

# CAMBIOS EN LA TEXTURA DE LA SUPERFICIE DE ESFERAS DE MELÓN (*Cucumis melo cantalupensis*) DURANTE EL SECADO POR FLUIDIZACIÓN

CHANGES IN SURFACE TEXTURE OF MELON (*Cucumis melo cantalupensis*) SPHERES DURING SPOUT FLUIDIZED BED DRYING

SANTACRUZ-VÁZQUEZ Verónica<sup>1\*</sup>, SANTACRUZ-VÁZQUEZ Claudia<sup>1</sup>, TOXQUI-LÓPEZ Santa<sup>2</sup>, LAGUNA-CORTÉS José Oscar<sup>3</sup>

Recibido: Enero 15 de 2013    Aceptado: Noviembre 21 de 2013

## RESUMEN

**Antecedentes:** El encogimiento y los cambios morfológicos de las frutas durante el secado son fenómenos difíciles de evaluar puesto que los alimentos no son tejidos homogéneos y sus propiedades físicas se ven afectadas por su contenido de humedad. **Objetivos:** El objetivo de este artículo fue describir los cambios morfológicos en la superficie de esferas de melón durante el secado por fluidización, empleando el análisis de imágenes y la teoría fractal. **Métodos:** Las imágenes de esferas de melón fueron obtenidas con una videocámara durante el secado por fluidización. Las variables de estudio fueron: velocidad, en niveles de 2, 3 y 4 m/s, y temperatura del aire de secado a 70° y 80°C. El encogimiento de las esferas de melón fue definido como  $A/A_0$ , donde  $A_0$  y  $A$  fueron las dimensiones original y final de las esferas durante el secado, respectivamente. Seis zonas de medición fueron seleccionadas en la superficie de las esferas para evaluar el contenido de humedad (CHZ). Los cambios morfológicos de la superficie de las esferas deshidratadas fueron evaluados mediante la dimensión fractal de la textura ( $DF_{SDBC}$ ) de las imágenes obtenidas durante el secado por fluidización. **Resultados:** Se observó un decremento irregular del encogimiento ( $A/A_0$ ) de las esferas vs. Tiempo de secado. Las condiciones de secado que registraron mayor irregularidad en la contracción de la esfera fueron 70°C y 2 m/s, condiciones en las cuales se produjeron distribuciones del contenido de humedad (CHZ) en la superficie de la esfera. La distribución de los CHZ condujo a la aparición de zonas con diferente contenido de humedad durante el secado, produciendo una deshidratación no homogénea de la esfera de melón. Los valores de  $DF_{SDBC}$  oscilaron entre 2,22 y 2,30. Se observó que los cambios morfológicos en la superficie de la esfera fueron progresivos, como resultado de la deshidratación. **Conclusiones:** Existieron cambios morfológicos en la superficie de las esferas de melón debido a la distribución de los CHZ durante el secado por fluidización. Los valores de  $DF_{SDBC}$  de la superficie de las esferas de melón se incrementaron, indicando una superficie más rugosa durante el secado.

**Palabras clave:** Deshidratación, *Cucumis melo*, cambios morfológicos, deformación.

---

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería Química. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Ciudad Universitaria, 72570, Puebla. Puebla, México.

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Ciudad Universitaria, 72570, Puebla. Puebla, México.

<sup>3</sup> Instituto Tecnológico de Puebla. Avenida Tecnológico #420 Colonia Maravillas Puebla. Puebla, México.

\* Autor a quien se debe dirigir la correspondencia: versanva@gmail.com

## ABSTRACT

**Background:** Shrinkage and morphometric changes of fruit during drying are phenomena difficult to evaluate since foodstuff are not homogeneous material and their physical properties are strongly influenced by its moisture content. **Objectives:** The aim of this paper was to describe, by means of image analysis and fractal theory the morphometric changes in the surface of melon spheres during spout fluidized bed drying. **Methods:** Images of melon spheres during spout fluidized bed drying were obtained with a videocamcorder. The studied variables were the dry airflow, at levels of 2, 3, and 4 m/s; and dry air temperature at 70 and 80°C. The shrinkage was defined as ratio of areas ( $A/A_0$ ) of melon spheres, where  $A_0$  and  $A$  were initial and final dimensions of the spheres during drying, respectively. Six measurement zones were selected on the surface of the spheres to evaluate moisture content (MCZ). Surface morphometric changes of dehydrated spheres were evaluated by means of fractal dimension of the texture ( $FD_{SDBC}$ ) of the obtained images during fluidized bed drying. **Results:** It was observed an irregular decreasing of spheres shrinkage ( $A/A_0$ ) vs. drying time. The highest irregularity in the contraction of the sphere was obtained at drying conditions of 70°C, and 2 m/s. At these conditions, a distribution of moisture content zones (MCZ) in the surface of melon spheres were observed. Distribution of MCZ generated the onset of zones with different moisture contents, along the drying on the surface of the spheres, which produced a non-homogeneous dehydration of the melon spheres.  $FD_{SDBC}$  values were between 2.22 and 2.30. It was observed that morphology changes of surface were progressive because of the dehydration. **Conclusions:** Morphometric changes on surface of melon spheres were influenced by a distribution of MCZ on the surface, found during spout fluidized bed drying.  $FD_{SDBC}$  values of the surface of melon spheres were increased, indicating a rougher surface during drying. **Keywords:** Dehydration, *Cucumis melo*, morphology changes, deformation.

## INTRODUCCIÓN

El melón cantaloupe (*Cucumis melo cantalupensis*) es la variedad comercial más importante en el mercado mexicano de melones; no obstante, este cultivo presenta grandes pérdidas post-cosecha dada su gran sensibilidad al daño por frío cuando es almacenado a bajas temperaturas, lo que limita la posibilidad de almacenamiento y una reducción en su vida útil. Se ha buscado algunas alternativas para su conservación, siendo la más importante el procesamiento mínimo como una estrategia para reducir las pérdidas post-cosecha (1) y la reducción de reacciones enzimáticas de deterioro del producto (2, 3). Además, en la literatura se reporta el uso de atmósferas modificadas para la reducción de la tasa de respiración durante la producción de etileno en el fruto (4 - 6).

El secado con aire caliente es otra tecnología que, aunque poco se ha empleado, pudiese representar una alternativa para la conservación de este fruto, dadas las características fisicoquímicas de este cultivo que dificultan la aplicación de tecnologías de conservación para la reducción y control de flora microbiana. Entre estas características fisicoquímicas se encuentra un alto contenido de humedad (85 - 90%) (7), pH cercano al punto neutro (5,5 - 6),

alto contenido de azúcares (12 - 15°Bx), alta sensibilidad a daños mecánicos, producción de etileno (8) y alta susceptibilidad de daño en presencia de atmósferas modificadas (9). El secado es un proceso que ha sido utilizado a través de la historia (10) y su aplicación a los alimentos ayuda a su conservación y disponibilidad. La naturaleza de la materia prima, las características del equipo y condiciones de operación influyen de manera decisiva en el proceso de secado y en las características físicas del producto deshidratado (11 -13).

El secado por fluidización es un método muy empleado para el procesamiento de alimentos y ha sido objeto de estudio para varios investigadores (14, 15), dado que presenta ventajas económicas en comparación con otros métodos de deshidratación. Durante el secado de alimentos por fluidización el producto se mantiene en estado suspendido en una corriente de aire, presentando una gran superficie efectiva de contacto entre el alimento y el aire, y con ello altas velocidades de transferencia de masa y calor, reducción en el tiempo de proceso y reducción en el deterioro nutricional del alimento durante el proceso de deshidratación (10, 16, 17). Existen pocos reportes de investigación acerca de la deshidratación de melón variedad cantaloupe (*Cucumis melo*

*cantalupensis*), mientras que tejidos vegetales como la papa y la manzana (14, 16) han sido ampliamente estudiados durante su deshidratación; sin embargo, el melón variedad cantaloupe es un modelo alternativo dada su estructura celular.

Recientemente, la aplicación del análisis fractal en la ciencia de alimentos ha ayudado a explicar la morfología de productos deshidratados (18 - 23), el cual es un concepto relacionado con propiedades inherentes al material como la tortuosidad, la rugosidad, la porosidad y su deformación durante la deshidratación (24 - 27).

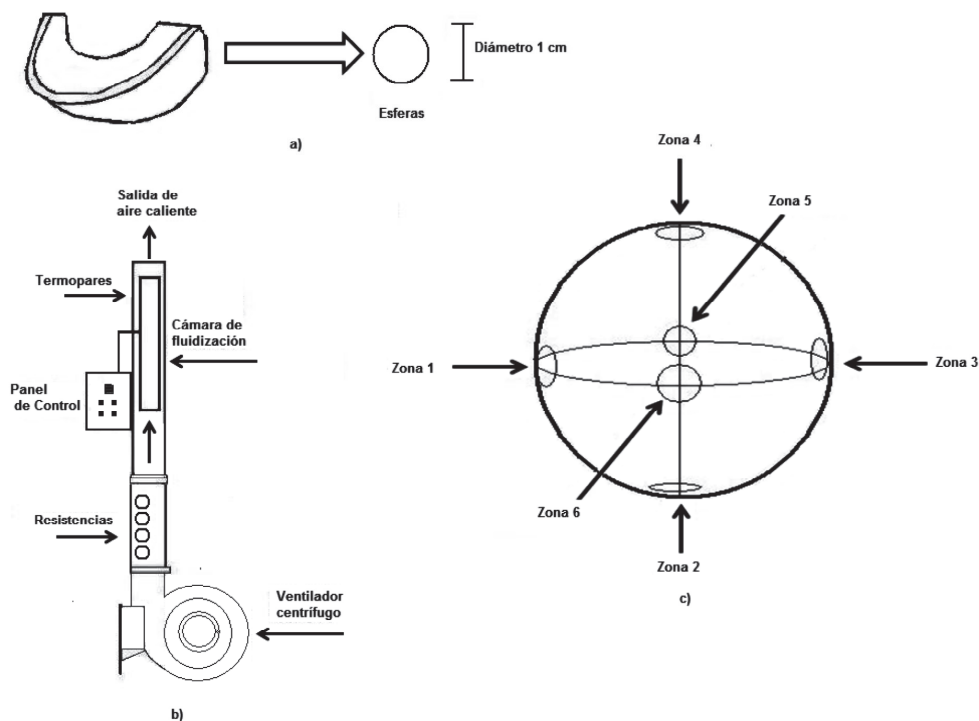
El concepto de textura fractal fue introducido como una de las aplicaciones del análisis de imágenes y análisis fractal, que permite describir y cuantificar la rugosidad y los cambios morfométricos de una imagen mediante la obtención de su dimensión fractal ( $DF_{SDBC}$ ). Las superficies lisas, sin rugosidad, presentan valores numéricos próximos a 2 ( $DF_{SDBC} > 2$ ), mientras que las superficies altamente rugosas presentan un incremento en los valores de la dimensión fractal (22, 28, 29). La textura fractal representa la distribución espacial de las variaciones de las sombras que se generan

en las mismas imágenes (30), existiendo diferentes métodos para evaluarla, entre los cuales se encuentra el método de Richardson (cuyo patrón son líneas de medición) o el método de conteo de cajas, en el cual utilizan cuadros o cubos como patrón de medición (31). En este contexto, el objetivo del presente trabajo de investigación fue describir los cambios morfométricos en la superficie de esferas de melón durante el secado por fluidización en dos etapas, a través de la aplicación del Análisis Fractal y el Análisis de Imágenes.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Materia prima

Se adquirió ejemplares de melón variedad cantaloupe (*Cucumis melo cantalupensis*) de similar grado de maduración en un mercado local en la ciudad de Puebla, éstos fueron almacenados en el laboratorio por 24 horas a temperatura ambiente (20°C) para su aclimatación. El melón fue pelado manualmente y cortado en forma de esferas (1 cm de diámetro) con un punzón esférico de aluminio de bordes afilados, tal como se observa en la figura 1a.



**Figura 1.** a) Diagrama que muestra el corte para la obtención de las esferas de melón (*Cucumis melo L*); b) Diagrama del secador experimental usado en la experimentación; c) Diagrama para la determinación del contenido de humedad por zonas (CHZ) en las esferas de melón.

## Secado por fluidización

Se utilizó un secador de lecho fluidizado experimental a escala de laboratorio, que consiste en un túnel de sección cuadrada de 0,3 m por el cual circula aire impulsado por un ventilador acoplado a un motor de  $\frac{3}{4}$  HP. El aire es calentado con resistencias antes de ser forzado en el secador de lecho fluidizado. En la cámara de fluidización se colocó las esferas de melón y la temperatura del lecho se midió por medio de termopares conectados a un registrador y controlador digital. Se midieron continuamente la temperatura de entrada, la temperatura en el centro del lecho y la temperatura de bulbo seco y húmedo del aire a la salida del secador. El flujo de aire fue determinado por un termo-anemómetro digital marca PCE modelo PCE-009 (figura 1b).

Las variables de estudio fueron: velocidad del aire de secado con niveles de 2, 3 y 4 m/s, y temperatura de 70° y 80°C. Las esferas de melón fueron deshidratadas hasta obtener la humedad de equilibrio con tres réplicas por cada condición estudiada. La altura del lecho se mantuvo constante con una L/D de 0,3. Conforme transcurre el secado, la pérdida de humedad en las partículas va acompañada del efecto de encogimiento y fluidización de las muestras. Para evitar el golpeteo de las muestras en la parte superior del cuerpo del secador fue necesario disminuir el flujo de aire caliente inicial a un flujo menor correspondiente a 1 m/s. La reducción del flujo de aire caliente en el secador se realizó una vez que el contenido de humedad de las muestras fue igual a 2Kg H<sub>2</sub>O/Kg s.s. El cambio en la velocidad de aire en este tipo de secadores también ha sido reportado por autores como Zielinska *et al.*, 2007 (32).

## Métodos de análisis

### *Determinación de humedad de las muestras*

Se determinó el contenido de humedad en 6 diferentes secciones de cada esfera sometida a la deshidratación, a esto se le denominó Contenido de Humedad por Zona (CHZ), expresado en Kg H<sub>2</sub>O/Kg s.s. Dichas zonas de la muestra fueron identificadas con un marcador indeleble, previo al secado (figura 1c). La humedad de las muestras, para todos los experimentos de secado, se determinó por el método de estufa al vacío AOAC, 20.013 (33).

### *Determinación del área proyectada de las muestras*

Se capturó imágenes de las esferas de melón durante su deshidratación con una videocámara Cannon® X3200, que posteriormente fueron transferidas a una computadora personal (Pavilion® DV6-3088LA). El pre-procesamiento y análisis de las imágenes se realizó con el programa Corel® Photopaint versión 12, en donde se realizó un filtrado de las imágenes, así como el aumento del contraste-luminosidad, reducción de la distorsión y extracción de los contornos y áreas de las imágenes. Se evaluó el área máxima de las imágenes pre-procesadas con el programa Sigma Scan™ Image Measurement PRO (Jandel Scientific Corporation, 2003). El área máxima (A) fue obtenida de imágenes de tres muestras diferentes para cada tiempo de muestreo. Finalmente, se obtuvo el gráfico del área normalizada (A/Ao) vs. tiempo de secado, donde A es el área de las muestras para el tiempo de muestreo  $t$  (píxeles) y Ao el área inicial de las muestras (píxeles).

### *Determinación de los cambios morfométricos en las esferas de melón mediante el análisis fractal de la textura de sus imágenes*

Los cambios morfométricos en las esferas de melón fueron determinados mediante la obtención de la dimensión fractal de la textura superficial  $DF_{SDBC}$  de las imágenes obtenidas.

Cada una de las imágenes fue transferida, digitalizada y posteriormente analizada utilizando el programa Sigma Scan™ Image Measurement Pro (Jandel Scientific Corporation, 2003), de las cuales se obtuvo una matriz numérica cuadrada cuyos datos fueron los valores de la intensidad de los píxeles en escala de grises (0 - 255). Esta matriz numérica fue analizada mediante un algoritmo diseñado en el Programa Matlab versión 5.0, el cual consistió en seleccionar matrices de tamaño diferente (N) a partir de la matriz original y calcular las diferencias entre los valores máximos y mínimos de los datos de las matrices seleccionadas (R). Posteriormente, el algoritmo calculó el valor absoluto de la pendiente de la línea recta del gráfico logarítmico R vs. N. La dimensión fractal de la textura de las imágenes fue obtenida a partir de la ecuación 1 y el algoritmo diseñado fue obtenido a partir del Método de Hurst (20).

$$DF_{SDBC} = 2 + |g|$$

**Ecuación 1.**

donde  $g$  = pendiente de la línea recta del gráfico logarítmico ( $R$ ) vs. ( $N$ ), donde  $R$  = diferencias de los valores máximos y mínimos de los datos de las matrices seleccionadas;  $N$  = tamaño de las matrices de datos.

### Análisis estadístico.

Los datos experimentales fueron sometidos a un análisis de varianza considerando un nivel de confianza del 95%. Los cálculos correspondientes fueron efectuados con el programa estadístico SPSS® para Windows versión 9.0. Las respuestas a estudiar fueron el encogimiento, contenido de humedad y deformación de la esfera expresada como dimensión fractal de la textura de la superficie de las esferas ( $DF_{SDBC}$ ).

## RESULTADOS

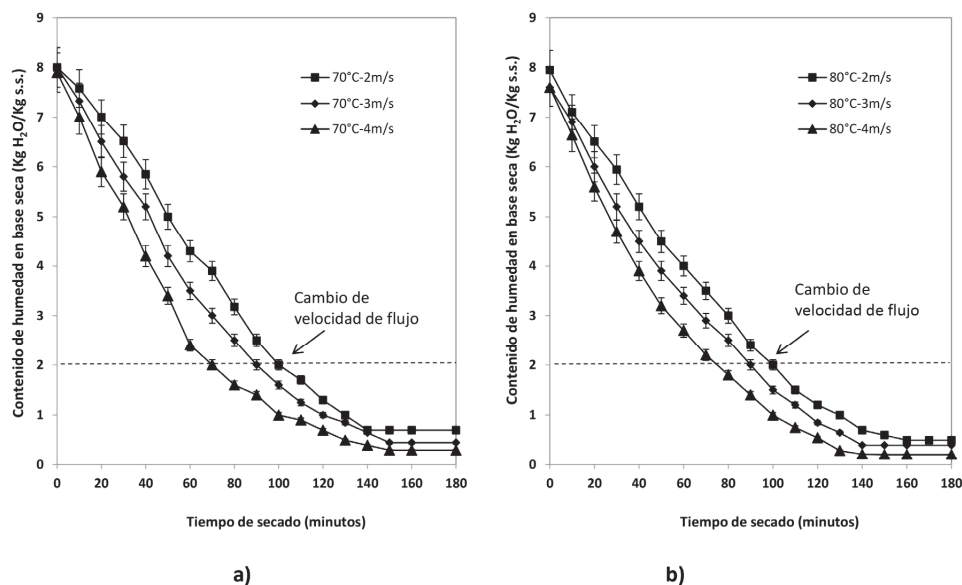
### Curvas de secado de las esferas de melón a las diferentes condiciones de estudio

Las representaciones gráficas de contenido de humedad en función del tiempo de secado para las esferas de melón bajo las condiciones estudiadas se presentan en la figura 2. En esta se puede observar que bajo las condiciones ensayadas la pérdida de humedad es mayor cuando se aumenta la velocidad del aire de secado, siendo evidente este comportamiento durante los primeros minutos del proceso.

El análisis estadístico efectuado a través de la prueba t-Pareada mostró que existe diferencia significativa entre las curvas de secado de los 6 tratamientos durante los primeros 120 minutos, reportando que la velocidad y la temperatura del aire de secado ejercieron un efecto significativo en la rapidez de secado de las muestras para un intervalo de confianza del 95% ( $p < 0,05$ ). Mientras que para tiempos largos de secado ( $t > 160$  minutos) no se reportó diferencia significativa entre las curvas de secado para un intervalo de confianza del 95%, dado que en esta última etapa las esferas de melón presentaron un contenido de humedad cercano al contenido de humedad del equilibrio. En la figura 2 se observa el efecto de la temperatura sobre la curva de secado, ya que al aumentar la temperatura del aire de secado disminuyó el tiempo de secado, para lograr una misma humedad de equilibrio. En el análisis estadístico fue evidente que el cambio de flujo inicial del aire de secado, de 2, 3 y 4 m/s al flujo final de 1m/s, no presentó un efecto significativo en las curvas de deshidratación de las esferas de melón, ya que la reducción del flujo se realizó cuando el producto presentó un bajo contenido de humedad.

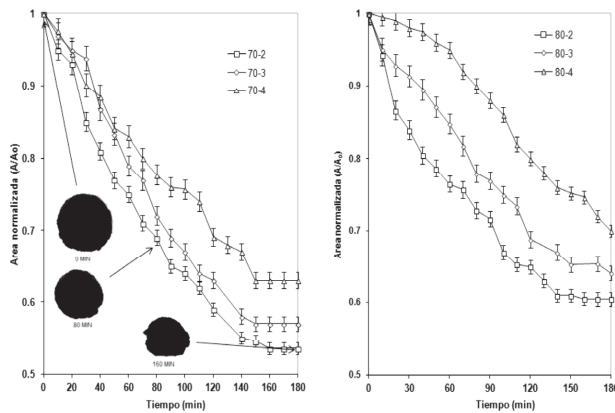
### Análisis cinético del encogimiento de las esferas de melón durante el secado por fluidización

Se construyó los gráficos del área proyectada normalizada de las esferas de melón vs. el tiempo de proceso (figura 3), en los que se observó una



**Figura 2.** Curvas de secado de esferas de melón en función del tiempo a 70°C (a), 80°C (b) y diferentes velocidades de flujo.

disminución del área normalizada como resultado del proceso de deshidratación.



**Figura 3.** Cambio del área proyectada normalizada ( $A/A_o$ ) en función del tiempo para esferas de melón deshidratadas por fluidización a temperatura de a)  $70^\circ\text{C}$ , b)  $80^\circ\text{C}$  y diferentes velocidades del aire de secado.

El efecto de las condiciones de temperatura-velocidad del aire de secado en la reducción del área proyectada normalizada de las esferas fue evidente. En la figura 3 se observa que el grado de contracción del área proyectada de las esferas fue mayor a  $70^\circ\text{C}$  que a  $80^\circ\text{C}$ , en todas las velocidades del aire estudiadas.

En los gráficos del área proyectada normalizada de las esferas de melón vs. el tiempo de proceso se observó una disminución irregular de este parámetro como resultado del proceso de deshidratación, consistente en formas escalonadas y que puede ser interpretada como la deformación del área de las esferas de melón durante su deshidratación. Al

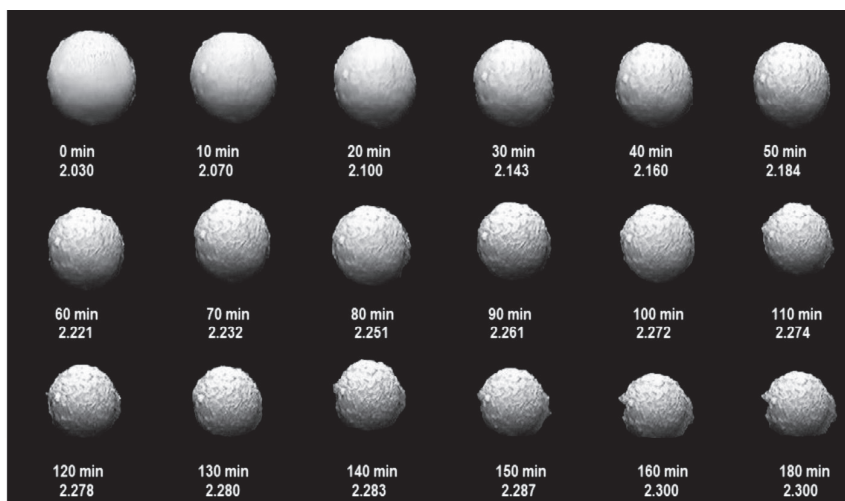
inicio el contorno y área proyectada de las muestras eran lisos, pero al perder humedad se produjeron deformaciones en el material original, lo que generó contornos y áreas irregulares en la imagen de la proyección de las esferas y con ello una disminución del área normalizada no lineal.

El análisis estadístico efectuado a los cambios del área normalizada de la esfera ( $A/A_o$ ) vs. Tiempo, a través del análisis de varianza (ANOVA), mostró que la temperatura y la velocidad del aire de secado ejercieron un efecto significativo en la reducción del área normalizada de las esferas durante los primeros 180 minutos de secado, para un intervalo de confianza del 95% ( $p < 0,05$ ), estableciendo que las condiciones de operación del proceso de secado afectan significativamente el proceso de reducción del área y con ello también el encogimiento del material biológico.

### Cambios morfométricos mediante el análisis fractal de textura sobre las imágenes de las esferas de melón

Durante el secado por fluidización se presentaron cambios severos en la superficie de la esfera como resultado del proceso de deshidratación. Los cambios en la topografía de la superficie de la esfera durante el secado reflejan el proceso de formación de relieves a partir de la superficie lisa de la esfera, los mismos que fueron caracterizados cuantitativamente por la dimensión fractal de la textura de la imagen de la muestra ( $DF_{\text{SDBC}}$ ).

La naturaleza fractal de la superficie de la esfera durante el proceso de secado fue observada en las imágenes presentadas en la figura 4.



**Figura 4.** Galería de imágenes de las esferas de melón durante el secado por fluidización a  $70^\circ\text{C}$  y  $2\text{m/s}$  y los valores de  $DF_{\text{SDBC}}$  correspondientes para cada imagen.

La superficie tiende a ser lisa al inicio del secado, ya que posee una dimensión fractal de la textura ( $DF_{SDBC}$ ) cercana a dos ( $2,02 \pm 0,01$ ). Sin embargo, conforme avanza el secado, la rugosidad de la superficie se incrementa hasta que la humedad es próxima a la humedad en equilibrio, punto en el cual la superficie de la esfera es altamente irregular y constante, presentando al final de la deshidratación valores de la  $DF_{SDBC}$  que oscilan entre 2,22 y 2,30, según las condiciones de secado empleadas. Este cambio en la textura superficial de las muestras durante el secado puede relacionarse con el encogimiento de la muestra ( $A/A_0$ ). El efecto de la temperatura y velocidad del aire de secado sobre la  $DF_{SDBC}$  se presenta en la figura 5.

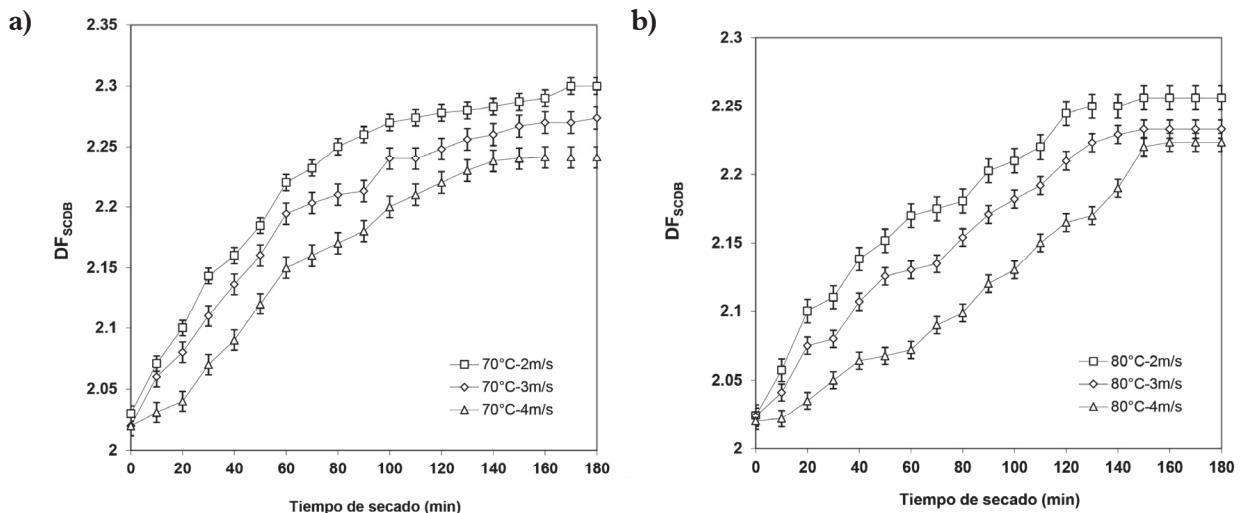
La influencia de la velocidad del aire de secado sobre la dimensión fractal de la superficie también fue evidente. A 4 m/s los valores son menores que los reportados para 2 y 3 m/s.

A una temperatura de 70°C y velocidad de aire de 2 y 3 m/s, los valores de la  $DF_{SDBC}$  fueron significativamente mayores que los valores correspondientes a las condiciones restantes, debido probablemente a la existencia de gradientes de los Contenidos de humedad por Zonas (CHZ) encontrados en las esferas a lo largo del secado, que consecuentemente provocan la deshidratación irregular de la muestra y con ello una mayor variación en la textura superfi-

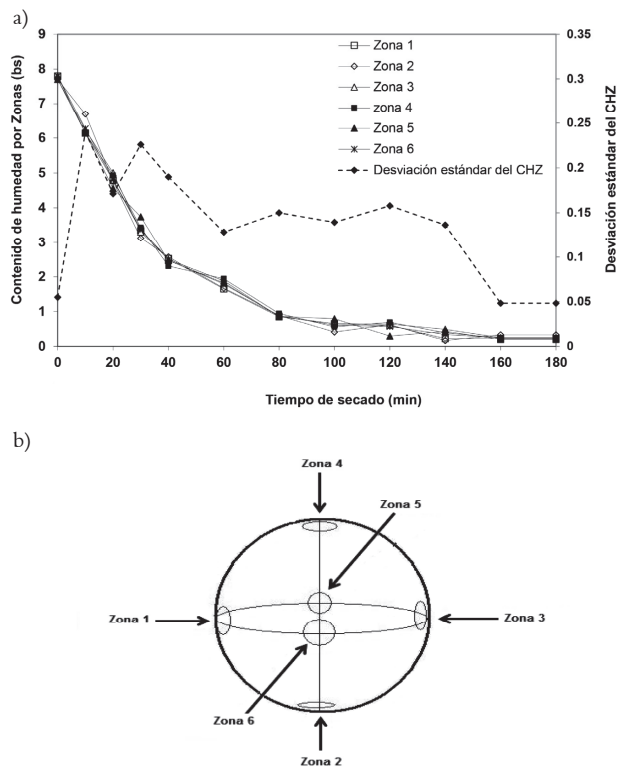
cial de la muestra, como se muestran los resultados experimentales de la  $DF_{SDBC}$  de las muestras deshidratadas (figura 5). Estas mismas condiciones de operación reportaron un mayor encogimiento de las esferas ( $A/A_0$ ) con mayor heterogeneidad y con valores de la  $DF_{SDBC}$  más altos.

### Contenido de humedad en diferentes zonas de la muestra

Se determinó el contenido de humedad en seis zonas diferentes de la superficie de la esfera (CHZ) para cada periodo de muestreo (figura 1c). En la figura 6 se presenta el gráfico correspondiente a la distribución del contenido de humedad por zonas (CHZ) de la esfera a lo largo del secado para los tratamientos de 80°C y 2 m/s. Se observó que el CHZ en la superficie de las esferas para cada periodo de muestreo fue diferente, generando con ello gradientes de humedad en su superficie durante la cinética de secado; no obstante, cuando la muestra presentó un contenido de humedad cercano al del equilibrio, la distribución de las CHZ en la superficie de la esfera se vio disminuida. Para tener un valor cuantitativo de la distribución del contenido de humedad registrado en la superficie de las esferas para cada tiempo de muestreo se obtuvo la desviación estándar de los CHZ para cada tiempo de muestreo vs. tiempo de secado (figura 6).



**Figura 5.** Cambio de la dimensión fractal ( $DF_{SDBC}$ ) en función del tiempo para esferas de melón deshidratadas a temperatura de a) 70°C, b) 80°C y diferentes velocidades del aire de secado.



**Figura 6.** a) Cambios de los contenidos de humedad por zonas (CHZ) de una esfera de melón deshidratada a 70°C y 2m; b) Diagrama para la determinación del contenido de humedad por zonas (CHZ) en las esferas de melón.

La desviación estándar de los CHZ es un parámetro estadístico que cuantifica la dispersión de los datos; por tanto, entre mayor es la dispersión del CHZ mayor es el gradiente registrado en las diferentes zonas de medición de las esferas.

La desviación estándar de los CHZ en las zonas de medición durante la deshidratación fue mayor para las condiciones a 70°C, en comparación con los tratamientos a 80°C, condiciones en las cuales se reportó valores menores de la  $DF_{SDBC}$  de la muestra a lo largo del secado.

## DISCUSIÓN

El análisis de las curvas de secado permitió observar un efecto significativo de las condiciones de operación (velocidad y temperatura del aire de secado) durante los primeros minutos del proceso. El efecto de pérdida de humedad durante el secado provocado por el incremento de la velocidad del aire ha sido reportado por diferentes autores; así, Zielinska *et al.*, 2007 (32), reportaron este comportamiento al secar cubos de zanahoria a velocidad de aire similares a las empleadas en este estudio.

Madhiyanon *et al.*, 2005 (34), trabajaron sobre la deshidratación de cereales, encontrando efectos similares a los reportados en este estudio; de igual forma, Murthy *et al.*, 2007 (35), reportaron un efecto similar de las condiciones de secado en su estudio sobre aonla deshidratada por fluidización. Referente al efecto de la temperatura del aire sobre la curva de secado (figura 2), se observó que al aumentar la temperatura del aire de secado el tiempo del proceso disminuyó para lograr una misma humedad de equilibrio. Resultados similares obtuvieron Lopes da Cunha *et al.*, 2006 (14), así como Hatamipour *et al.*, 2003 (11), durante el secado de mango y zanahoria a condiciones de operación similares.

Con respecto al cambio de velocidad del aire, tanto Zielinska *et al.*, 2007 (32), como Madhiyanon *et al.*, 2005 (34), reportaron la necesidad de disminuir el flujo de aire, una vez que el material a fluidizar presenta un bajo contenido de humedad; estos mismos autores establecieron que la velocidad del aire de secado no presentó un efecto significativo en comparación con el efecto de la temperatura del aire sobre la cinética de secado a bajos contenidos de humedad del producto alimenticio.

Los resultados experimentales de la reducción del área proyectada normalizada de las esferas durante su deshidratación por fluidización mostraron un efecto significativo de las condiciones del aire de secado (temperatura-velocidad) (figura 3), observando que el grado de contracción del área proyectada de las esferas fue mayor a 70°C que a 80°C a todas las velocidades del aire estudiadas. Este comportamiento fue atribuido al hecho de que a elevadas temperaturas se provocó el endurecimiento superficial de la esfera, generando mayor rigidez en la muestra y un subsecuente incremento de resistencia al cambio de área en su estructura. Se observó de manera general para todas las condiciones en estudio que el área proyectada final de la esfera se redujo 55- 60% del valor original, típico del proceso de secado en condiciones medianas-altas de temperatura. Fernando *et al.*, 2008 (36), también reportaron el fenómeno del endurecimiento de la superficie de cortes de papaya durante su deshidratación.

La determinación de los CHZ en las esferas permitió determinar la existencia de una distribución no homogénea de la humedad durante el secado, generando procesos de transporte de masa, además de cambios en las propiedades físicas como la conductividad térmica, densidad (37), formación

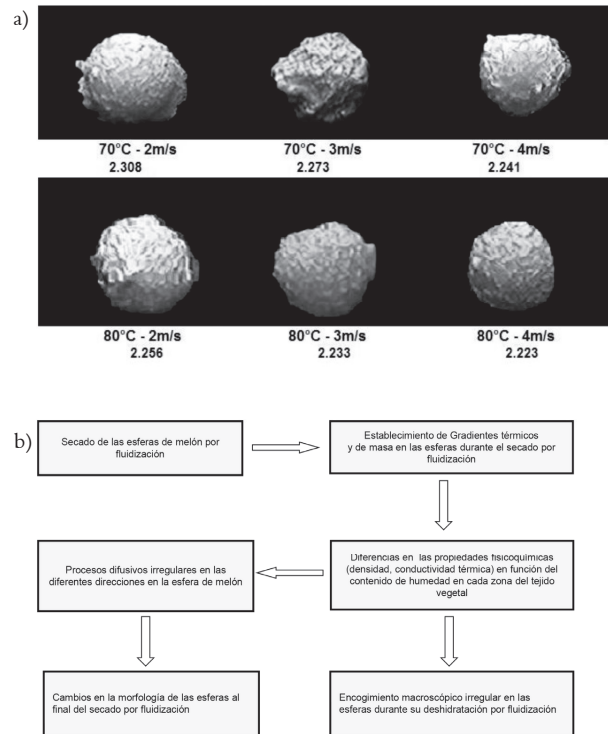


de esfuerzos mecánicos (38, 39) y la formación de superficies altamente irregulares de la esfera, mismos que fueron caracterizados por su  $DF_{SDBC}$ . Estos cambios en la superficie de las esferas se cree que son resultado de la pérdida de humedad no homogénea y de las condiciones de operación del secado por fluidización. A alta temperatura y alta velocidad del aire de secado (80°C y 4m/s) la formación de una costra delgada en la superficie de la esfera provocó que la superficie de la esfera de melón limitara el encogimiento y se observaran valores de la dimensión fractal de la muestra menores que los reportados a 70°C (figura 5). Santacruz-Vázquez *et al.*, 2008 (28), en su trabajo acerca de la deshidratación de placas de manzana describió que a alta temperatura y alta velocidad del aire de secado (80°C y 4m/s) el material al deshidratarse se compacta y presenta una menor deformación, debido al colapso de la pared celular de los tejidos. Alamilla *et al.*, 2005 (19), reportaron que durante la deshidratación de frutas con temperatura del aire de 60° y 70°C las estructuras celulares de las frutas, tales como vasos y pared celular, se conservan, provocando deformaciones definidas durante la deshidratación, fenómeno que coincidió con los resultados obtenidos en la  $DF_{SDBC}$  y el encogimiento A/Ao.

De acuerdo a lo reportado en la literatura sobre la dimensión fractal (40 - 42), se establece que a mayor valor numérico de la dimensión fractal de la superficie mayor es su irregularidad, interpretada también como rugosidad o cambios morfométricos en su superficie. El análisis de varianza (ANOVA) mostró que la velocidad y la temperatura del aire de secado ejercen un efecto significativo en el comportamiento de la  $DF_{SDBC}$ , para un intervalo de confianza del 95%. Los resultados permiten proponer que los cambios morfométricos de la superficie de las esferas durante el secado por fluidización presentan un comportamiento similar al modelo propuesto por Kopelman, 1988 (43), autor que propone que la aparición de islas en un plano puede ser de naturaleza fractal.

De los resultados experimentales obtenidos durante el secado por fluidización de las esferas se estableció que conforme progresa el proceso de secado aparecen gradientes de concentración de humedad sobre la superficie de las esferas, causados por una transferencia de masa no homogénea, haciendo que la humedad no se difunda entre los sólidos con un mismo frente, deshidratando heterogéneamente a la esfera y con ello generando cambios en su mor-

fología como formación de superficies altamente irregulares y aumento de la dimensión fractal de su textura. La distribución del CHZ condujo al desarrollo de fenómenos que se proponen en el siguiente orden (figura 7).



**Figura 7.** a) Imágenes de las esferas de melón con contenido de humedad final a diferentes condiciones de secado; b) Diagrama de la secuencia de fenómenos relacionados con el encogimiento y cambios en la textura de la superficie de las esferas durante su deshidratación por fluidización.

### Limitaciones

Los resultados obtenidos de la deshidratación por fluidización de esferas de melón variedad cantaloupe (*Cucumis melo cantalupensis*) muestran la posibilidad de considerar al tejido de este fruto como una alternativa para modelar fenómenos de transferencia de masa y calor como es el secado por fluidización.

Con respecto a la aplicación del análisis fractal y análisis de imágenes, los valores reportados para la  $DF_{SDBC}$  son cercanos entre ellos; sin embargo, esas pequeñas diferencias representan cambios significativos en la rugosidad de las imágenes de las esferas de melón. Pedreschi *et al.*, 2000 (42) y Kopelman, 1988 (43), entre otros autores, han reportado que pequeñas diferencias en los valores

de la dimensión fractal, que describen el comportamiento de fenómenos no lineales, representan cambios significativos en el comportamiento de los mismos, situación que se presentó para los valores de la  $DF_{SDBC}$ .

## CONCLUSIONES

En las cinéticas de secado y cinéticas del encojimiento (A/Ao) de las esferas de melón se observó que las condiciones de operación de temperatura y velocidad del aire de secado tienen un efecto importante sobre la pérdida de humedad.

La distribución no homogénea de la humedad fue encontrada mediante la determinación de los contenidos de humedad en diferentes zonas de las esferas (CHZ), fenómeno que se hizo más evidente a condiciones de secado de 70°C y 2 m/s.

Una de las consecuencias de la deshidratación no homogénea fue la irregularidad en los procesos difusivos sobre la superficie de la esfera, así como la formación de superficies irregulares, descrita mediante la dimensión fractal ( $DF_{SDBC}$ ). Los valores de la  $DF_{SDBC}$  para las superficies de esferas al final del secado por fluidización oscilaron entre 1,04 – 1,06.

Valores altos de dimensión fractal se asociaron a superficies con mayor irregularidad y condiciones de secado de 70°C y 2 m/s. La utilidad de los resultados del análisis fractal y el análisis de imágenes de la superficie de las esferas, para determinar la deformación de su superficie, permite una mejor comprensión de los fenómenos de transporte durante la deshidratación de productos biológicos con alto contenido de humedad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Lopez MBE, Carvajal De PLM, Millan CLJ. Stablishing of the conditions of the blend of pulp with banana (*Musa Paradisiacal L.*) to submit spray drying. *Vitae*. 2009 Nov 23; 16 (3): 287-296.
- Ayhan Z, Chism GW. The shelf-life of minimally processed fresh-cut melons. *J Food Quality*. 1998 Ene; 21 (1): 29-40.
- Bai J, Saftner RA, Watada AE. Characteristics of fresh-cut honeydew (*Cucumis melo L.*) available to processor in winter and summer and its quality maintenance by modified atmosphere packaging. *Postharvest Biol Tec*. 2003 Jun; 28 (3): 349-359.
- Bai JH, Saftner RA, Watada AE, Lee YS. Modified atmosphere maintains quality of fresh-cut cantaloupe (*Cucumis melo L.*). *J Food Sci*. 2001 Oct; 66 (8): 1207-1211.
- Aguayo E, Allende A, Artés F. Keeping quality and safety of minimally fresh processed melon. *Eur Food Res Technol*. 2003 Mar 8; 216 (6): 494-499.
- Aguayo E, Escalona VH, Artés FA. Metabolic Behavior and Quality Changes of Whole and Fresh Processed Melon. *J Food Sci*. 2004 May; 69 (4): 148-155.
- Giraldo GG, Duque CAL, García WCL. Combining Drying Methods For Candy Mango (*Mangifera Indica*) Var. *Vitae*. 2005 Jul; 12 (2): 5-12.
- Escalona VH, Verlinden BE, Geysen S, Nicolai BM. Changes in respiration of fresh-cut butterhead lettuce under controlled atmospheres using low and superatmospheric oxygen conditions with different carbon dioxide levels. *Postharvest Biol Tec*. 2006 Ene; 39 (1): 48-55.
- Gorny JR, Hess-Pierce B, Cifuentes RA, Kader AA. Quality changes in fresh-cut pear slices as affected by controlled atmospheres and chemical preservatives. *Postharvest Biol Tec*. 2002 Abr; 24 (3): 271-278.
- Almeida MM, Silva OS, Alsina OLS. Fluid-Dynamic Study of Deformable Materials in Spouted-Bed Dryer. *Dry Technol*. 2006 Abr; 24 (4): 499-508.
- Hatamipour MS, Mowla D. Experimental and Theoretical Investigation of Drying of Carrots in a Fluidized Bed with Energy Carrier. *Dry Technol*. 2003 Ene; 21 (1): 83-101.
- Mayor L, Moreira R, Sereno AM. Shrinkage, density, porosity and shape changes during dehydration of pumpkin (*Cucurbita pepo L.*) fruits. *J Food Eng*. 2011 Mar; 103 (1): 29-37.
- Sánchez-Ramírez J, Anaya-Sosa I, Vizcarra-Mendoza M G, Gutiérrez López G, Santiago-Pineda T. Estudio de la Hidrodinámica del Café Tostado (*Coffea arabica L.*) en Lecho Fluidizado. *Rev Mex Ing Quim*. 2007 Ago; 6 (2): 185-192.
- Lopes da Cunha R, García de la Cruz A, Menegalli FC. Effect of operating conditions on the quality of mango pulp dried in a spout fluidized bed. *Dry Technol*. 2006 Abr; 24 (4): 423-432.
- Markowski M, Sobieski W, Konopka I, Tałjska M, Białobrzewski I. Drying Characteristics of Barley Grain Dried in a Spouted-Bed and Combined IR-Convection Dryers. *Dry Technol*. 2007 Dic; 25 (10): 1621-1632.
- Vázquez-Chávez L, Vizcarra-Mendoza M. Secado por Lecho Fluidizado del trigo y su calidad. *Rev Mex Ing Quim*. 2008 Ago; 7 (2): 131-137.
- Stanislawski J. Drying of diced carrot in a combined microwave-fluidized bed dryer. *Dry Technol*. 2005 Ago; 23 (8): 1711-1721.
- Chanona JJ, Alamilla BL, Farrera RF, Quevedo R, Aguilera JM, Gutiérrez LG. Description of the Convective Air-Drying of a Food Model by Means of the Fractal Theory. *Food Sci Technol Int*. 2003 Jun; 9 (3): 207-211.
- Alamilla BL, Chanona PJJ, Jiménez AAR, Gutiérrez LGF. Description of morphological changes of particles along spray drying. *J Food Eng*. 2005 Mar; 67 (1): 179-184.
- Santacruz-Vázquez C, Santacruz-Vázquez V, Chanona-Perez J, Jaramillo-Flores M E, Welti-Chanes J, Gutierrez-Lopez GF. Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering, 2<sup>nd</sup> ed. Boca Raton, Florida U.S.A: CRC Press; 2010 Oct 21. Fractal Theory Applied to Food Science; p 1-12.
- Panyawong S, Devahastin S. Determination of deformation of a food product undergoing different drying methods and conditions via evolution of a shape factor. *J Food Eng*. 2007 Ene; 78 (1): 151-161.
- Quevedo R, Mendoza F, Aguilera JM, Chanona PJJ, Gutiérrez-López G. Determination of senescent spotting in banana (*Musa cavendish*) using fractal texture Fourier image. *J Food Eng*. 2008 Feb; 84 (4): 509-515.
- Valous NA, Mendoza F, Sun D, Allen P. Texture appearance characterization of pre-sliced pork ham images using fractal metrics: Fourier analysis dimension and lacunarity. *Food Res Int*. 2009 Abril; 42 (3): 353-362.
- Karim M, Hawlader MNA. Drying characteristics of banana: theoretical modelling and experimental validation. *J Food Eng*. 2005 Sep. 70 (1): 35-45.
- Dávila E, Parés D. Structure of heat-induced plasma protein gels studied by fractal and lacunarity analysis. *Food Hydrocolloid*. 2007 Mar; 21 (2): 147-153.

26. Valous NA, Drakakis K, Sun DW. Detecting fractal power-law long-range dependence in pre-sliced cooked pork ham surface intensity patterns using Detrended Fluctuation Analysis. *Meat Sci.* 2010 Oct; 86 (2): 289-297.
27. Velázquez-Camilo O, Bolaños-Reynoso E, Rodríguez E, Álvarez-Ramírez J. Characterization of cane sugar crystallization using image fractal analysis. *J Food Eng.* 2010 Sep; 100 (1): 77-84.
28. Santacruz-Vázquez V, Santacruz-Vázquez C, Welte-Chanes J, Farrera-Rebollo RR, Alamilla-Beltrán L, Chanona-Pérez J, et al. 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 Abr; 7 (1): 55-63.
29. Quevedo R, Jaramillo M, Díaz O, Pedreschi F, Aguilera JM. Quantification of enzymatic browning in apple slices applying the fractal texture Fourier image. *J Food Eng.* 2009 May 10; 95 (2): 285-290.
30. Quevedo R, López GC, Aguilera JM, Cadoche L. Description of food surfaces and microstructural changes using fractal image texture analysis. *J Food Eng.* 2002 Ago; 53 (4): 361-371.
31. Kerdpiboon S, Kerr WL, Devahastin S. Neural network prediction of physical property changes of dried carrot as a function of fractal dimension and moisture content. *Food Res Int.* 2006 Dic; 39 (10): 1110-1118.
32. Zielinska M, Markowski M. Drying Behavior of Carrots Dried in a Spout-Fluidized Bed Dryer. *Dry Technol.* 2007 Ene; 25 (1): 261-270.
33. A.O.A.C. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists International, 16<sup>th</sup> ed. Gaithersburg, MD: A.O.A. C; 1995. p 1103.
34. Madhiyanon T, Soponronnarit S. High Temperature Spouted Bed Paddy Drying with Varied Downcomer Air Flows and Moisture Contents: Effects on Drying Kinetics, Critical Moisture Content, and Milling Quality. *Dry Technol.* 2005 Mar; 23 (3): 473-495.
35. Murthy ZVP, Joshi D. Fluidized Bed Drying of Aonla (*Emblica officinalis*). *Dry Technol.* 2007 May; 25 (5): 883-889.
36. Fernando WJN, Ahmad AL, Abd Shukor SR, Lok YH. A model for constant temperature drying rates of case hardened slices of papaya and garlic. *J Food Eng.* 2008 Sep; 88(2): 229-238.
37. Simal S, Mulet A, Catalá PJ, Cañellas J, Roselló C. Moving Boundary Model For Simulating Moisture Movement In Grapes. *J Food Sci.* 1996 Enc; 61 (1): 157-160.
38. Mihoubi D, Bellagi A. Drying-Induced Stresses during Convective and Combined Microwave and Convective Drying of Saturated Porous Media. *Dry Technol.* 2009 Ago; 27 (7): 851-856.
39. Madiouli J, Lecomte D, Nganya T, Chavez J, Sghaier J, Sammouda H. A Method for Determination of Porosity Change from Shrinkage Curves of Deformable Materials. *Dry Technol.* 2007 Abr; 25 (4): 621-628.
40. Barleita BJ, Barbosa-Cáovas GV. Fractal Analysis to Characterize Ruggedness Changes in Tapped Agglomerated Food Powders. *J Food Sci.* 1993 Sep; 58 (5): 1030-1035.
41. Kaye B H. Applied fractal geometry and powder technology. *Chaos Soliton Fract.* 1995; 6 (1): 245-253.
42. Pedreschi F, Aguilera JM, Brown C. Characterization of Food Surfaces using scale-sensitive fractal analysis. *J Food Process Eng.* 2000 Jun; 23 (2): 127-143.
43. Koppelman R. Fractal reaction kinetics. *Science.* 1988 Set 23; 241 (4873): 1620-1626.