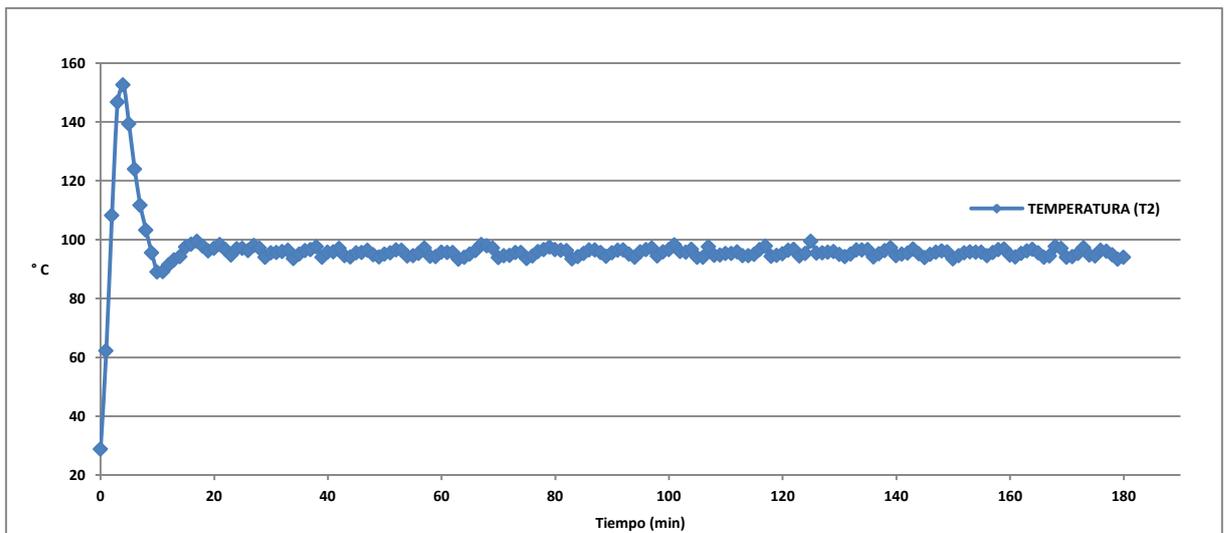


Figura 50. Registro de temperatura de horno para T2.

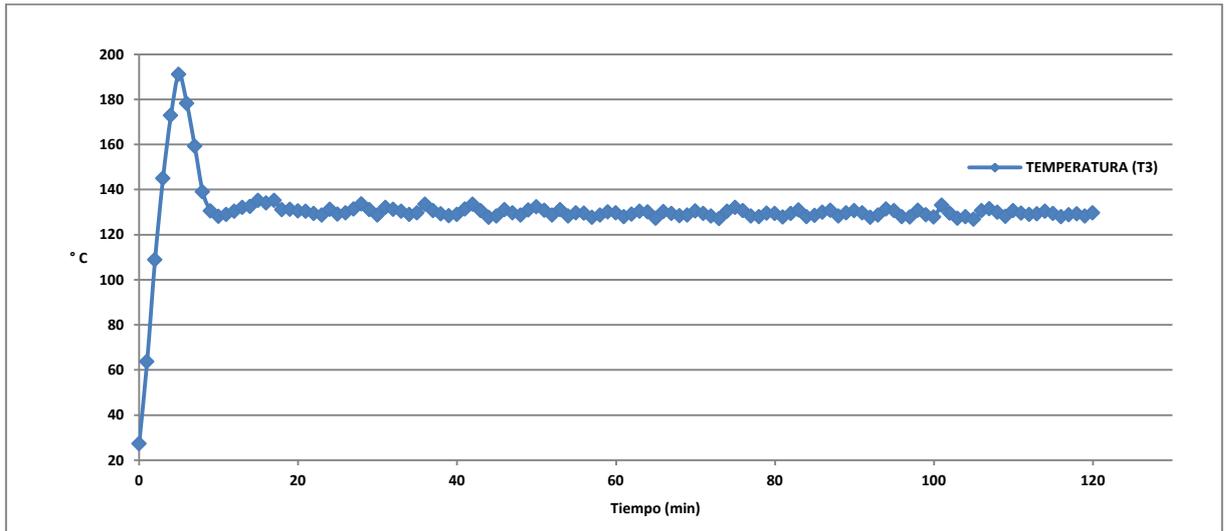


Figura 51. Registro de temperatura de horno para T3.

GLOSARIO

Birrefringencia. Doble refracción. Propiedad óptica de ciertos cuerpos que consiste en desdoblar un rayo de luz incidente en dos rayos linealmente polarizados de manera perpendicular entre sí.

Epígina. Inserción de las piezas florales por encima del ovario. Se dice también de la flor cuyos verticilos se insertan por encima del gineceo.

Lóculo. Cavidad de un órgano, generalmente de un fruto, un esporangio o una antera, en que se contienen semillas o esporas.

Pericarpo. Pericarpio. Parte del fruto que rodea a la semilla, generalmente se compone de tres capas: epicarpo, mesocarpo y endocarpo, de afuera hacia adentro respectivamente.

BIBLIOGRAFÍA

1. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. FAOSTAT. Base de datos sobre alimentación y agricultura. Producción de cultivos 2014. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> (acceso enero 15, 2017).
2. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. FAOSTAT. Base de datos sobre alimentación y agricultura. Comercio de cultivos y productos de ganadería 2013. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/TP> (acceso enero 15, 2017).
3. Colamarino, I. Producción de bananas. *Alimentos Argentinos*. **2011**, 50, 35-40.
4. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. FAOSTAT. Base de datos sobre alimentos y agricultura. Producción mundial de bananos 1994-2014. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC/visualize> (acceso enero 15, 2017).
5. Closa, S. J.; De Landeta, M. C. Universidad Nacional de Luján. <http://www.unlu.edu.ar/~argenfood/> (acceso enero 15, 2017).
6. United States Department of Agriculture (USDA). Agricultural Research Service. Basic Report: 09040, Bananas raw. <https://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/show/2159?fgcd=&manu=&lfacet=&format=&count=&max=35&offset=&sort=&qlookup=banana> (acceso enero 15, 2017).
7. Fernandes, F. A. N.; Rodrigues, S.; Gaspareto, O. C. P.; Oliveira, E. L. Optimization of osmotic dehydration of bananas followed by air-drying. *J. Food Eng.* **2006**, 77, 188-193.
8. Bains, R.; Langrish, T. A. G. Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas. *J. Food Eng.* **2007**, 79, 330-343.
9. Ramírez Céspedes, C.; Tapia Fernández, A. C.; Calvo Brenes, P. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE FRUTA DE BANANO DE ALTURA QUE SE PRODUCE EN EL CANTÓN DE TURRIALBA, COSTA RICA. *Revista InterSedes* [Online] **2010**, 11, 114-136. <http://www.intersedes.ucr.ac.cr/ojs/index.php/intersedes/article/viewFile/248/247> (acceso enero 15, 2017).
10. Li, M.; Slaughter, D. C.; Thompson, J. F. Optical chlorophyll sensing system for banana ripening. *Postharvest Biol. Technol.* **1997**, 12, 273-283.

11. ANMAT. Código Alimentario Argentino. http://www.anmat.gov.ar/alimentos/normativas_alimentos_caa.asp (acceso mayo 25, 2017).
12. Mayor, L.; Sereno, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *J. Food Eng.* **2004**, *61*, 373-386.
13. Chavan, U. D.; Prabhukhanolkar, A. E.; Pawar, V. D. Preparation of osmotic dehydrated ripe banana slices. *J. Food Sci. Technol.* **2010**, *47*, 380-386.
14. Pan, Z.; Shih, C.; McHugh, T. H.; Hirschberg, E. Study of banana dehydration using sequential infrared radiation heating and freeze-drying. *LWT Food Sci. Technol.* **2008**, *41*, 1944-1951.
15. Krokida, M. K.; Maroulis, Z. B. EFFECT OF DRYING METHOD ON SHRINKAGE AND POROSITY. *Drying Technol.* **1997**, *15*, 2441-2458.
16. Krokida, M. K.; Maroulis, Z. B.; Saravacos, G. D. The effect of the method of drying on the colour of dehydrated products. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2001**, *36*, 53-59.
17. Aguilera, J. M. Drying and Dried Products Under the Microscope. *Food Sci. Technol. Int.* **2003**, *9*, 137-143.
18. Fellows, P. Food Processing Technology: Principles and Practice, 2^a Ed; CRC Press: Washington, 2000.
19. Demirel, D.; Turhan, M. Air-drying behavior of Dwarf Cavendish and Gros Michel banana slices. *J. Food Eng.* **2003**, *59*, 1-11.
20. Zhu, Y.; Pan, Z.; McHugh, T. H. EFFECT OF DIPPING TREATMENTS ON COLOR STABILIZATION AND TEXTURE OF APPLE CUBES FOR INFRARED DRY - BLANCHING PROCESS. *J. Food Process. Preserv.* **2007**, *31*, 632-648.
21. Sandoval-Torres, S.; Rodríguez-Ramírez, J.; Méndez-Lagunas, L.; Sánchez-Ramírez, J. RAPIDEZ DE SECADO REDUCIDA: UNA APLICACIÓN AL SECADO CONVECTIVO DE PLÁTANO Roatán. *Rev. Mex. Ing. Quim.* **2006**, *5*, 35-38.
22. Akpınar, E. K. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *J. Food Eng.* **2006**, *73*, 75-84.
23. Kaymak-Ertekin, F. Drying and Rehydrating Kinetics of Green and Red Peppers. *J. Food Sci.* **2002**, *67*, 168-175.

24. Singthong, J.; Thongkaew, C. Using hydrocolloids to decrease oil absorption in banana chips. *LWT Food Sci. Technol.* **2009**, *42*, 1199-1203.
25. Batchelor, B. G.; Hill, D. A.; Hodgson, D. C. Automated visual inspection; IFS Publications Ltd: UK, 1985.
26. Blasco, J.; Aleixos, N.; Moltó, E. Machine Vision System for Automatic Quality Grading of Fruit. *Biosystems Engineering.* **2003**, *85*, 415-423.
27. Mendoza, F.; Dejmek, P.; Aguilera, J. M. Colour and image texture analysis in classification of commercial potato chips. *Food Res. Int.* **2007**, *40*, 1146-1154.
28. Pedreschi, F.; Mery, D.; Mendoza, F.; Aguilera, J. M. Classification of Potato Chips Using Pattern Recognition. *J. Food Sci.* **2004**, *69*, E264-E270.
29. Yano, T. Fractal Nature of Food Materials. *Biosci., Biotechnol., Biochem.* **1996**, *60*, 739-744.
30. Chanona, P. J. J.; Alamilla, B. L.; Farrera, R. R. R.; Quevedo, R.; Aguilera, J. M.; Gutiérrez, L. G. F. Description of the Convective Air-drying of a Food Model by Means of the Fractal Theory. *Food Sci. Technol. Int.* **2003**, *9*, 207-213.
31. Alamilla-Beltrán, L.; Chanona-Pérez, J. J.; Jiménez-Aparicio, A. R.; Gutiérrez-López, G. F. Description of morphological changes of particles along spray drying. *J. Food Eng.* **2005**, *67*, 179-184.
32. Barletta, B. J.; Barbosa-Cáovas, G. V. Fractal Analysis to Characterize Ruggedness Changes in Tapped Agglomerated Food Powders. *J. Food Sci.* **1993**, *58*, 1030-1035.
33. Peleg, M.; Normand, M. D. Characterization of the Ruggedness of Instant Coffee Particle Shape by Natural Fractals. *J. Food Sci.* **1985**, *50*, 829-831.
34. Kerdpi boon, S.; Devahastin, S.; Kerr, W. L. Comparative fractal characterization of physical changes of different food products during drying. *J. Food Eng.* **2007**, *83*, 570-580.
35. Haralick, R. M.; Shanmugam, K.; Dinstein, I. Textural Features for Image Classification. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics.* **1973**, *SMC-3*, 610-621.
36. Chen, W. S.; Yuan, S. Y.; Hsieh, C. M. Two algorithms to estimate fractal dimension of gray-level images. *Opt. Eng.* **2003**, *42*, 2452-2464.

37. Smith Jr, T. G.; Lange, G. D.; Marks, W. B. Fractal methods and results in cellular morphology - dimensions, lacunarity and multifractals. *J. Neurosci. Methods*. **1996**, *69*, 123-136.
38. Association of Official Analytical Chemists (AOAC). Official methods of analysis, 16th Ed; Washington, 1995.
39. Vega, A.; Andrés, A.; Fito, P. Modelado de la Cinética de Secado del Pimiento Rojo (*Capsicum annuum* L. cv Lamuyo). *Inf. Tecnol.* **2005**, *16*, 3-11.
40. Nguyen, M. H.; Price, W. E. Air-drying of banana: Influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season. *J. Food Eng.* **2007**, *79*, 200-207.
41. Espinoza Mendoza, R. E. Evaluación de caracteres morfológicos y estructurales del grano de arroz *variedad morelos A-98* mediante análisis fractal de imágenes digitales. Tesis de Doctor en Ciencias en Desarrollo de Productos Bióticos, Instituto Politécnico Nacional, Yautepec, México, 2012.
42. Universidad Nacional del Sur, Departamento de Ingeniería Química. Procesamiento de sólidos. Procesamiento de alimentos II. <http://www.criba.edu.ar/cinetica/solidos/Capitulo2.pdf> (acceso enero 15, 2017).
43. Quevedo, R.; Mendoza, F.; Aguilera, J. M.; Chanona, J.; Gutiérrez-López, G. Determination of senescent spotting in banana (*Musa cavendish*) using fractal texture Fourier image. *J. Food Eng.* **2008**, *84*, 509-515.
44. Santacruz-Vázquez, V.; Santacruz-Vázquez, C.; Welti-Chanes, J.; Farrera-Rebollo, R. R.; Alamilla-Beltrán, L.; Chanona-Pérez, J.; Gutiérrez-López, G. F. EFFECTS OF AIR-DRYING ON THE SHRINKAGE, SURFACE TEMPERATURES AND STRUCTURAL FEATURES OF APPLES SLABS BY MEANS OF FRACTAL ANALYSIS. *Rev. Mex. Ing. Quim.* **2008**, *7*, 55-63.
45. Maskan, M. Microwave/air and microwave finish drying of banana. *J. Food Eng.* **2000**, *44*, 71-78.
46. Baini, R.; Langrish, T. A. G. Assessment of colour development in dried bananas – measurements and implications for modelling. *J. Food Eng.* **2009**, *93*, 177-182.
47. Atares, L.; Sousa Gallagher, M. J.; Oliveira, F. A. R. Process conditions effect on the quality of banana osmotically dehydrated. *J. Food Eng.* **2011**, *103*, 401-408.

48. Palou, E.; López-Malo, A.; Barbosa-Cánovas, G. V.; Welti-Chanes, J.; Swanson, B. G. Polyphenoloxidase Activity and Color of Blanched and High Hydrostatic Pressure Treated Banana Puree. *J. Food Sci.* **1999**, *64*, 42-45.
49. Di Rienzo, J. A.; Guzmán, A. W.; Casanoves, F. A Multiple-Comparisons Method Based on the Distribution of the Root Node Distance of a Binary Tree. *Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics.* **2002**, *7*, 129- 142.
50. Chua, K. J.; Mujumdar, A. S.; Hawlader, M. N. A.; Chou, S. K.; Ho, J. C. Batch drying of banana pieces – effect of stepwise change in drying air temperature on drying kinetics and product colour. *Food Res. Int.* **2001**, *34*, 721-731.
51. Leite, J. B.; Mancini, M. C.; Borges, S. V. Effect of drying temperature on the quality of dried bananas cv. *prata* and *d'água*. *LWT Food Sci. Technol.* **2007**, *40*, 319-323.
52. Boudhrioua, N.; Michon, C.; Cuvelier, G.; Bonazzi, C. Influence of ripeness and air temperature on changes in banana texture during drying. *J. Food Eng.* **2002**, *55*, 115-121.
53. Pakowski, Z.; Adamski, A. The Comparison of Two Models of Convective Drying of Shrinking Materials Using Apple Tissue as an Example. *Drying Technol.* **2007**, *25*, 1139-1147.
54. Simal, S.; Deyá, E.; Frau, M.; Rosselló, C. Simple Modelling of Air Drying Curves of Fresh and Osmotically Pre-dehydrated Apple Cubes. *J. Food Eng.* **1997**, *33*, 139-150.
55. Poomsa-ad, N.; Soponronnarit, S.; Prachayawarakorn, S.; Terdyothin, A. EFFECT OF TEMPERING ON SUBSEQUENT DRYING OF PADDY USING FLUIDISATION TECHNIQUE. *Drying Technol.* **2002**, *20*, 195-210.
56. Srikiatden, J.; Roberts, J. S. Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying. *J. Food Eng.* **2006**, *74*, 143-152.
57. Thuwapanichayanan, R.; Prachayawarakorn, S.; Kunwisawa, J.; Soponronnarit, S. Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. *LWT Food Sci. Technol.* **2011**, *44*, 1502-1510.
58. Brennan, J. G.; Butters, J. R.; Cowell, N. D.; Lilley, A. E. V. Las operaciones de la ingeniería de los alimentos, 3ª Edición; Editorial Acribia SA: Zaragoza, 1998.

59. Misra, M. K.; Brooker, D. B. Thin-Layer Drying and Rewetting Equations for Shelled Yellow Corn. *Trans. ASAE*. **1980**, *23*, 1254-1260.
60. Rao, M. A.; Rizvi, S. S. H.; Datta, A. K. Engineering Properties of Foods, 3^a Edition; Taylor & Francis Group: USA, 2005.
61. Vega, A. A.; Lemus, R. A. Modelado de la Cinética de Secado de la Papaya Chilena (*Vasconcellea pubescens*). *Inf. Tecnol.* **2006**, *17*, 23-31.
62. Ocampo, A. MODELO CINÉTICO DEL SECADO DE LA PULPA DE MANGO. *Escuela de Ingeniería de Antioquia*. **2006**, (5), 119-128.
63. Vega Gálvez, A.; Tello Ireland, C.; Lemus Mondaca, R. SIMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROCESO DE SECADO DE LA GRACILARIA CHILENA (*GRACILARIA CHILENSIS*). *Rev. Chil. Ing.* **2007**, *15*, 55-64.
64. Fito, P.; Andrés, A.; Barát, J.; Albors, A. Introducción al secado de alimentos por aire caliente, 1^a Edición; Editorial Universidad Politécnica de Valencia: España, 2001.
65. Astigarraga-Urquiza, J.; Astigarraga-Aguirre, J. Hornos de alta frecuencia y microondas: teoría, cálculo y aplicaciones; Mc Graw-Hill: España, 1995.
66. Doymaz, I. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *J. Food Eng.* **2004**, *61*, 359-364.
67. Rosselló, C.; Simal, S.; SanJuan, N.; Mulet, A. Nonisotropic Mass Transfer Model for Green Bean Drying. *J. Agric. Food Chem.* **1997**, *45*, 337-342.
68. Doymaz, I. THIN-LAYER DRYING OF SPINACH LEAVES IN A CONVECTIVE DRYER. *J. Food Process Eng.* **2009**, *32*, 112-125.
69. Prachayawarakorn, S.; Tia, W.; Plyto, N.; Soponronnarit, S. Drying kinetics and quality attributes of low-fat banana slices dried at high temperature. *J. Food Eng.* **2008**, *85*, 509-517.
70. Fernández, L.; Castellero, C.; Aguilera, J. M. An application of image analysis to dehydration of apple discs. *J. Food Eng.* **2005**, *67*, 185-193.
71. Park, B.; Chen, Y. R. Co-occurrence Matrix Texture Features of Multi-spectral Images on Poultry Carcasses. *J. Agric. Eng. Res.* **2001**, *78*, 127-139.

72. Santacruz-Vázquez, V.; Santacruz-Vázquez, C.; Huerta-Espinosa, V. M. Evaluación del encogimiento y deformación de uvas durante su deshidratación por fluidización usando el análisis fractal. *Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales*. **2010**, *23*, 61-66.
73. Feng, H.; Tang, J. Microwave Finish Drying of Diced Apples in a Spouted Bed. *J. Food Sci.* **1998**, *63*, 679-683.
74. Anese, M.; Nicoli, M. C.; Massini, R.; Lerici, C. R. Effects of drying processing on the Maillard reaction in pasta. *Food Res. Int.* **1999**, *32*, 193-199.
75. López, A.; Piqué, M. T.; Boatella, J.; Parcerisa, J.; Romero, A.; Ferrá, A.; Garcí, J. INFLUENCE OF DRYING CONDITIONS ON THE HAZELNUT QUALITY. III. BROWNING. *Drying Technol.* **1997**, *15*, 989-1002.
76. Romano, G.; Baranyai, L.; Gottschalk, K.; Zude, M. An Approach for Monitoring the Moisture Content Changes of Drying Banana Slices with Laser Light Backscattering Imaging. *Food Bioprocess Technol.* **2008**, *1*, 410-414.
77. Aprajeeta, J.; Gopirajah, R.; Anandharamakrishnan, C. Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying. *J. Food Eng.* **2015**, *144*, 119-128.
78. Léonard, A.; Blacher, S.; Nimmol, C.; Devahastin, S. Effect of far-infrared radiation assisted drying on microstructure of banana slices: An illustrative use of X-ray microtomography in microstructural evaluation of a food product. *J. Food Eng.* **2008**, *85*, 154-162.
79. Lii, C. Y.; Chang, S. M.; Young, Y. L. Investigation of the Physical and Chemical Properties of Banana Starches. *J. Food Sci.* **1982**, *47*, 1493-1497.
80. Garcia, E.; Lajolo, F. M. Starch Transformation During Banana Ripening: The Amylase and Glucosidase Behavior. *J. Food Sci.* **1988**, *53*, 1181-1186.
81. Fennema, O. R. Química de los alimentos, 2ª Ed; Editorial Acribia SA: Zaragoza, 1993.
82. Hizukuri, S. RELATIONSHIP BETWEEN THE DISTRIBUTION OF THE CHAIN LENGTH OF AMYLOPECTIN AND THE CRYSTALLINE STRUCTURE OF STARCH GRANULES. *Carbohydr. Res.* **1985**, *141*, 295-306.

