PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

CALIDAD DE SNACKS DE ZANAHORIA OBTENIDOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE VACÍO A MÉTODOS TRADICIONALES DE DESHIDRATACIÓN

CARLA FRANCISCA MARZULLO VARELA

Tesis para optar al grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
PEDRO BOUCHON A.

Santiago de Chile, (Enero, 2010)

© 2010, C. F. Marzullo

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

CALIDAD DE SNACKS DE ZANAHORIA OBTENIDOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE VACÍO A MÉTODOS TRADICIONALES DE DESHIDRATACIÓN

CARLA FRANCISCA MARZULLO VARELA

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

PEDRO BOUCHON

FRANCO PEDRESCHI

PAZ ROBERT

MARCELO GUARINI

Para completar las exigencias del grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, (Enero, 2010)

A Padres, hermanos y amigos, que me apoyaron mucho

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis profesores por su apoyo y enseñanza. A mi profesor supervisor, Pedro Bouchon, le agradezco enormemente el apoyo que me entregó durante el desarrollo de este trabajo, motivándome y guiándome en todo momento con sabiduría, confianza y paciencia. A la Dra. Paz Robert y su equipo de trabajo (Departamento de Ciencia de Alimentos y Tecnología Química, Universidad de Chile), por la ayuda con el análisis de carotenoides.

A su vez al Dr. Héctor Jorquera por su asistencia con la modelación computacional de la cinética de secado y al profesor PhD José Miguel Aguilera por la prestación del equipo de medición de textura.

A los señores Ricardo Cayupe y Ulises Lazo, quienes me ayudaron siempre de forma desinteresada en el laboratorio, les expreso mis sinceros agradecimientos.

A mis compañeras Verónica Dueik, Mariel Farfán y Carolina Moreno y compañeros Juan Pablo Vivanco y Pablo Cortés, les doy las gracias por su solidaridad y su permanente disposición a compartir conocimientos.

Finalmente, agradezco a mis padres, a mi hermano y a Alejandro, quienes me apoyaron incondicionalmente, entregándome mucho cariño, fuerza y confianza.

INDICE GENERAL

Pág.

DEDICATORIA ii

AGRADECIMIENTOS iii

INDICE DE TABLAS vi

INDICE DE FIGURAS viii

RESUMEN xii

ABSTRACT xiii

1. INTRODUCCIÓN 1
    1.1. Descripción del Proceso de Secado Convectivo 2
    1.2. Descripción del Proceso de Fritura 8
    1.3. Atributos de Calidad y Temperatura 9
    1.4. Aplicación de Vacío a Métodos de Deshidratación 13

2. HIPÓTESIS 15

3. OBJETIVOS 16

4. MATERIALES, PROCEDIMIENTOS Y MÉTODOS 17
    4.1. Proceso de Secado 19
        4.1.1. Secado convectivo 20
        4.1.2. Secado a vacío 20
    4.2. Proceso de Fritura 21
        4.2.1. Fritura atmosférica 23
        4.2.2. Fritura a vacío 24
    4.3. Métodos y Análisis 24
        4.3.1. Métodos instrumentales 24

4.3.2. Modelación matemática del proceso de secado convectivo 30
4.3.3. Análisis sensorial 35
4.3.4. Análisis estadístico 36

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 37
5.1. Estudio de Procesos de Secado 37
5.1.1. Secado convectivo 37
5.1.2. Secado a vacío 52
5.2. Estudio de Atributos de Calidad de Hojuelas de Zanahorias Deshidratadas Mediante Fritura y Secado 53
5.2.1. Evaluación instrumental 54
5.2.2. Evaluación sensorial 58

6. CONCLUSIONES 65

7. PERSPECTIVAS FUTURAS 67

BIBLIOGRAFIA 68

A N E X O S 76

ANEXO A: EQUIPOS 77

ANEXO B: CÓDIGO COMPUTACIONAL 81

ANEXO C: CROMATOGRAMAS 84

ANEXO D: FOTOGRAFÍAS HOJUELAS DE ZANAHORIA 86

ANEXO E: ANÁLISIS SENSORIAL 89

ANEXO F: ANÁLISIS ESTADÍSTICO 92

INDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla V-1: Distintos modelos matemáticos utilizados para encontrar una relación entre la difusividad efectiva y el contenido de humedad..... 40

Tabla V-2: Parámetros de las difusividades efectivas para discos de zanahoria deshidratados a 60, 80 y 100ºC y error cuadrático medio (ECM) de la optimización realizada con software computacional..... 41

Tabla V-3: Definición de tratamientos en dos temperaturas de secado y nomenclatura 46

Tabla V-4: Parámetros de calidad en snacks de zanahoria deshidratados mediante secado convectivo en una y dos etapas de temperaturas de secado 50

Tabla V-5: Pérdida de agua en 120 minutos para el secado a vacío (49 mmHg) para distintas temperaturas 53

Tabla V-6: Parámetros de calidad determinados instrumentalmente de hojuelas de zanahoria obtenidas mediante distintas técnicas de deshidratación..... 55

Tabla V-7: Atributos de calidad determinados mediante evaluación sensorial a chips de zanahoria deshidratadas mediante distintas técnicas de deshidratación..... 60

Tabla V-8: Correlación entre aceptabilidad general y atributos de calidad determinados mediante evaluación sensorial a hojuelas de zanahoria deshidratadas mediante distintas técnicas de deshidratación 64

Tabla E-1: Descriptores desarrollados por el panel sensorial (Centro de Aromas, DICTUC) 89

Tabla E-2: Definición de escalas por atributo (Centro de Aromas, DICTUC)..... 90

INDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1-1: Diagrama genérico de los posibles mecanismos de transferencia de calor y masa durante el secado (adaptado de Geankoplis, 1998) 3

Figura 1-2: Humedades de equilibrio para algunos materiales alimentarios a 298K (25 ºC) donde: 1) macarrones, 2) harina, 3) pan, 4) galletas y 5) albúminas de huevo (adaptado de National Research Council, 1929) 4

Figura 1-3: Modelo conceptual de difusión líquida en una placa plana con resistencia superficial despreciable. Las líneas punteadas representan la evolución de la concentración de humedad en el tiempo (t) (adaptado de Geankoplis, 1998)..... 7

Figura 1-4: Diagrama genérico de los posibles mecanismos de transferencia de calor y masa durante la fritura (adaptado de Dobraszczyk et al., 2006)..... 9

Figura 1-5: Influencia de la actividad de agua en la tasa relativa de la reacción de Maillard, en que se resalta la zona del peak de esta reacción (adaptado de Labuza, 1971)..... 11

Figura 1-6: Cambios físicos, químicos y estructurales que ocurren en fritura por inmersión (adaptado de Miranda y Aguilera, 2006) 13

Figura 4-1: Diagrama esquemático de la metodología experimental 17

Figura 4-2: Extracción y corte estandarizado de rodajas de zanahoria..... 18

Figura 4-3: Montaje de Secado a Vacío..... 21

Figura 4-4: Aparataje del equipo de fritura (cortesía de Dueik y Bouchon, 2009)..... 22

Figura 4-5: Montaje de la adquisición, captura y obtención de parámetros de color L*a*b* (Adaptado de Pedreschi et al., 2006) 26

Figura 4-6: Espacio de color CIElab (Hoffmann, 2009)..... 28

Figura 4-7: Esquema del test de apoyo en tres puntos..... 30

Figura 4-8: Esquema del arreglo de nodos utilizados para la modelación del problema de difusión con difusividad variable..... 31

Figura 4-9: Determinación de Deff según el método de las pendientes 33

Figura 4-10: Diagrama de flujo para la determinación de Deff en función del contenido de humedad y de la temperatura de secado..... 35

Figura 5-1: Isoterma de desorción a 20ºC para zanahorias deshidratadas. Los puntos naranjas representan los puntos experimentales, mientras que la línea azul los datos de la literatura (Eichner et al., 1985)..... 38

Figura 5-2: Evolución del contenido de agua en hojuelas de zanahoria deshidratadas por secado a 60, 80 y 100ºC. La línea segmentada representa el contenido de humedad final que cumple con el requisito impuesto..... 39

Figura 5-3: Ajuste lineal para los parámetros a y b, en función de la temperatura de secado 43

Figura 5-4: Cinética del contenido de agua en hojuelas de zanahoria deshidratadas por secado convectivo a 60, 80 y 100ºC, obtenida por medio de la simulación computacional 44

Figura 5-5: Determinación de procesos utilizando dos temperaturas de secado 46

Figura 5-6: Evolución del contenido de agua en chips de zanahoria deshidratadas utilizando dos temperaturas de secado, combinando una temperatura de 100ºC seguida de 80ºC 47

Figura 5-7: Evolución del contenido de agua en chips de zanahoria deshidratadas utilizando dos temperaturas de secado, combinando una temperatura de 80ºC seguida de 100ºC 48

Figura 5-8: Fotografías de discos de zanahorias deshidratadas mediante distintas técnicas de deshidratación 57

Figura 5-9: Perfiles sensoriales de hojuelas de zanahoria deshidratadas mediante secado convectivo, secado a vacío, fritura atmosférica y fritura a vacío 59

Figura 5-8: Aceptabilidad general de muestras deshidratas mediante distintos métodos de deshidratación, utilizando una escala de 9 puntos..... 63

Figura A-1: Instrumentos para la extracción de muestras de zanahorias estandarizadas 77

Figura A-2: Montaje del sistema de captura de imágenes 77

Figura A-3: Horno para secado convectivo 78

Figura A-4: Horno a vacío 78

Figura A-5: Canasta del equipo fritura 79

Figura A-6: HPLC utilizado para la detección de carotenos (modelo L-6200A, Merck-Hitachi, Alemania)..... 79

Figura A-7: Centrífuga utilizada para el análisis de los compuestos de la reacción de Maillard 80

Figura A-8: Espectrofotómetro UV–VIS utilizado para la detección de la concentración de melanoidinas (modelo T70, Baush & Lomb, EE.UU.) 80

Figura B-1: Representación de la implemetación del algoritmo de búsqueda y estimación de parámetros óptimos para el problema de difusión..... 81

Figura C-1: Cromatograma para muestra de zanahoria fresca..... 84

Figura C-2: Cromatograma para muestra de zanahoria deshidratadas mediante secado a vacío (60ºC) 85

Figura D-1: Fotografía hojuela de zanahoria fresca..... 86

Figura D-2: Fotografías hojuelas de zanahoria deshidratadas mediante secado convectivo hasta una humedad de 0,06 (b.s.) 87

Figura D-3: Fotografías hojuelas de zanahoria deshidratadas mediante secado a vacío hasta una humedad de 0,06 (b.s.) 88

Figura D-4: Fotografías hojuelas de zanahoria deshidratadas mediante fritura atmosférica y a vacío hasta una humedad de 0,06 (b.s.) 88

Figura E-1: Presentación de las muestras deshidratadas..... 91

Figura E-2: Disposición de muestras y formulario evaluación sensorial..... 91

RESUMEN

En los últimos años, el mercado de snacks ha ido creciendo fuertemente, con un aumento del consumo de snacks saludables. Sin embargo, las técnicas tradicionales que se utilizan para la deshidratación de alimentos (secado y fritura) pueden producir pérdidas en los atributos de calidad, por efecto de las altas temperaturas. La aplicación de vacío a estos procesos puede ser beneficioso en este aspecto, pues permite reducir las temperaturas de operación. La relación entre estos métodos tradicionales de deshidratación, sus condiciones de operación y la calidad de los alimentos aún no ha sido claramente establecida. Esta tesis estudia cómo la incorporación de vacío a secado y fritura permite reducir la pérdida de los atributos de calidad en snacks de zanahoria, estudiando el efecto de la temperatura (60, 80, 100 y 160ºC) y vacío (presión de 49 mmHg). Con este fin, se analizaron la pérdida color, la concentración de compuestos pardos de la reacción de Maillard (melanoidinas), la retención de *trans* β-caroteno, la textura y se evaluó sensorialmente las hojuelas de zanahoria obtenidas por los distintos métodos de deshidratación. La fritura a vacío, permitió reducir significativamente el pardeamiento no enzimático (79%), la degradación de *trans* β-caroteno (50%) y la pérdida de color natural de las zanahorias (20%), sin alterar la textura. Sin embargo, en el caso del secado, aunque la incorporación de vacío presentó ventajas importantes en los atributos de calidad nutricionales, perjudicó la textura de las hojuelas, aumentando la fuerza de fractura al doble. El análisis sensorial arrojó resultados muy similares a los entregados por la evaluación instrumental, presentándose una buena correlación de los atributos de calidad determinados por ambos enfoques. Este trabajo sugiere que entre las distintas alternativas estudiadas, el proceso de secado convectivo es una buena alternativa para desarrollar snacks de mejor calidad y más saludables, pues produjo hojuelas de zanahoria con características de calidad nutricional y organolépticas ventajosas.

Palabras Claves: secado convectivo, secado a vacío, fritura, fritura a vacío, atributos de calidad, melanoidinas, *trans* β-caroteno, color, textura, análisis sensorial

ABSTRACT

In recent years, the market of snacks has grown strongly, with an increase in healthy snack consumption. Nevertheless, the traditional techniques used for food dehydration (drying and frying) may produce losses in quality attributes, due to the high temperatures involved. The application of vacuum conditions to these processes may be beneficial in this respect, for it allows to reduce operating temperatures. The relationship between these traditional dehydration methods, their operating conditions, and food quality has not yet been clearly established. This thesis studies how the incorporation of vacuum to drying and frying allows a reduction in the quality loss attributes of carrot snacks, studying the effect of temperature (60, 80, 100 and 160ºC) and vacuum (49 mmHg pressure). To this end, color loss, Maillard reaction compound concentration, *trans* β-carotene retention, texture, and sensory qualities were analyzed for the carrot chips obtained by the different dehydration methods. Vacuum frying resulted in a significant reduction of non-enzymatic browning (79%), degradation of *trans* β-carotene (50%) and color loss (20%). However, drying under vacuum conditions presented major advantages in nutritional quality attributes, tarnished the chips´ texture, doubling the fracture force. Sensory analysis showed similar results to those obtained by instrumental analysis, exhibiting a good correlation in quality attributes determined by both methods. This work suggests that among the different dehydrating methods analyzed, convective drying is a good alternative for developing better quality and healthier snacks, since it produced carrot chips which were superior nutritionally and organoleptically.

Keywords: convective drying, vacuum drying, frying, vacuum frying, quality attributes, melanoidins, *trans* β-carotene, color, texture, sensory analysis

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el mercado de los snacks ha crecido enormemente. La industria americana de snacks genera US$26 miles de millones en ventas anuales y está creciendo a una tasa anual de 4,5%. Sin embargo, recientemente se ha observado una marcada tendencia al aumento del consumo de snacks saludables frente a los comunes, (crecimiento de 6,6% versus 1,3% en el año 2007), siendo los principales atributos buscados por el consumidor: ausencia de aceites *trans*, bajo contenido de calorías, grasas, colesterol, azúcar y sodio, y presencia de vitaminas y minerales (Gatty, 2008). Una alimentación saludable incluye el consumo de frutas y verduras, porque contienen vitaminas, minerales y compuestos químicos necesarios para proteger nuestra salud y prevenir ciertas enfermedades.

Las zanahorias destacan en este aspecto, en cuanto contienen un elevado contenido de carotenoides en comparación a otras especies (USDA-NCC, 1998). Los carotenoides, además de ser pigmentos liposolubles ampliamente distribuidos en la naturaleza, responsables del color rojo, naranjo y amarillo de frutas y verduras, son beneficiosos para la salud, pues disminuyen el riesgo de varias enfermedades como ciertos tipos de cáncer, enfermedades cardiovasculares, oculares y daños al hígado (Tapiero et al., 2004). Los efectos positivos de los carotenoides se deben al rol antioxidante y precursor de la vitamina A (Handelman, 2001), siendo el *trans* β-caroteno el carotenoide más importante, pues se le atribuye un 100% de capacidad de conversión a esta vitamina (Rodríguez-Amaya, 2001).

La elaboración de snacks de frutas o verduras puede servir como vehículo de nutrientes importantes para la salud. En este sentido, Sulaeman et al. (2002) evaluaron la aceptabilidad del consumidor de chips de zanahoria producidos por fritura por inmersión, concluyendo que el producto era organolépticamente aceptable, independientemente del país de origen y género de los panelistas. En la misma línea, Almeida-Domínguez et al. (1990), estudiaron la aceptabilidad de snacks fritos

formulados a base de maíz fortificados con proteínas, para satisfacer los requerimientos de la FAO/OMS para la lisina y aminoácidos azufrados. Los autores encontraron que no había diferencias significativas en el olor, flavor, textura y aceptabilidad en comparación con la preparación "control", concluyendo que los snacks nutritivos pueden ser una buena alternativa a los tradicionales.

Entre las distintas técnicas de deshidratación, el secado y la fritura se utilizan tradicionalmente en la industria alimentaria, ya sea para desarrollar texturas, sabores y aromas únicos, como para aumentar la vida útil de los alimentos. Los snacks a base de zanahoria pueden ser elaborados mediante estas técnicas, para incluir nutrientes importantes en la dieta. Sin embargo, es necesario considerar el efecto de las altas temperaturas de los procesos de deshidratación en los atributos de calidad, pues se pueden desarrollar reacciones de deterioro que pueden inducir a pérdida nutricional y organoléptica (Heldman y Lund, 2007). En este sentido, la aplicación de vacío a estos procesos puede ser beneficiosa, pues permite reducir las temperaturas de operación. A pesar de que la incorporación de vacío permite una positiva reducción en la temperatura de proceso, es importante señalar que existen temperaturas mínimas para asegurar que ocurran los cambios microestructurales necesarios para desarrollar una textura adecuada.

En este capítulo se presenta el estado del arte del secado y fritura, como métodos tradicionales de deshidratación de alimentos. Se revisan las características generales de ambos procesos, así como los inconvenientes atribuidos a las altas temperaturas y, finalmente, la aplicación de vacío como alternativa para el desarrollo de snacks de mejor calidad. Adicionalmente, se estudian los fundamentos teóricos del secado convectivo, de modo de poder modelar la pérdida de agua con un modelo fundamental.

1.1. Descripción del Proceso de Secado Convectivo

La técnica de secado convectivo (por aire caliente), como método de deshidratación de alimentos, es una de las más antiguas que existe para la

preservación de alimentos y es altamente utilizada en la industria alimentaria. En este proceso el aire entrega el calor sensible y latente de vaporización del agua y luego actúa como medio de transporte del vapor generado.

El secado convectivo es una operación unitaria de transferencia simultánea de calor y masa (Figura 1-1). El calor debe transferirse desde una fuente calórica (con una temperatura T_a y humedad relativa H_a) a la superficie del alimento (T_s, H_s), y desde la superficie hasta el interior de éste. Como resultado el alimento aumenta su temperatura y el contenido de agua presente en él disminuye. Dependiendo de las condiciones del secado, el agua puede ser transportada dentro del alimento en estado líquido o gaseoso.

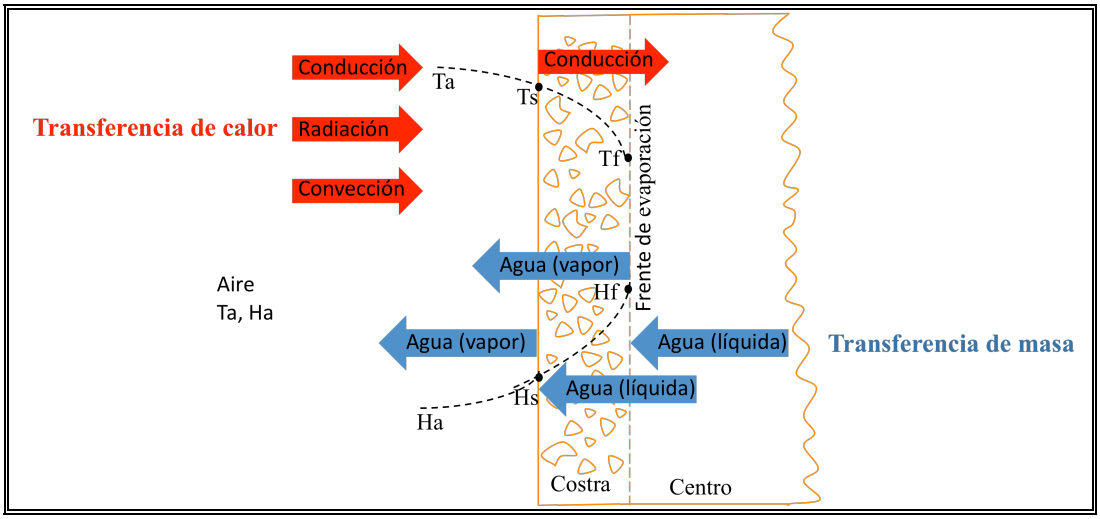


Figura 1-1: Diagrama genérico de los posibles mecanismos de transferencia de calor y masa durante el secado (adaptado de Geankoplis, 1998)

La humedad final del alimento está restringida por la temperatura y humedad de secado (que se consideran constantes por el gran volumen de aire), así como por la naturaleza del alimento, que determinan la humedad de equilibrio de éste. Cuando el aire está en contacto con un alimento, en algún momento se alcanzará un equilibrio entre el agua

presente en él y la del aire. En estas condiciones la actividad de agua (a_w) del alimento se equilibra con la humedad relativa del aire (HRE = 100 a_w) en contacto con él a una temperatura determinada. Este punto de equilibrio representa la máxima cantidad de humedad que se puede retirar del alimento. La relación de equilibrio entre el contenido de humedad del alimento con la humedad relativa del ambiente a una temperatura determinada, se determina experimentalmente y se representa en la isoterma de sorción. Específicamente, si el contenido de humedad disminuye (secado) se denominará isoterma de desorción, y si aumenta (hidratación), de adsorción (Heldman y Lund, 2007). En la Figura 1-2 se presentan algunas humedades de equilibrio para distintos alimentos, en que se puede observar que distintos materiales a una misma humedad tienen distinta actividad de agua, porque según la estructura del alimento varía qué tan disponible está el agua (Geankoplis, 1998).

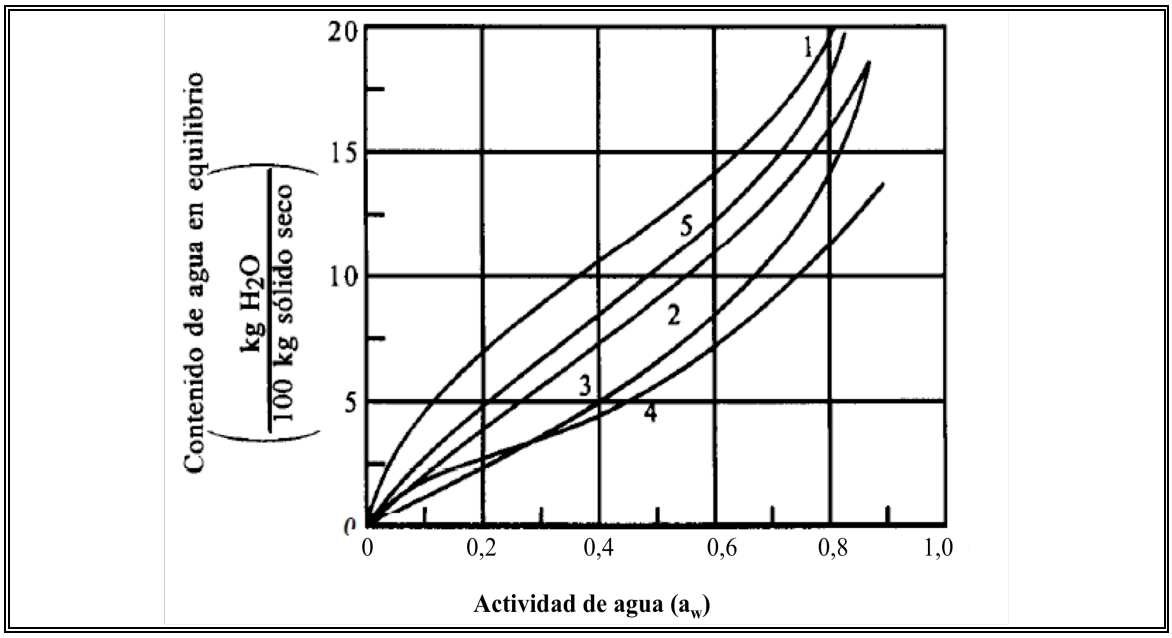


Figura 1-2: Humedades de equilibrio para algunos materiales alimentarios a 298K (25 ºC) donde: 1) macarrones, 2) harina, 3) pan, 4) galletas y 5) albúminas de huevo (adaptado de National Research Council, 1929)

Así como la humedad de equilibrio de los alimentos, la velocidad a la que ocurre el secado debe ser también determinada experimentalmente en condiciones de operación constantes (velocidad, humedad, temperatura y dirección del aire). Aunque las curvas de secado pueden variar según el material y condiciones de secado, es posible observar períodos de velocidad constante y decreciente. Inicialmente, el alimento tiene una alta humedad y la superficie permanece húmeda (película continua de agua), pues la velocidad de desplazamiento del agua dentro del alimento es suficiente para mantener la superficie mojada. Sin embargo, mientras continúa el secado, llega un momento en que el movimiento del agua no es capaz de mantener una película continua de agua en la superficie y la velocidad de secado disminuye (período decreciente).

Cuando la difusión líquida en el alimento controla la velocidad de secado en el periodo de velocidad decreciente, la tasa de secado puede ser modelada utilizando la ley de difusión de Fick (Ec. 1). En este caso se considera que el vapor de agua es generado en la superficie del alimento, creando un gradiente de potencial químico que moviliza el agua líquida del interior de éste, y que la resistencia a la transferencia de masa del vapor desde la superficie es despreciable, alcanzando la humedad de equilibrio con el aire de secado instantáneamente (Geankoplis, 1998).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot D_{eff} \nabla C \qquad (1)$$

La ecuación anterior representa la ley de Fick general, donde C representa la humedad en base seca local (kg agua/kg sólidos secos), t el tiempo (s) y D_{eff} la difusividad efectiva (m^2/s). Este parámetro que describe la tasa de movimiento de humedad es altamente específico de las condiciones de proceso y de la microestructura de alimento, por lo que debe ser determinado experimentalmente.

En el caso de que se considere una geometría plana infinita y que la transferencia de calor y masa es unidireccional y normal a la superficie, la ley de difusión de Fick queda definida como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_{eff}\frac{\partial C}{\partial x}\right) \tag{2}$$

Para la resolución de esta ecuación diferencial parcial (Ec. 2) es necesario una condición inicial y dos de borde. Si se considera que la humedad y temperatura inicial se distribuye uniformemente, la condición inicial queda definida como:

$$t = 0: \; C = C_0, \; \forall x \tag{3}$$

Adicionalmente, por simetría (plano se simetría en la mitad del espesor, x=0):

$$x = 0: \; \frac{\partial C}{\partial x} = 0, \; \forall t > 0 \tag{4}$$

La última condición de borde se deriva del supuesto de que la humedad de equilibrio de la superficie con el aire de secado se considera despreciable (aire seco) y se alcanza instantáneamente:

$$x = L: \; C_L = C_{eq}, \; \forall t > 0 \tag{5}$$

Suponiendo además que la difusividad efectiva es constante y que la expansión y contracción son despreciables, es posible encontrar la solución analítica a la ley de Fick para una geometría de placa plana infinita, en forma de serie infinita (Ec. 6) (Heldman y Lund, 2007).

$$\Gamma = \frac{C - C_{eq}}{C_0 - C_{eq}} = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)^2}\exp\left(-(2n+1)^2\frac{\pi^2}{4}\frac{D_{eff}t}{L^2}\right) \tag{6}$$

donde Γ es el coeficiente de la tasa de secado (adimensional), L (m) la mitad del ancho de la placa, C_0 la concentración de agua inicial (b.s.) y C_{eq} la humedad de equilibrio (b.s.) del alimento con el aire de secado.

En la Figura 1-3 se presenta en modo esquemático el modelo de la transferencia de masa por difusión líquida en una placa plana con resistencia superficial despreciable, según la Ecuación de Fick (Ec. 2), representándose los supuestos utilizados (Ecs. 3,4 y 5) para la obtención de una solución a dicha ecuación.

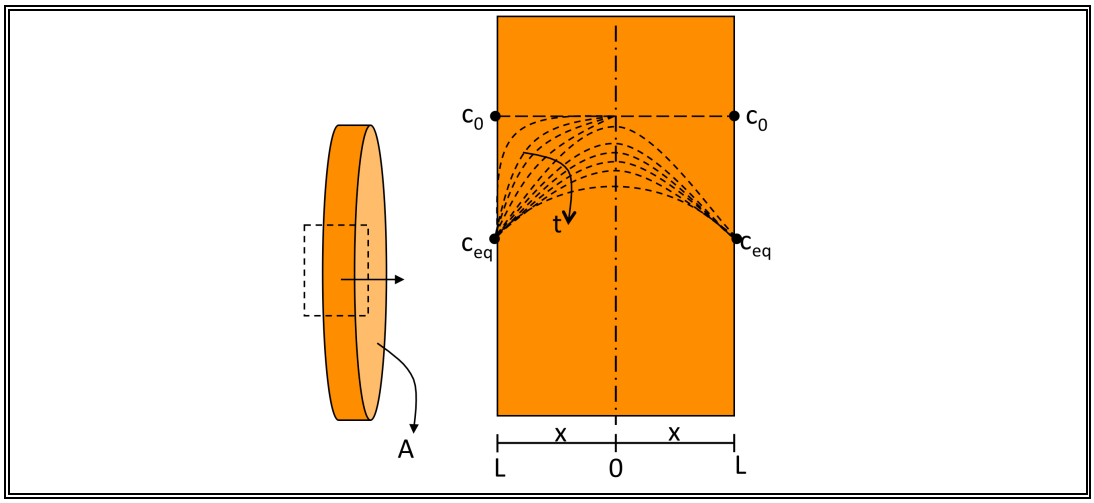


Figura 1-3: Modelo conceptual de difusión líquida en una placa plana con resistencia superficial despreciable. Las líneas punteadas representan la evolución de la concentración de humedad en el tiempo (t) (adaptado de Geankoplis, 1998)

Para tiempos largos la expresión presentada en la Ecuación 6 se puede simplificar considerando sólo el primer término del desarrollo y así se puede obtener D_{eff}, para una temperatura determinada, de un gráfico ln Γ vs. tiempo. Cabe destacar que esta simplificación puede predecir las curvas de secado sólo para pequeños cambios de humedad, pues la difusividad efectiva depende tanto de la humedad como de la temperatura (Heldman y Lund, 2007). La tasa de secado en alimentos también ha

sido modelada utilizando modelos empíricos (Doymaz, 2004; Sacilik y Elicin, 2006; Singh y Gupta, 2006) y modelos matemáticos de diferencias finitas y/o programas computacionales que resuelven por métodos numéricos (Kayacier y Singh, 2004; Srikiatden y Roberts, 2008; Ruiz-López et al., 2004). Sin embargo, utilizan un coeficiente de difusión efectiva que depende sólo de la temperatura, utilizando la ecuación de Arrhenius según :

$$D_{eff} = D_0 \exp(-E_a / RT) \tag{7}$$

donde D_0 es un parámetro estructural del alimento (m^2/s), E_a la energía de activación (J/mol), R la constante de gases ideales (8,314 J/mol K) y T la temperatura absoluta (K).

1.2. Descripción del Proceso de Fritura

La fritura por inmersión es un proceso muy utilizado en la industria alimentaria por el desarrollo de texturas, sabores y aromas únicos en el producto. Consiste en la inmersión de un alimento en aceite o grasa comestible calentada a una temperatura superior al punto de ebullición de agua, normalmente 160-190ºC (Moreira et al., 1999) en condiciones atmosféricas, resultando en la transferencia simultánea de calor y masa (Figura 1-3). Las altas temperaturas utilizadas en la fritura por inmersión producen un contra-flujo de burbujas de vapor de agua y aceite (Bouchon et al., 2003) y cambios microestructurales significativos tanto en la superficie como al interior del chip (Aguilera y Stanley, 1999; Bouchon y Aguilera, 2001).

En el proceso de fritura, el calor se puede transferir por convección desde el aceite (temperatura T_a) hasta la superficie del alimento (T_s) y a través de él por conducción (Figura 1-4). Después de que la superficie del alimento alcanza la temperatura de ebullición del agua, comienza la evaporación de humedad violenta en la superficie del alimento, dando como resultado la formación de una costra

seca (H_s=0) y porosa, y el comienzo de un régimen de convección turbulenta. A medida que el alimento se va deshidratando, la costra va aumentando de espesor y el frente de evaporación se va desplazando hacia el interior del alimento. A medida que transcurre el tiempo, la transferencia de vapor de agua va disminuyendo, hasta llegar al punto final de burbuja o *bubble-end point*, que representa el término de la pérdida de humedad para productos fritos (Singh, 1995; Farinu y Baik, 2005).

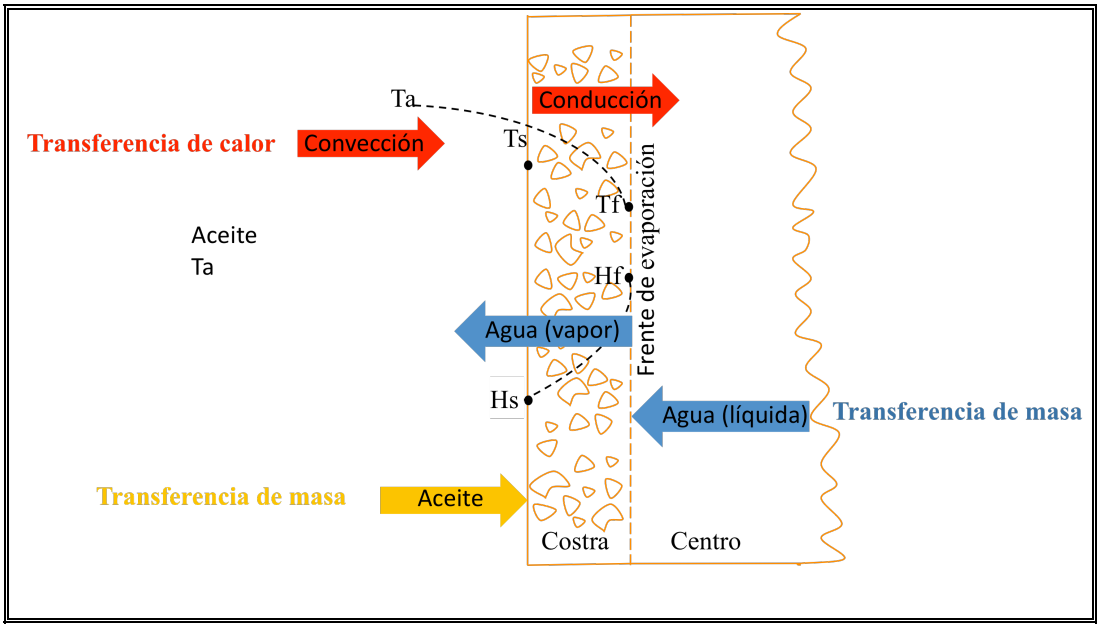


Figura 1-4: Diagrama genérico de los posibles mecanismos de transferencia de calor y masa durante la fritura (adaptado de Dobraszczyk et al., 2006)

1.3. Atributos de Calidad y Temperatura

Los productos sometidos a altas temperaturas pueden sufrir reacciones de deterioro que afectan el color, propiedades nutritivas, textura, sabor y aroma del alimento. Lo anterior adquiere mucha importancia en productos sensibles al calor como la zanahoria, en que las altas temperaturas promueven la degradación de carotenoides ya sea por isomerización, en que los carotenoides pasan de la configuración *trans* a

cis, que tiene menor actividad provitamina A, como por oxidación (Rodríguez-Amaya, 2001). El autor comenta que las consecuencia son importantes pérdidas nutricionales, de color y de sabor.

En este sentido, Krokida et al. (1998) estudiaron la evolución de parámetros de color en el secado convectivo a 50, 70 y 90ºC con humedades relativas de 15, 30 y 40%. Los autores comentan que el color natural de la zanahoria (parámetros a* y b*) se perdería a mayor temperatura y menor humedad relativa del aire, siguiendo una cinética de primer orden. Del mismo modo, Krokida et al. (2001a) estudiaron los cambios de color durante la fritura por inmersión de papas en temperaturas de 150, 170 y 190ºC. Los autores encontraron que los parámetros de color (L*, a* y b*) disminuían a medida de que la temperatura del medio de fritura era mayor y que seguían una cinética de primer orden. La relación entre la pérdida de color y degradación de *trans* β-caroteno en productos deshidratados también ha sido abordada por otros investigadores (Koca et al., 2007), encontrando que existiría una relación significativa entre estos atributos de calidad en rodajas de zanahoria deshidratadas y almacenadas en distintas condiciones.

Otro cambio que afecta la calidad de alimentos deshidratados es la reacción de Maillard, que ocurre entre azúcares y grupos aminos presente en los alimentos. Dependiendo de la composición del alimento y de la intensidad de calor aplicada, en la reacción de Maillard se pueden formar compuestos volátiles, responsables del cambio de aroma, compuestos de bajo peso molecular, relacionados con el cambio de sabor, antioxidantes, compuestos tóxicos (mutagénicos) y compuestos pardos (polímeros denominados melanoidinas), que determinan el cambio de color (Arnoldi, 2002). Esta reacción de pardeamiento no enzimático está influenciada principalmente por la actividad de agua (a_w), temperatura y composición del alimento (Heldman y Lund, 2007). La relación entre la reacción de Maillard con la actividad de agua se puede ver graficada en el mapa de estabilidad de alimentos de

Labuza (1971). Según el autor, en el rango de humedades intermedias (0,6 - 0,9) existiría el peak de esta reacción de deterioro (Figura 1-5).

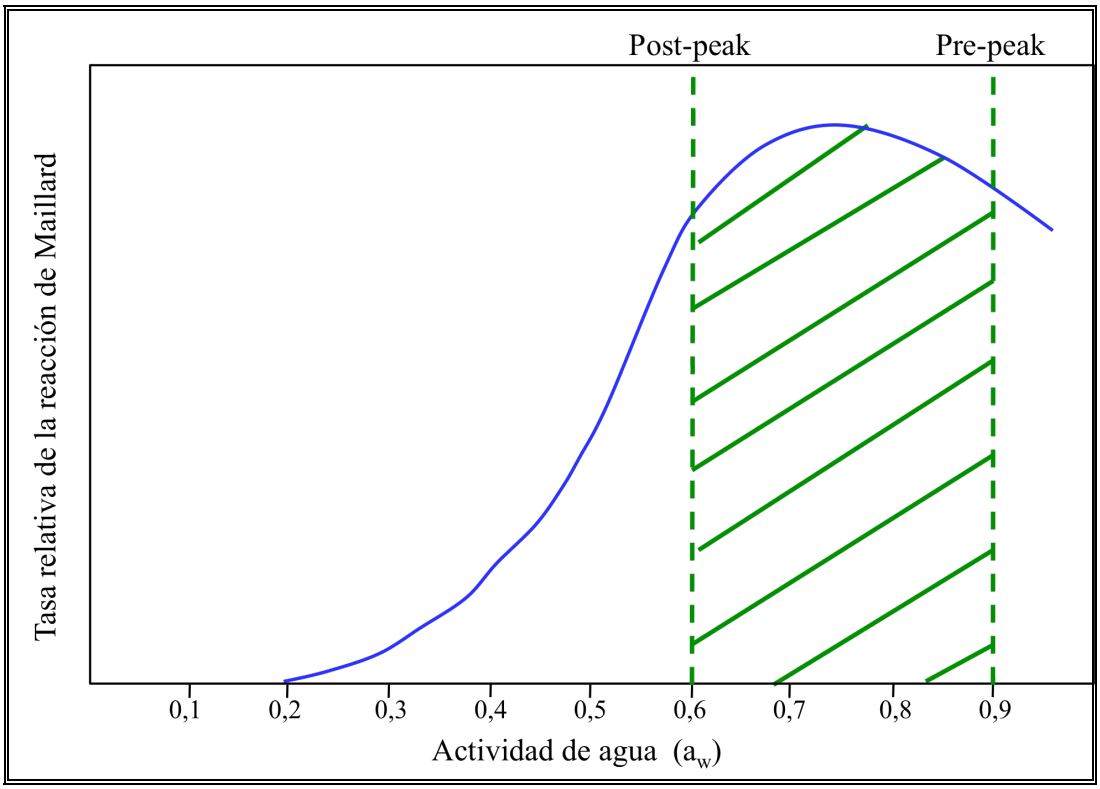


Figura 1-5: Influencia de la actividad de agua en la tasa relativa de la reacción de Maillard, en que se resalta la zona del peak de esta reacción (adaptado de Labuza, 1971)

En la misma línea, Eichner et al. (1985) estudiaron la influencia del contenido de humedad y de la temperatura en la formación de compuestos de la reacción de Maillard en el secado convectivo de zanahorias. Los investigadores compararon el secado a temperatura constante y en dos etapas de temperaturas, en cuanto a la concentración de compuestos de la reacción de Maillard generados, encontrando por una parte que a menor temperatura de secado la formación de compuestos pardos es menor y que el secado en dos etapas de temperatura podría mejorar la

calidad de zanahorias deshidratadas, pues utiliza altas temperaturas al comienzo del proceso para remover rápidamente gran cantidad de agua, mientras que se disminuye al final del proceso de secado, cuando los contenidos de agua son críticos para el pardeamiento no enzimático.

La deshidratación de los alimentos induce a cambios microestucturales como encogimiento, porosidad, colapso, fractura y endurecimiento superficial (*case-hardening*) (Aguilera, 2003), que determinan las propiedades sensoriales del producto final. Sin embargo, estas características son altamente dependientes del tipo de proceso y de la matriz alimentaria en cuestión (Aguilera y Stanley, 1999). En el caso de la fritura por inmersión, Miranda y Aguilera (2006) describen los cambios físicos y químicos, incluyendo la cristalización de la celulosa, degradación de pectina y gelatinización del almidón, que provocan cambios microestructurales en papas debido a las altas temperaturas (Figura 1-6). Los autores comentan que la lamela media se desintegra y que los gránulos de almidón gelatinizan en temperaturas de 60 a 80ºC, provocando que las células se separen y que la textura se suavice, mientras que la exposición a temperaturas mayores de 100ºC causaría la formación de una costra seca de color café. En el secado con aire caliente, en tanto, las altas temperaturas producen el colapso de la estructura, produciendo texturas más firmes y crocantes, que se rehidratan lentamente (Perera, 2005). En el caso específico de los chips, la característica textural más importante, que determina la calidad del producto, es la crocancia, inducida por el bajo contenido de humedad de éste tipo de alimentos. Un chip crocante se define como firme y fácil de romper cuando se deforma, emitiendo un sonido “crocante” (Krokida et al., 2001b). La crocancia también se puede asociar a los materiales vítreos, en que se produce una rápida caída en la fuerza aplicada por los aductores mandibulares, que se relaciona con una rápida propagación de la fractura (Vincent, 1998).

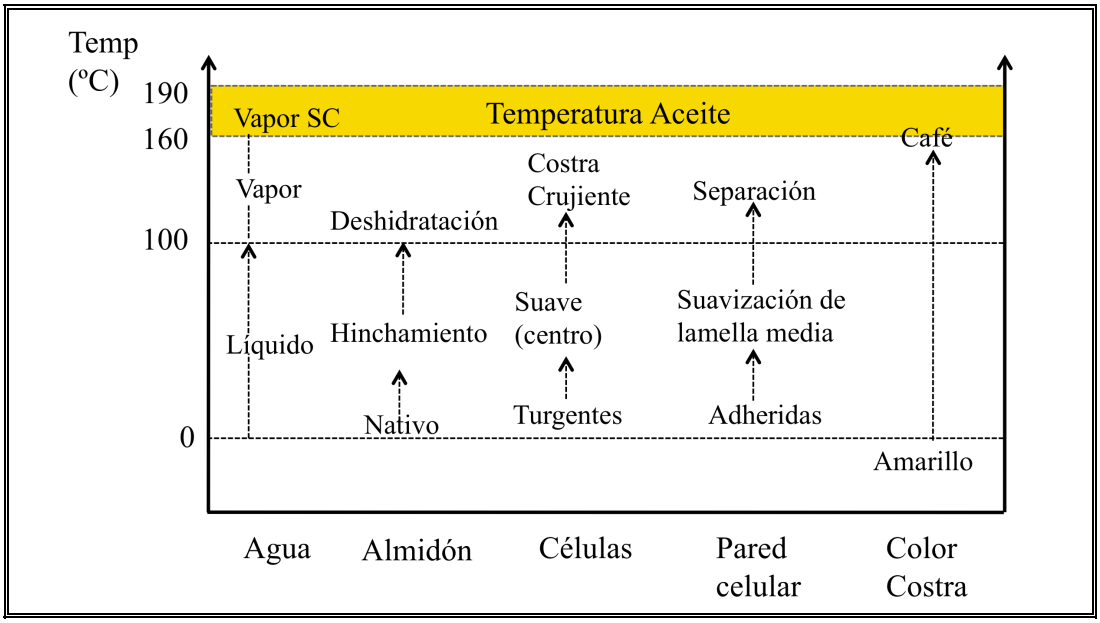


Figura 1-6: Cambios físicos, químicos y estructurales que ocurren en fritura por inmersión (adaptado de Miranda y Aguilera, 2006)

1.4. Aplicación de Vacío a Métodos de Deshidratación

La incorporación de vacío en los procesos de deshidratación tradicionales puede ser utilizada para remover humedad del alimento a temperaturas reducidas y con ello lograr mejorar la calidad del producto.

La fritura a vacío es una tecnología emergente que puede ser una opción para la producción de snacks de frutas y verduras, en cuanto a las mejoras en los atributos de calidad en comparación con los productos fritos atmosféricamente. En este sentido, esta técnica permitiría que la cantidad de aceite en el producto sea menor (Garayo y Moreira, 2002; Mariscal y Bouchon, 2008), si bien lo más característico es que el color y sabor natural son más fácilmente preservados, manteniendo la textura y flavor tan apreciados de los productos fritos (Shyu et al., 2005; Pérez-Tinoco et al., 2008). En cuanto al valor nutricional, el producto contiene mayor

contenido de vitaminas y antioxidantes, comparado con la fritura tradicional (Da Silva y Moreira, 2008; Pérez-Tinoco et al., 2008).

El secado a vacío, en tanto, también puede ser una buena alternativa para producir snacks con mayor calidad, pues, por ejemplo el contenido de carotenoides (Suvarnakuta, Devahastin y Mujumdar, 2005) y la retención de color (en término de los parámetros a* y b*) son mayores (Krokida et al., 1998), en comparación con el secado convectivo a la misma temperatura de proceso. Por otro lado, la porosidad de zanahorias deshidratadas por secado a vacío es mayor (Krokida y Maroulis, 1997), favoreciendo la rehidratación, pero induciendo una pérdida de crocancia (Perera, 2005).

En consecuencia, la aplicación de vacío a los métodos tradicionales de deshidratación (secado y fritura) puede ser una alternativa para la producción de snacks saludables de frutas o verduras, por cuanto permitirían mejorar algunos parámetros de calidad del alimento, relacionados con la utilización de menor temperatura y presión de operación.

2. HIPÓTESIS

Las nuevas tendencias en snacks saludables, que apuntan a alimentos con mayor valor nutricional, hacen necesario el estudio de nuevas técnicas de deshidratación, de modo de obtener alimentos de mejor calidad. Es así como la hipótesis de este trabajo es que la incorporación de vacío en procesos de deshidratación tradicionales (secado y fritura) permite obtener snacks a base de zanahoria con características organolépticas superiores y con características nutricionales ventajosas, producto de una mayor retención de carotenoides y debido al menor contenido de compuestos indeseados de la reacción de Maillard, reflejadas en la preservación del atractivo color de las zanahorias frescas.

3. OBJETIVOS

En concordancia con la hipótesis, el objetivo general de esta tesis es estudiar el efecto de la temperatura y del vacío en la calidad de snacks de zanahoria obtenidos mediante la aplicación de vacío a métodos tradicionales de secado y fritura.

En particular, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar el proceso de secado convectivo en términos de la cinética de secado, de la difusividad efectiva del agua en la matriz del alimento, de la concentración de compuestos pardos de la reacción de Maillard (melanoidinas) y de la pérdida de color.

- Estudiar el efecto de la actividad de agua y temperatura en la formación de melanoidinas en el secado convectivo de discos de zanahorias.

- Seleccionar las condiciones óptimas para los procesos de secado convectivo y a vacío, considerando el efecto de la temperatura y tiempo de proceso en los atributos de calidad analizados.

- Comparar el análisis instrumental con la evaluación sensorial de los atributos de calidad estudiados en snacks a base de zanahoria deshidratados mediante secado y fritura, en condiciones atmosféricas y a vacío.

4. MATERIALES, PROCEDIMIENTOS Y MÉTODOS

En esta sección se presenta la metodología experimental realizada con el fin de cumplir los objetivos propuestos (Figura 4-1).

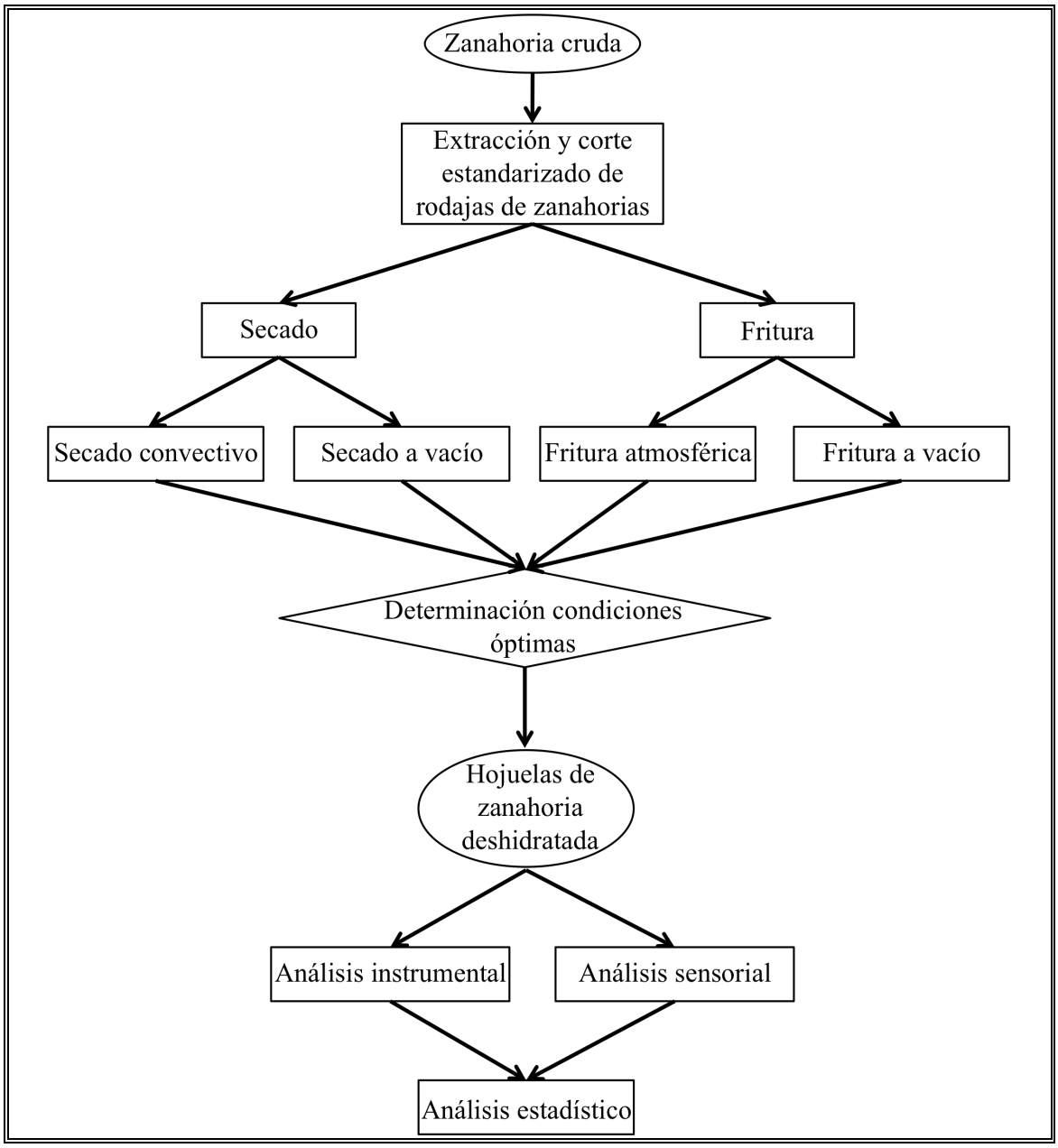


Figura 4-1: Diagrama esquemático de la metodología experimental

Se utilizaron zanahorias (*Daucus carota*) variedad Ábaco (89% de humedad en promedio), debido a su calidad uniforme y gran oferta, las cuales fueron adquiridas en un supermercado local de Santiago y almacenadas a 7ºC a una humedad relativa de 85-95% hasta su uso.

Se escogieron zanahorias que tuviesen una buena proporción entre la zona central (xilema) y externa (floema), ya que el xilema es generalmente leñoso y sin sabor (Desai, 2004). Se extrajeron muestras de geometría plana (discos de 38 mm. de diámetro y 2 mm. de espesor) desde un corte transversal de zanahorias (Figura 4-2), utilizando una mandolina (Danesco International Inc., USA).

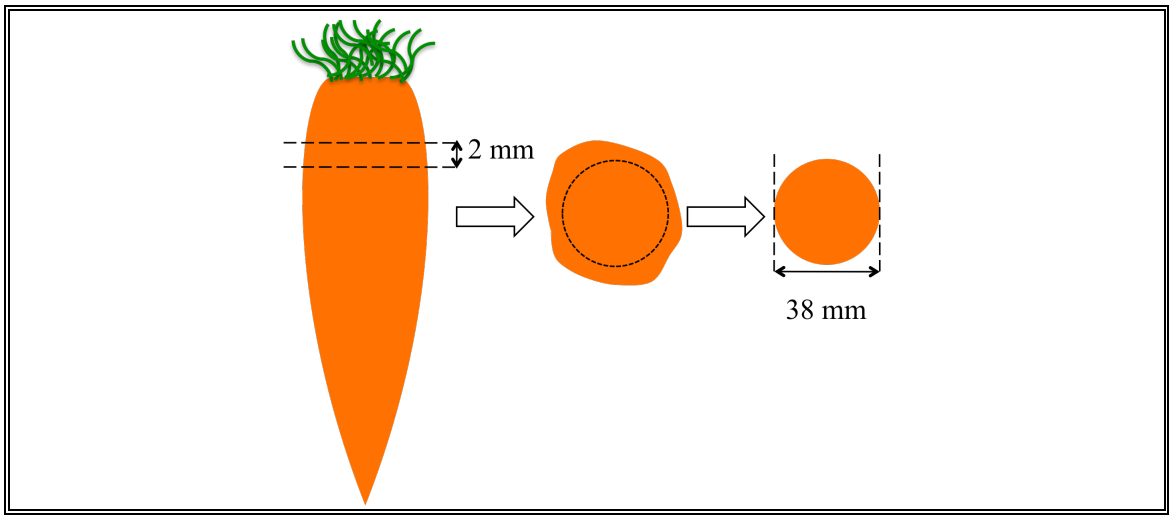


Figura 4-2: Extracción y corte estandarizado de rodajas de zanahoria

Las dimensiones de los discos se escogieron de tal forma que el área de las tapas fuese 10 veces mayor que el área del manto, de modo de poder asumir que la transferencia de masa fuese sólo axial, lo que permite considerar una geometría infinita y facilitar la modelación.

Una vez obtenidos los discos de zanahoria, se sometieron a distintos procesos de deshidratación: secado convectivo, secado a vacío, fritura atmosférica y fritura a vacío, que se realizaron al menos en triplicado.

4.1. Proceso de Secado

El secado convectivo y en condiciones de vacío se realizó en condiciones de proceso asegurando que:

- la temperatura fuese menor a 105ºC, pues sobre ésta la degradación de carotenoides es máxima (Chen et al.,1995);

- la actividad de agua final del producto fuese 0,45, pues corresponde al rango de máxima estabilidad de α y β-carotenos: a_w = [0,31 - 0,54] (Lavelli et al., 2007) y de textura deseable para snacks a_w = [0,35 - 0,5] (Katz y Labuza, 1981). La actividad de agua elegida es la actividad de agua correspondiente al *bubble-end point* de discos de zanahoria fritos con dimensiones y características similares (Dueik et al., 2009).

- el tiempo máximo de secado fuese de 3 horas por razones de economía;

Con el objetivo de comparar la técnica de secado convectivo con la de secado a vacío, se utilizó como criterio que ambos procesos tardasen el mismo tiempo en alcanzar la humedad final requerida. De esta forma, en primer lugar se determinaron las condiciones óptimas de operación (tiempo y temperatura) del secado convectivo, considerando la pérdida de color, la concentración de los compuestos de la reacción de Maillard (Eichner et al., 1985) y el tiempo de proceso. La temperatura del secado a vacío, se determinó entonces, de modo que fuese la mínima temperatura que permitiera deshidratar en el tiempo óptimo determinado para el secado convectivo.

4.1.1. Secado convectivo

El secado convectivo se realizó con aire seco a 2,5 m/s y con temperaturas de 60, 80 y 100ºC en un horno Rational (Modelo SCC61, Alemania). Una vez que el horno alcanzó la temperatura de operación (luego de 4 minutos), se dispusieron los discos de zanahoria en la canasta del horno, teniendo el cuidado de que no estuviesen sobrepuestos. Una vez terminado el secado, las hojuelas fueron retiradas del horno y almacenadas en un desecador. Los distintos procesos de secado realizados se efectuaron en cuadruplicado.

Adicionalmente al proceso de secado convectivo a temperatura constante, se efectuaron tratamientos de secado en dos etapas de temperatura, acorde al trabajo de Eichner et al. (1985) y considerando el paso por el peak de la reacción de Maillard en función de la actividad de agua (Figura 1-5). El instante de transición de temperaturas se determinó de tal forma que correspondiera a las actividades de agua del inicio o fin del peak del pardeamiento no enzimático (a_w = 0,9 y 0,6, respectivamente). De acuerdo a lo anterior, se compararon tratamientos de secado a temperatura constante y tratamientos que combinaron dos temperaturas, utilizando como criterio el índice de pardeamiento no enzimático, la pérdida de color y el tiempo de proceso.

4.1.2. Secado a vacío

Este operación se efectuó en un horno de vacío (modelo 5831, Napco, EE.UU.) conectado a una bomba de diafragma Vacuumbrand (modelo D-97877, Wertheim, Alemania), capaz de producir hasta 49 mmHg (Figura 4-3). Para evitar que el vapor, producto de la deshidratación del alimento, ingresara a la bomba, se instaló una trampa de humedad entre ambos aparatos.

Una vez que el horno alcanzó la temperatura deseada (luego de 30 minutos), las hojuelas de zanahoria fueron ubicadas, sin sobreponerlas, en la bandeja ubicada al

interior de éste y se encendió la bomba para que produjese un vacío de 49 mmHg. Una vez terminado el secado, las hojuelas fueron retiradas del horno y ubicadas en un desecador.

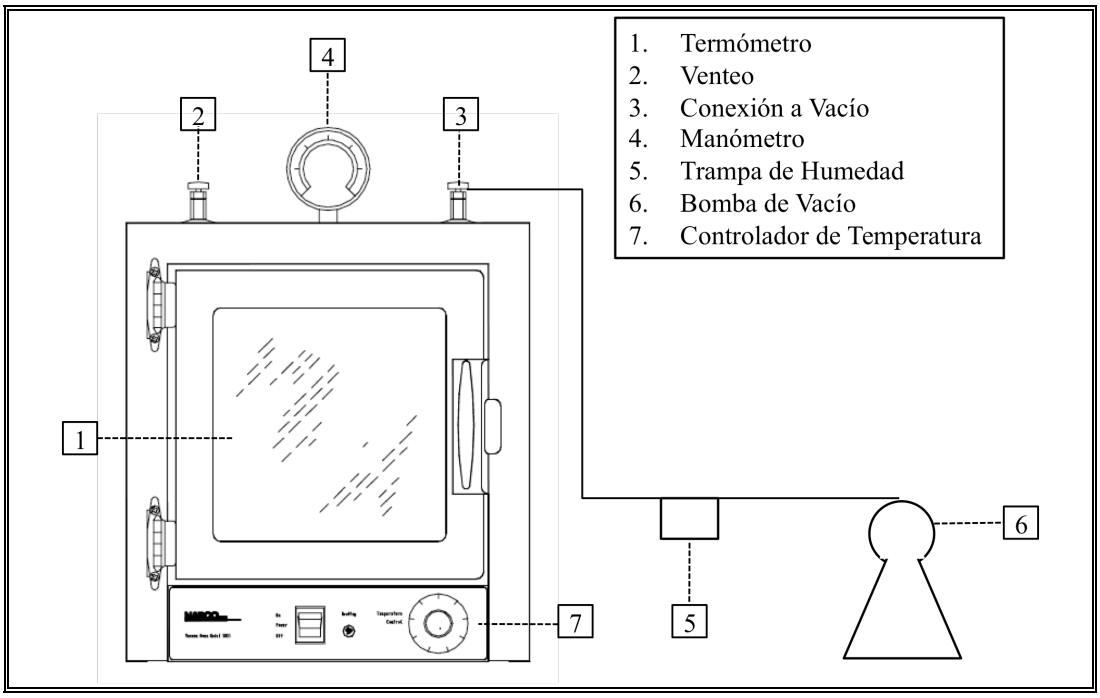


Figura 4-3: Montaje de Secado a Vacío

Tal como fue mencionado previamente, la temperatura de operación del secado a vacío se determinó tomando como base el tiempo de proceso óptimo determinado para el secado convectivo, según los criterios mencionados previamente, de modo de poder comparar ambos proceso de secado.

4.2. Proceso de Fritura

Con el fin de realizar las experiencias de fritura, tanto atmosférica como a vacío, se utilizó el montaje y procedimiento sugerido por Dueik et al. (2009) ilustrado en la Figura 4-4.

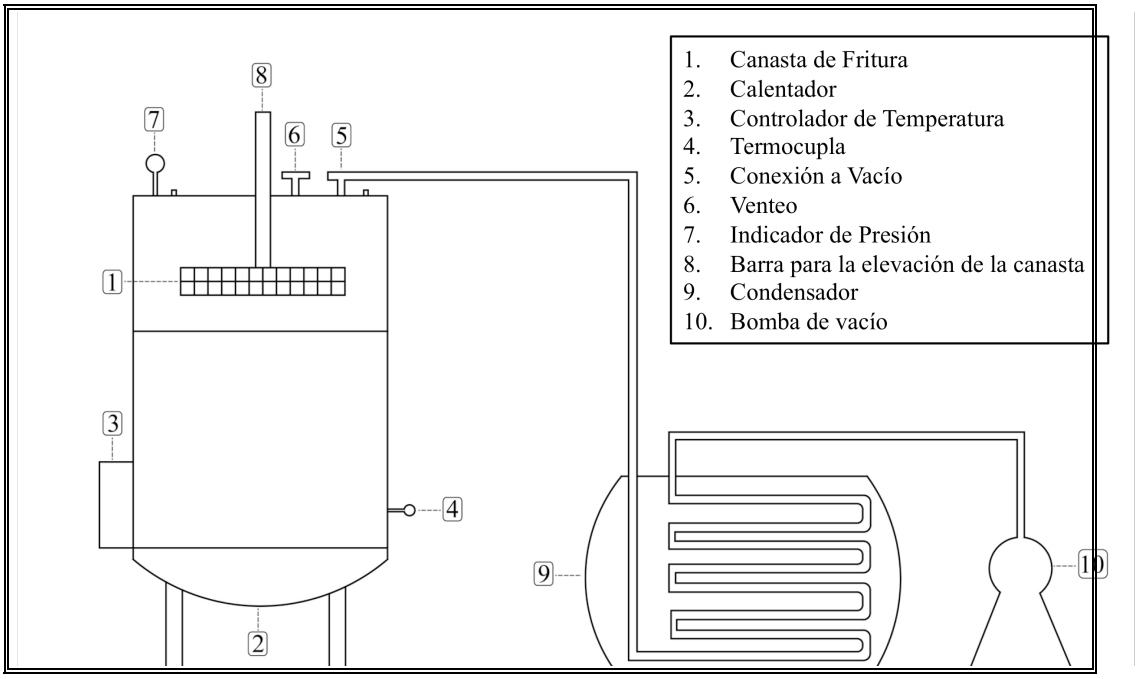


Figura 4-4: Aparataje del equipo de fritura (cortesía de Dueik y Bouchon, 2009)

El equipo consiste en un estanque de acero inoxidable (316L) que cuenta con calefacción eléctrica, controlada con un sistema de control de temperatura (Micro-Controller X, modelo PXR4, Fuji Electric Instruments, Japón) que proporciona una precisión de ± 2˚C. El estanque posee además un sistema de rotación, que se utilizó para agitar el aceite (40 rpm) para minimizar los gradientes de temperatura. Para adaptar el equipo a fritura atmosférica y en condiciones de vacío, se ubicó una válvula (venteo) en la parte superior del estanque y así poder regular el ingreso de aire. En el caso de la condición de vacío, el estanque se conectó a una bomba de alto vacío de dos etapas (modelo DVR-140, Dosivac, Argentina), capaz de producir una presión igual a la bomba utilizada en el secado a vacío (49 mmHg). Para evitar que el vapor generado en el producto ingresara a la bomba, se instaló un condensador (tubería de acero inoxidable de 4 m) entre ambos aparatos.

Para las corridas experimentales de fritura atmosférica y a vacío, se utilizó como medio de fritura aceite de maravilla alto-oleico (Camilo Ferrón Chile S.A., Chile). El aceite fue almacenado a temperatura de refrigeración y antes de la primera utilización fue calentado por 2 horas a 160ºC (Blumhental, 2001) para asegurar la formación de surfactantes y así mejorar el mojamiento de la superficie del alimento (Singh y Tyagi, 2001). El descarte de aceite se efectuó después de 3 horas de fritura.

Con el fin de comparar ambos procesos de fritura, se utilizó la misma fuerza motriz térmica. Este concepto fue definido por Mariscal y Bouchon (2008) como la diferencia entre la temperatura del aceite de fritura, T_{aceite}, y el punto de ebullición del agua a una presión determinada, $T_{eb}(P)$. De este modo, para los experimentos de fritura se aplicó una fuerza motriz de 60ºC (Ec. 8), pues según Dueik et al. (2009) estas condiciones de temperatura permitirían optimizar parámetros de calidad en snacks de zanahoria fritos en condiciones atmosféricas y a vacío. Una fuerza motriz de 60ºC implicó que en condiciones atmosféricas la temperatura del aceite fuese de 160ºC, mientras que en condiciones de vacío (49 mmHg) de 98ºC.

$$\Delta T = T_{aceite} - T_{eb}(P) = 60^{o}C \qquad (8)$$

El tiempo de fritura en ambos tipos de proceso, estuvo determinado por el punto final de burbuja, i.e. una humedad de 2% en base húmeda, que corresponde a una actividad de agua de 0,45 para discos de zanahoria (Dueik et al., 2009).

4.2.1. Fritura atmosférica

Las experiencias de fritura en condiciones atmosféricas se realizaron con el venteo completamente abierto y una vez que el aceite de fritura llegó a la temperatura deseada (160ºC), se ubicaron diez discos de zanahoria en la canastilla de fritura, que se tapó con una rejilla y se sumergió en el aceite por 3 minutos para que se alcanzara el punto final de burbuja (Dueik et al., 2009). Una vez transcurrido este

tiempo, la canasta se elevó, para que escurriera el exceso de aceite, por 3 minutos y posteriormente las hojuelas se sacaron de la freidora y se dejaron enfriar a temperatura ambiente.

4.2.2. Fritura a vacío

Los experimentos de fritura a vacío se realizaron utilizando el venteo completamente cerrado y con las consideraciones mencionadas previamente. El procedimiento considerado fue muy similar al de la fritura atmosférica, pero en este caso la tapa del estanque fue sellada para despresurizar el estanque hasta una presión de 49 mmHg y se esperó que el aceite de fritura alcanzara la temperatura deseada (98ºC). Una vez que el proceso llegó a término, que de acuerdo a Dueik et al. (2009) es al cabo de 5 minutos, se elevó la canastilla de fritura y se dejó por 3 minutos antes de presurizar el estanque y retirar las muestras para que se enfriaran a temperatura ambiente.

4.3. Métodos y Análisis

Las hojuelas de zanahorias desarrolladas por las cuatro técnicas de deshidratación previamente detalladas, fueron comparadas nutricional y organolépticamente, considerando la misma humedad final del producto, utilizando tanto métodos instrumentales como la evaluación sensorial y analizados estadísticamente.

4.3.1. Métodos instrumentales

Los atributos de calidad analizados y determinados fueron: pérdida de color, retención de *trans* β-caroteno, concentración de compuestos pardos de la reacción de Maillard (melanoidinas) y crocancia. Adicionalmente, con el fin de seleccionar las condiciones de operación para los procesos de secado, se realizó un estudio en término de la cinética de secado, de la difusividad efectiva en la matriz del producto, de la pérdida de color y de la formación de melanoidinas.

a) Contenido de humedad

El contenido de humedad de las hojuelas de zanahoria se determinó secando la muestra molida a 105ºC ± 2ºC en una estufa hasta que el peso fuese constante y luego se enfrió en desecadores. El contenido de humedad se calculó en base seca, con la diferencia de peso entre la muestra y los sólidos secos obtenidos (A.O.A.C., 1995).

b) Actividad de agua (aw)

Las muestras de hojuelas de zanahoria se picaron y luego se les midió su actividad de agua usando un higrómetro aw-wert-Messer (Lufft, Alemania) a 20ºC por 8 horas.

c) Compuestos pardos de la reacción de Maillard

La concentración de melanoidinas se determinó adaptando el método descrito por Baloch, Buckle y Edward (1973). Las muestras de zanahoria deshidratada (2,5 g) se molieron, rehidrataron por 10 minutos con 50 ml de una solución de ácido acético y formaldehído (2%–1%, v/v), homogeneizaron por 5 minutos y se filtraron a vacío. El residuo se reextrajo con 20 ml de la misma solución, homogeneizándose por otros 5 minutos y volviéndose a filtrar. Ambos filtrados se recolectaron en un matraz aforado de 100ml, donde los pigmentos pardos se precipitaron agregándose 10 ml de solución de acetato de plomo al 10% y posteriormente se completó el aforo con la solución de ácido acético y formaldehído. La solución se centrifugó a 2500 rpm por 10 minutos utilizando una centrífuga Anke (modelo TDL-50B, Shangai, China), el sobrenadante se mezcló con igual volumen de alcohol etílico y se volvió a centrifugar a 3000 rpm por 10 minutos. Finalmente, se determinó la absorbancia a 420 nm (A_{420}) con un espectrofotómetro UV–VIS (modelo T70, Baush & Lomb, EE.UU.) del sobrenadante obtenido. Con el fin de comparar los valores de absorbancia

obtenidos de los procesos de secado y fritura, las absorbancias a 420 nm fueron recalculados en base seca (A_{420}/g. sólidos secos).

d) Parámetros de color

Para la adquisición, captura y análisis de imágenes, se adaptó el trabajo de Briones y Aguilera (2005). Se utilizó una cámara digital (modelo PowerShot A70, Canon, EE.UU.) conectada a un computador con una interfase USB (modelo IFC-300PCU, Canon, EE.UU.) y montada en un soporte ubicado dentro de un compartimento rectangular, opaco y con paredes internas negras (Figura 4-5).

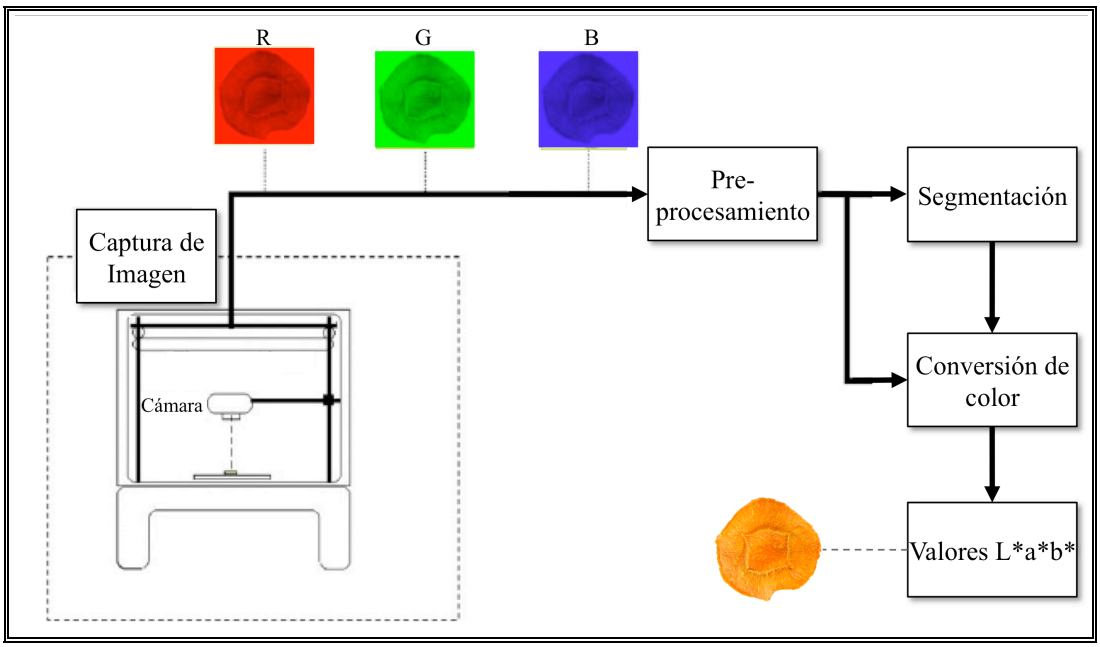


Figura 4-5: Montaje de la adquisición, captura y obtención de parámetros de color L*a*b* (Adaptado de Pedreschi et al., 2006)

Las muestras depositadas en el depósito fueron iluminadas con cuatro fuentes de luz D_{65} (60 cm de largo y 18 W; Modelo TLD/965, Phillips, Singapur) dispuestas en un ángulo de 45ºC para maximizar la reflexión. El ángulo entre el eje del lente

de la cámara y la muestra, en tanto, se ajustó en 90ºC para reducir el brillo. La configuración de la captura de imagen fue tal que el iris se operó en modo manual, con una apertura de foco de *f* = 8 y velocidad de 1/6 (1/3), sin flash ni zoom y en calidad superfina. Previo a la captura de imagen de las muestras, se calibró la luminosidad del sistema utilizando un papel Kodak gris con una reflectancia de 18% (L*=50). Las imágenes adquiridas de snacks de zanahoria (ANEXO D) se almacenaron en formato JEPG (*Joint Photographic Experts Group*), en 1600 x 1200 pixeles y coordenadas RGB.

Utilizando el software Adobe Photoshop 6.0 (Adobe Systems Inc., EE.UU.), se determinaron los parámetros de color L (luminosidad), a (cromaticidad rojo-verde) y b (cromaticidad amarillo-azul) que fueron estandarizados a coordenadas L*, a* y b* (Ecs. 9, 10 y 11) para independizar el efecto del equipo de medición de color (Yam y Papadakis, 2004).

$$L^* = \frac{L}{255}100 \tag{9}$$

$$a^* = a\frac{240}{255} - 120 \tag{10}$$

$$b^* = b\frac{240}{255} - 120 \tag{11}$$

El modelo *L*a*b** o CIELab (Figura 4-6) es un sistema de coordenadas cartesianas para medir el color en forma estándar. Fue desarrollado por la comisión internacional CIE (*Commission Internationale d'Eclairage*) en 1976 y se basa en el modo en que el ojo del ser humano percibe el color.

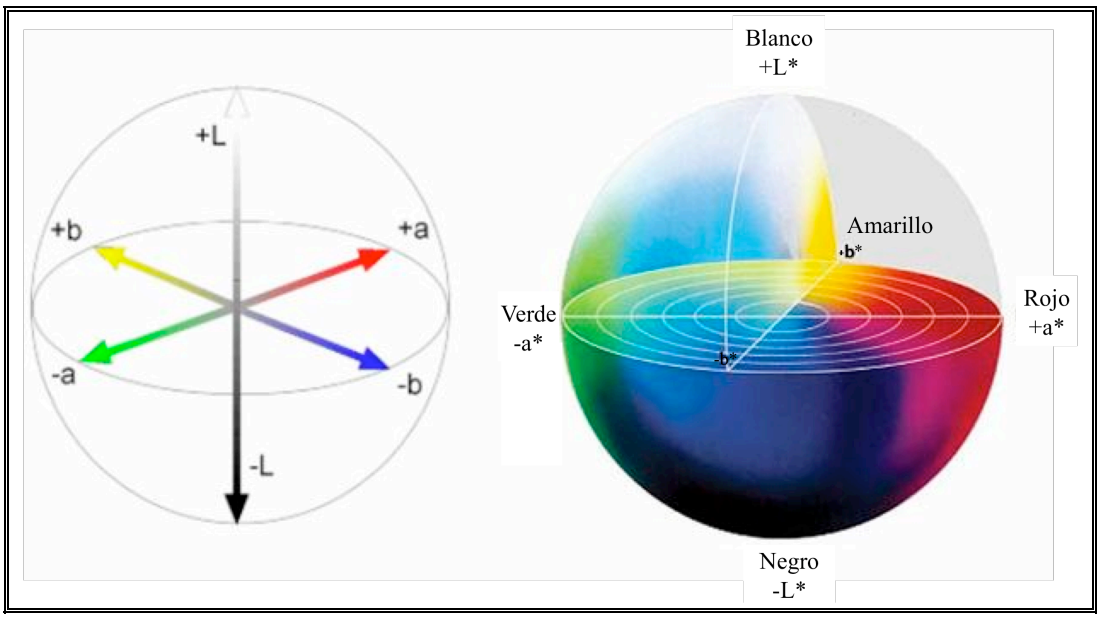


Figura 4-6: Espacio de color CIElab (Hoffmann, 2009)

Con el fin de determinar el cambio de color entre las muestras de zanahoria deshidratadas y frescas, se calculó la distancia Euclideana (ΔE):

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \qquad (12)$$

en que L_0*, a_0* y b_0^* representan los parámetros de color de las zanahorias frescas (Pedreschi et al., 2006). En contraste con otros modelos de color, en CIELab la percepción del color es uniforme, pues la distancia Euclideana (ΔE) entre dos colores corresponde aproximadamente a la diferencia de color percibida por el ojo humano (Hunt, 1991). Por estas características, este sistema de medición de color es utilizado frecuentemente para medir la pérdida de color en alimentos (Briones y Aguilera, 2005; Dueik et al., 2009; Mariscal y Bouchon, 2008; Pedreschi et al., 2006).

e) Contenido de *trans* β-caroteno

El contenido de *trans* β-caroteno se determinó usando la metodología descrita por Dueik et al. (2009). Se extrajo β-caroteno de muestras de zanahorias según el método propuesto y posteriormente se analizaron utilizando cromatografía líquida de alto desempeño (HPLC) a 450nm, con una columna Symmetry® C18 (Waters, EE.UU.). Finalmente, utilizando la curva de calibración determinada por los autores para β-caroteno y los cromatogramas obtenidos (ANEXO C), se calculó el contenido de este compuesto en muestras de zanahoria fresca y deshidratada mediante las distintas técnicas estudiadas. Los porcentajes de retención (%R) se calcularon como:

$$\%R = \frac{\text{cont. carotenoides muestra deshidratada } (\mu g/g \text{ sólidos secos})}{\text{cont. carotenoides zanahoria } (\mu g/g \text{ sólidos secos})} \quad (13)$$

f) Textura

La textura en las hojuelas de zanahoria se determinó adaptando el trabajo de Da Silva y Moreira (2008) utilizando el test de apoyo en tres puntos, en que la muestra se ubica en 2 soportes y la carga es aplicada centralmente (Figura 4-7).

El equipo utilizado fue un texturómetro TA.XT2 Texture Analyzer (Texture Technologies Corp., Scarsdale, EE.UU.), usando una separación entre los soportes de 16 mm y una hoja de acero de 2,5 mm de espesor que fracturaba la muestra al bajar con una velocidad de 10 mm/s. El parámetro utilizado para comparar los chips de zanahoria deshidratados fue la fuerza en el punto de fractura (F_f), que corresponde al punto más alto de la curva fuerza vs. tiempo obtenida con el equipo y que describe la dureza de la muestra (Vincent, 1998). Con el fin de analizar estadísticamente las muestras, se realizaron en triplicado diez repeticiones de las mediciones de textura para cada tratamiento de deshidratación, para poder

disminuir la gran dispersión que se produce naturalmente por la heterogeneidad de las zanahorias a nivel celular (Miranda y Aguilera, 2006).

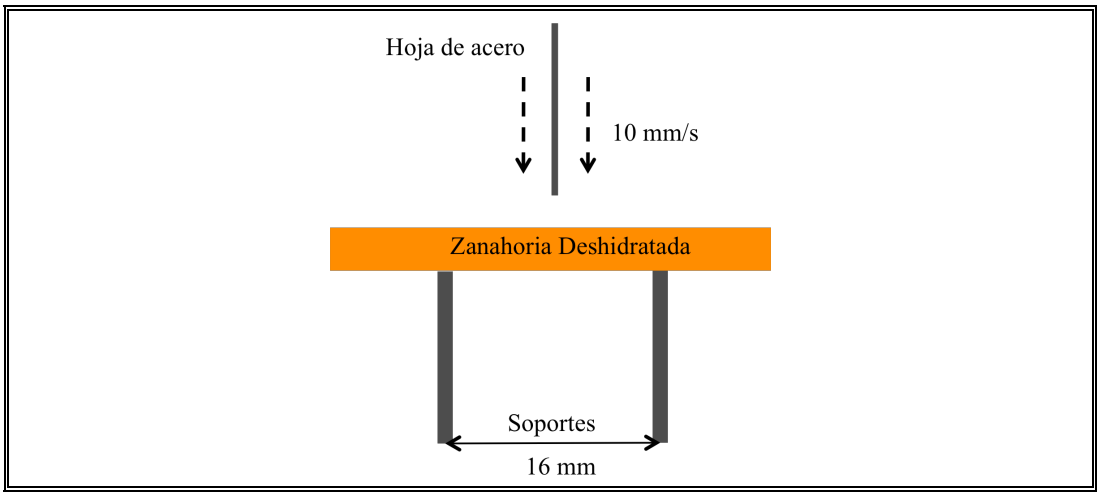


Figura 4-7: Esquema del test de apoyo en tres puntos

4.3.2. Modelación matemática del proceso de secado convectivo

Con los antecedentes presentados en la sección 1.2, fue posible desarrollar un modelo fundamental para estudiar el fenómeno de secado convectivo para hojuelas de zanahoria con difusividad variable. Con este fin, se adaptó el trabajo de Baik y Mittal (2005), desarrollándose una red de n nodos (Figura 4-8) con el fin de convertir la ecuación diferencial parcial de Fick en una dimensión (Ec. 2), en ecuaciones diferenciales ordinarias (Ecs. 13 a 17), utilizando la técnica de diferencias finitas y expansión de la serie de Taylor (Singh, 1983).

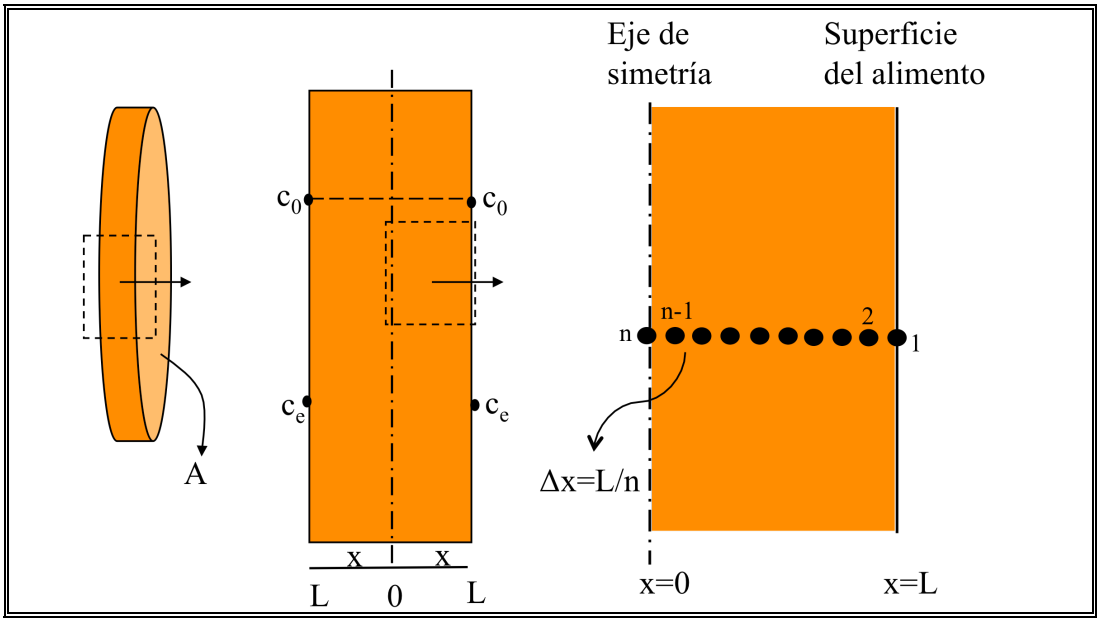


Figura 4-8: Esquema del arreglo de nodos utilizados para la modelación del problema de difusión con difusividad variable

De este modo, para un nodo interior i = 2 hasta n-2, la Ecuación 2 queda:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{(D_{i+1} - D_i)}{\Delta x}\frac{(C_{i+1} - C_i)}{\Delta x} - \frac{D_i(C_{i+1} - 2C_i + C_{i-1})}{\Delta x^2} \tag{14}$$

y simplificando:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = D_{i+1}\frac{(C_{i+1} - C_i)}{\Delta x^2} - D_i\frac{(C_i - C_{i-1})}{\Delta x^2} \tag{15}$$

La condición inicial (Ec. 3), en tanto, y las condiciones de borde (Ecs. 4 y 5) expresadas para los nodos 1 y n, resultan respectivamente en:

$$t = 0:\ C_i = C_0,\ \forall i \tag{16}$$

$$i = 1:\ C_1 = 0,\ \forall t \tag{17}$$

$$i = n: \; C_n = C_{n-1} \rightarrow \frac{\partial C_{n-1}}{\partial t} = -D_{n-1} \frac{(C_{n-1} - C_{n-2})}{\Delta x^2} \tag{18}$$

donde $D_i(C)$ representa la difusividad efectiva en el nodo i (de un total de n nodos), $C_i(t)$ la concentración de humedad en el nodo i para el tiempo t, n es el número de nodos (100 en este caso). La Ec. 16 considera que la humedad inicial se distribuye uniformemente, mientras que la Ec. 17 considera que la superficie tiene una humedad despreciable que no varía con el tiempo (C_{eq}=0) y, finalmente, la Ec. 18 corresponde a la condición de que la transferencia de masa es simétrica (existe un plano de simetría en el nodo n).

La relación entre la difusividad efectiva y el contenido de humedad se determinó con el método de las pendientes (Figura 4-9), que consiste en aplicar logaritmo al desarrollo de la ley de Fick (Ec. 2) utilizando sólo el primer término de la serie (Ec. 19) y graficar $\ln(C/C_0)$ vs. tiempo para cada humedad en base seca (C), obtenida experimentalmente. De este modo, la pendiente entre cada intervalo de tiempo permitió obtener las difusividades efectivas para las humedades promedio de dicho intervalo (Heldman y Lund, 2007).

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = \ln\frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t \tag{19}$$

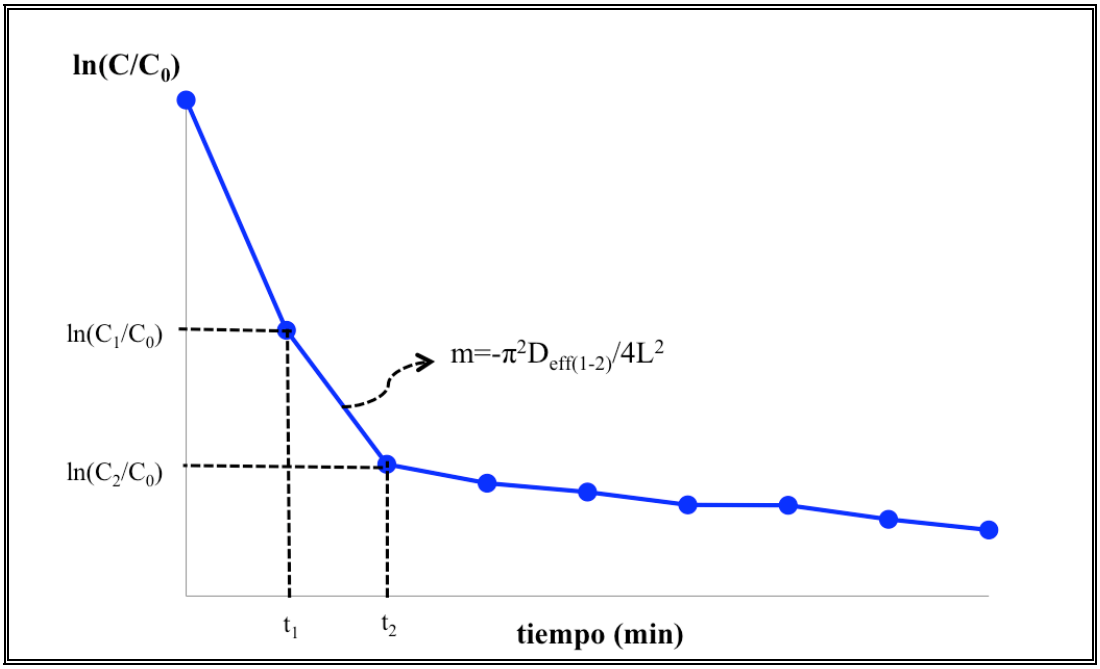


Figura 4-9: Determinación de D_{eff} según el método de las pendientes

Sean los contenidos de humedad (b.s.) C_0, C_1 y C_2 determinados a los tiempos t_0, t_1 y t_2, respectivamente, la pendiente de la curva (Figura 4-9) entre los puntos (t_1, $\ln C_1/C_0$) y (t_2, $\ln C_2/C_0$) se define:

$$m_{1-2} = \frac{\ln C_1/C_0 - \ln C_2/C_0}{t_1 - t_2} = \frac{\ln C_2/C_1}{t_2 - t_1} \qquad (20)$$

Utilizando las Ecuaciones 19 y 20, la difusividad efectiva correspondiente ($D_{eff(1-2)}$) se calcula como:

$$D_{eff(1-2)} = -\frac{\ln C_2/C_1}{t_2 - t_1}\left(\frac{4L^2}{\pi^2}\right) \qquad (21)$$

Una vez obtenidos los distintos valores de D_{eff}, se graficaron para las humedades promedios de cada intervalo y se determinó la relación de estas variables para

distintas temperaturas de secado (60, 80 y 100ºC), utilizando distintos ajustes. Con ayuda de la herramienta *Curve Fitting Toolbox*^{TM} del programa computacional Matlab® (Math-Works Inc., EE.UU.), se evaluaron distintos modelos, en términos del coeficiente de determinación (R^2) y de la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE).

Utilizando la relación encontrada entre la difusividad efectiva (D_{eff}), las magnitudes de los valores de D_{eff} encontrados (para la determinación valores iniciales en la optimización) y el contenido de humedad (C), determinados experimentalmente para cada t, las ecuaciones de diferencias finitas (Ecs. 14 a 18) se resolvieron utilizando también el software Matlab®, utilizando 100 nodos (n=100), con el método Runge Kutta de segundo orden. Se minimizó el error cuadrático medio (Ec. 22) entre la concentración de humedad experimental (medida) C_{exp} y la concentración de humedad promedio (C_{prom}) arrojada por la simulación para cada t (Ec. 23). Como resultado de la optimización, se determinaron los parámetros óptimos de la función $D_{eff}(C)$ utilizada, para las distintas temperaturas. En el Anexo B se adjunta el código computacional utilizado.

$$ECM = \sqrt{\frac{(C_{exp} - C_{prom}(D_i))^2}{N}} \tag{22}$$

$$C_{prom}(t) = \sum_{i=1}^{n} C_i(D_i) \tag{23}$$

A modo de resumen, en la Figura 4-10 se presenta el diagrama de flujo del razonamiento utilizado para la determinación de la D_{eff} en función del contenido de humedad (C) y de la temperatura de secado (T).

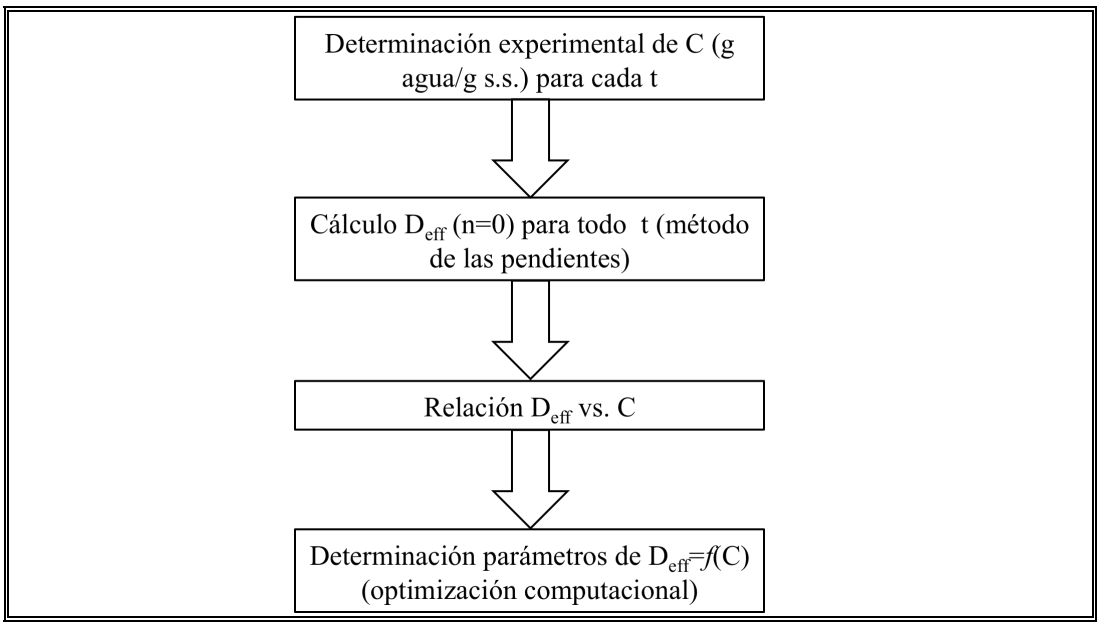


Figura 4-10: Diagrama de flujo para la determinación de D_{eff} en función del contenido de humedad y de la temperatura de secado

4.3.3. Análisis sensorial

Las muestras de zanahoria deshidratadas por los distintos métodos de deshidratación fueron analizadas sensorialmente, de modo de conocer la apreciación organoléptica de los productos. Con este fin, fueron evaluadas sensorialmente con el método *Flash Profile* en el Centro de Aromas (Dictuc S.A.). Esta técnica fue seleccionada debido a que tiene mayor poder de discriminación comparado con los tests descriptivos tradicionales (Delarue y Sieffermann, 2004).

Después de desarrollar el vocabulario descriptivo (apariencia, color, aroma, sabor, textura y retrogusto) necesario para definir los productos, los 8 jueces entrenados rankearon los atributos en una escala de 9 puntos (ANEXO E) en cada producto deshidratado por los distintos métodos. Adicionalmente los jueces fueron consultados acerca de la aceptabilidad general del producto, utilizando la misma escala de 9 puntos (0=indiferente; 5=ni buena ni mala; 9=buena). El ordenamiento

de las muestras según la intensidad percibida de cada atributo fue realizado en duplicado.

Mediante el análisis de varianza (ANOVA), se determinó cuales descriptores eran útiles para describir las muestras con un 95% de certeza y mediante el test de t-student se verificó que no hubiesen diferencias significativas entre muestras en cada atributo. Finalmente se realizó un análisis de los datos recopilados durante la experiencia (promedios, valores p, t-student) con el software Senstools (Compusense® Inc., EE.UU.), desarrollándose mapas sensoriales para cada producto.

4.3.4. Análisis estadístico

Los resultados se analizaron estadísticamente utilizando el software Statgraphics Plus para Windows 5.1 (Statistical Graphics Corp., EE.UU.).

Las características determinadas para los discos de zanahoria fueron comparadas entre los tratamientos, mediante el análisis de varianza (ANOVA) de una vía, para establecer si existían diferencias significativas entre ellas. Para determinar cuáles medias eran significativamente distintas, se utilizó el test de contraste de rango múltiple (test Duncan). En el caso de la no normalidad de los datos, se empleó el test Kruskal-Wallis para determinar si las medianas de los datos presentaban diferencias significativas. En todos los casos se consideró un nivel de confianza de 95%. Las correlaciones de los atributos de calidad determinados por análisis instrumental y sensorial fueron realizadas mediante regresión lineal, calculando el coeficiente de determinación R^2.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presenta el análisis de los principales resultados obtenidos para poder estudiar el efecto de la temperatura y vacío en la calidad de snacks de zanahoria, elaborados mediante la aplicación de vacío a métodos tradicionales de deshidratación. En la primera parte se presenta el estudio del proceso de secado y posteriormente se evalúan instrumental y sensorialmente las hojuelas de zanahoria deshidratadas, de modo de relacionar ambos enfoques de análisis. El desarrollo del análisis estadístico realizado se presenta en el Anexo F.

5.1. Estudio de Procesos de Secado

A continuación se presenta el estudio del secado convectivo y a vacío en hojuelas de zanahorias con el fin de seleccionar las condiciones de operación en estos procesos y así poder investigar posteriormente el efecto de la temperatura y vacío en atributos de calidad en snacks de zanahoria.

5.1.1. Secado convectivo

En el estudio del secado convectivo se presenta en primer lugar la cinética de secado para procesos a temperatura constante, incluyendo la determinación de las difusividades efectivas del agua en la matriz del alimento, en función de la humedad de éste y de la temperatura de proceso. Posteriormente se presenta el establecimiento de procesos que combinan dos temperaturas de secado y la cinética de humedad determinada para estos procesos. Para finalizar, se incluye el estudio de la pérdida de color y del pardeamiento no enzimático para las distintas condiciones de secado convectivo, para determinar las condiciones óptimas de operación para el secado convectivo.

a) Cinética de secado

Con el fin de poder establecer el tiempo necesario para llegar a la humedad final de los productos deshidratados, que según el criterio utilizado corresponde a una actividad de agua de 0,45 (*bubble-end point* de productos fritos), se construyó la isoterma de desorción a 20ºC (Figura 5-1) como una aproximación, pues la humedad de equilibrio de un alimento disminuye al aumentar la temperatura (Geankoplis, 1998). Según esta figura, para las condiciones de secado estudiadas, una actividad de agua de 0,45 corresponde a una humedad (b.s.) de 0,06. En la Figura 5-1 además se presenta la isoterma de sorción para cubos de zanahoria (variedad *Nantaise*) deshidratados por liofilización y equilibrados a distintas humedades relativas a 20ºC (Eichner et al., 1985). Esta gráfica permitió además definir los instantes de transición para los tratamientos que combinan dos temperaturas de secado.

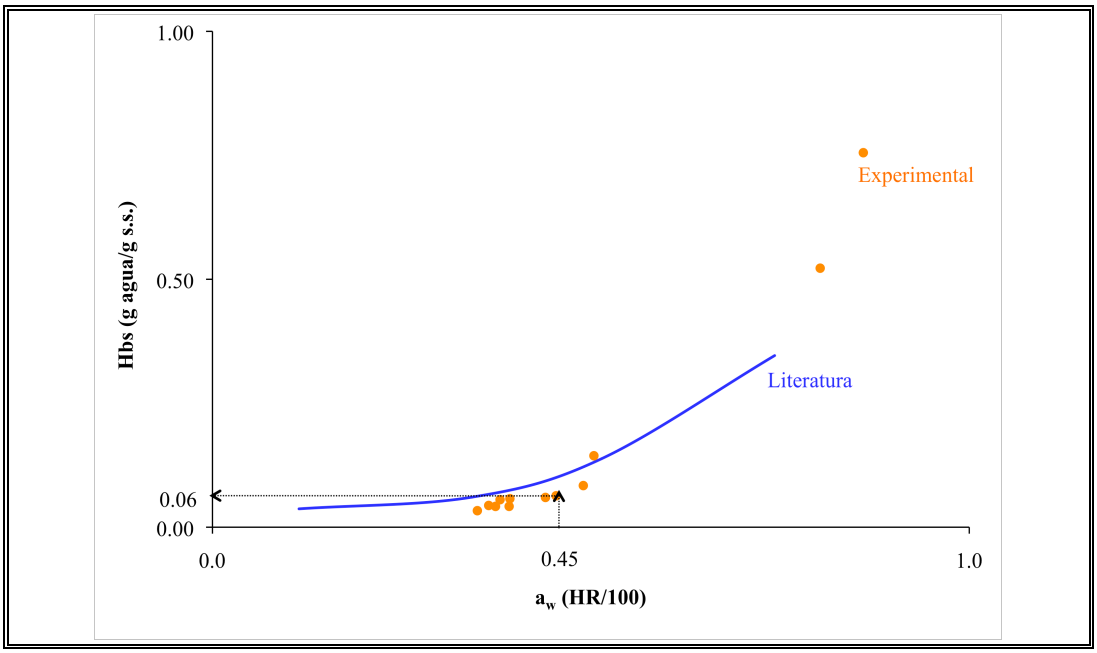


Figura 5-1: Isoterma de desorción a 20ºC para zanahorias deshidratadas. Los puntos naranjas representan los puntos experimentales, mientras que la línea azul los datos de la literatura (Eichner et al., 1985)

i) Cinética de secado para procesos a temperatura constante

En la Figura 5-2 se presenta la pérdida de agua de los chips de zanahoria deshidratados mediante secado convectivo a 60, 80 y 100ºC. Según estos resultados el tiempo necesario para alcanzar una humedad (b.s.) de 0,06 depende de la temperatura del secado convectivo. Así, mayores temperaturas acortan los tiempos de proceso. En el caso del secado a 60ºC no se logró llegar a la humedad deseada en un tiempo menor a 3 horas (criterio de tiempo máximo de proceso fijado en términos de economía), mientras que a 80ºC se tardó 3 horas en llegar a una humedad de 0,06 (b.s.) y a 100ºC sólo 75 minutos.

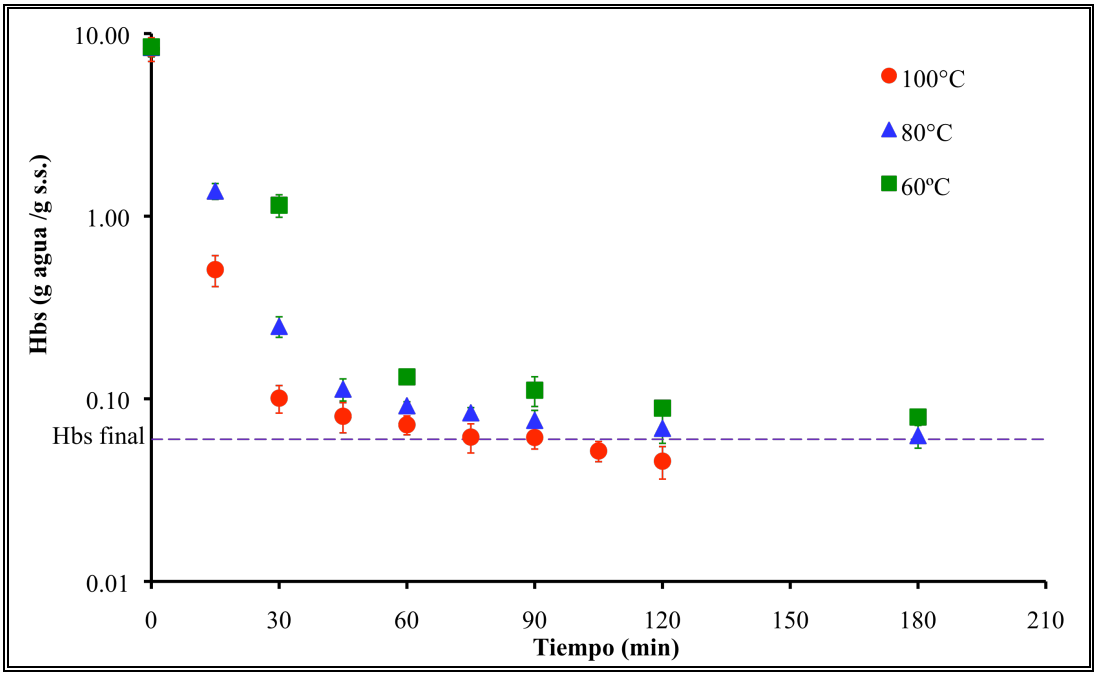


Figura 5-2: Evolución del contenido de agua en hojuelas de zanahoria deshidratadas por secado a 60, 80 y 100ºC. La línea segmentada representa el contenido de humedad final que cumple con el requisito impuesto

El estudio de la cinética de secado convectivo a temperatura constante fue complementado con la determinación de los coeficientes de difusividad efectiva

del agua en la matriz del alimento, en función del contenido de humedad de las hojuelas de zanahoria y de la temperatura de proceso. Tal como fue explicado en el capítulo anterior, en primer lugar se determinaron aproximaciones a las difusividades efectivas a 60, 80 y 100ºC con el método de las pendientes, utilizando las humedades (b.s.) obtenidas experimentalmente, para así poder establecer una relación entre las difusividades efectivas y el contenido de humedad del alimento.

Se compararon distintas funciones, exponenciales y lineales, que relacionaron la difusividad efectiva con el contenido de humedad, a temperatura constante (Tabla V-1) en términos del coeficiente de determinación (R^2) y de la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) para las variables D_i y C_i (difusividad efectiva y contenido de humedad en base seca para la temperatura iºC).

Tabla V-1: Distintos modelos matemáticos utilizados para encontrar una relación entre la difusividad efectiva y el contenido de humedad

MODELO	Ecuación General	Temperatura (ºC)	R^2	RMSE
Exponencial	D_{eff} = a exp (bC) + c exp(dC)	100	0,86	2,26E-10
		80	0,58	2,53 E-10
		60	0,58	1,78 E-10
Lineal	D_{eff} = a lnC + b	100	0,96	1,03 E-10
		80	0,92	9,80 E-11
		60	0,83	9,17 E-11

Se encontró que el mejor ajuste correspondía al modelo lineal, en que $R^2 > 0,83$ y RMSE < 1,03E-10, cuya expresión en términos de C y D_{eff} es:

$$D_{eff} = a \ln C + b \qquad (24)$$

Con la relación encontrada (Ec. 24) se procedió a resolver el problema de difusión de la ley de Fick con difusividad variable utilizando el código computacional (Anexo B) para el secado convectivo para cada una de las temperaturas (60, 80 y 100ºC). Los valores de a y b obtenidos de la simulación (Tabla V-2) permitieron calcular la D_{eff} de zanahorias deshidratadas a 60, 80 y 100ºC con humedades (b.s.) desde 0,045 hasta 8,45. Las difusividades efectivas encontradas fueron desde 4,66E-11 hasta 1,95E-09 $m/s^{2.}$. Los valores de difusividad efectiva determinados son similares a los encontrados por Doymaz (2004), que estudió el efecto de la temperatura (50, 60, 65 y 70ºC), velocidad de aire (0,5 y 1 m/s) y geometría (cubos de aristas de 1 y 2 cm), en la cinética de secado convectivo para cubos de zanahoria. Considerando que la difusividad efectiva sólo dependía de la temperatura y utilizando el método de las pendientes, los autores encontraron valores de D_{eff} que iban desde 0,776 hasta 9,335 *10-9 m/s^2. Por su parte, Ruiz-López et al. (2004) también encontraron resultados similares en el secado convectivo de discos de zanahoria. Los autores estudiaron la transferencia de calor y masa en estado no estacionario, encontrando por el método de las pendientes que el valor de la difusividad efectiva aumenta a medida que lo hace la humedad del alimento, según la relación: D_{eff}= 2,8527 x 10^{-10} exp(0,2283368 C), donde C es la humedad del alimento en base seca.

Tabla V-2: Parámetros de las difusividades efectivas para discos de zanahoria deshidratados a 60, 80 y 100ºC y error cuadrático medio (ECM) de la optimización realizada con software computacional

Temperatura	a	b	ECM
60ºC	2,307E-10	6,797-10	0,0758
80ºC	3,213E-10	9,981E-10	0,0510
100ºC	4,601E-10	1,502E-09	0,0481

Los errores cuadráticos medios (ECM) determinados entre los valores de humedad observados y provistos por el modelo para cada temperatura fueron menores a 0,049 (Tabla V-2), mostrando que efectivamente la transferencia de masa en el proceso de secado estudiado puede modelarse como un problema de difusión con difusividad variable.

Finalmente se incluyó el efecto de la temperatura a la difusividad efectiva. Se supuso que los parámetros encontrados, a y b, eran función de la temperatura (K) según las ecuaciones empíricas definidas como:

$$a = a_0 e^{(-m/T)} \tag{25}$$

$$b = b_0 e^{(-n/T)} \tag{26}$$

Realizando una regresión lineal a los valores encontrados por la simulación, se obtuvo una relación importante ($R^2 > 0,99$) entre los parámetros a y b y la temperatura del secado (Figura 5-3).

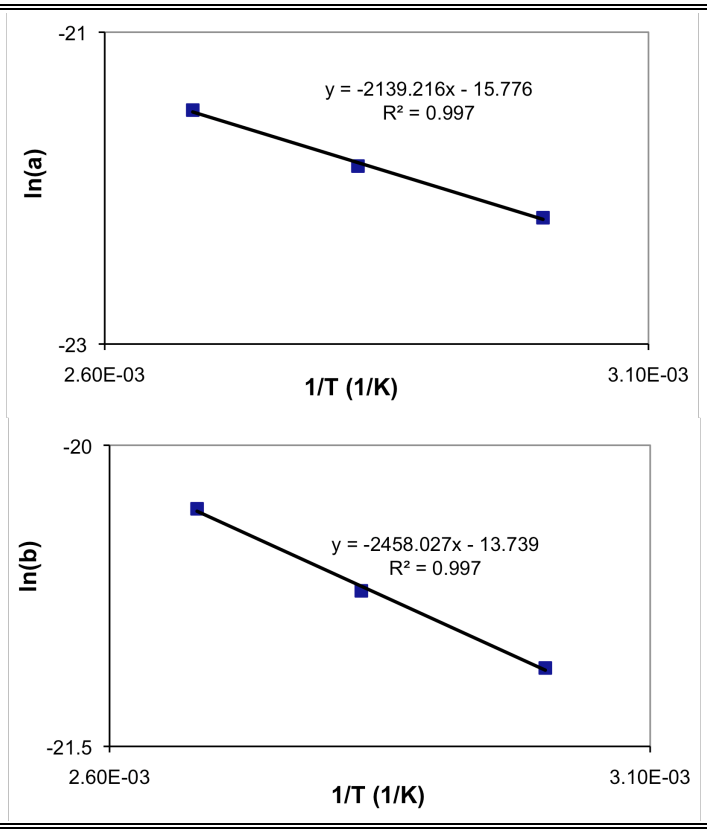


Figura 5-3: Ajuste lineal para los parámetros a y b, en función de la temperatura de secado

En consecuencia, la difusividad efectiva en función del contenido de humedad C y de la temperatura (T en Kelvin) quedaría determinada por la siguiente expresión empírica:

$$D_{eff} = a_0 e^{(-m/T)} * \ln C + b_0 e^{(-n/T)} \qquad (27)$$

y reemplazando con los valores obtenidos resulta:

$$D_{eff} = 1{,}408E-07 * e^{(-2139{,}216/T)} * \ln C + 1{,}080E-06 * e^{(-2458{,}027/T)} \qquad (28)$$

Según la Ecuación 28, la difusividad efectiva del agua en la matriz de los discos de zanahoria, en las condiciones de secado convectivo realizadas, depende del contenido de humedad de la muestra y de la temperatura de proceso, de modo que

aumenta a mayor contenido de humedad y mayor temperatura, tal como lo sugieren Heldman y Lund (2007). De este modo mayores temperaturas estuvieron asociadas a una mayor difusividad efectiva, resultando en una mayor tasa de secado y un menor tiempo para alcanzar la humedad requerida (Figura 5-4). Asimismo, mayores contenidos de humedad se asociaron a mayores difusividades efectivas, que puede ser explicado en términos de que aumenta la disponibilidad de moléculas de agua para la difusión (Xiong et al., 1991).

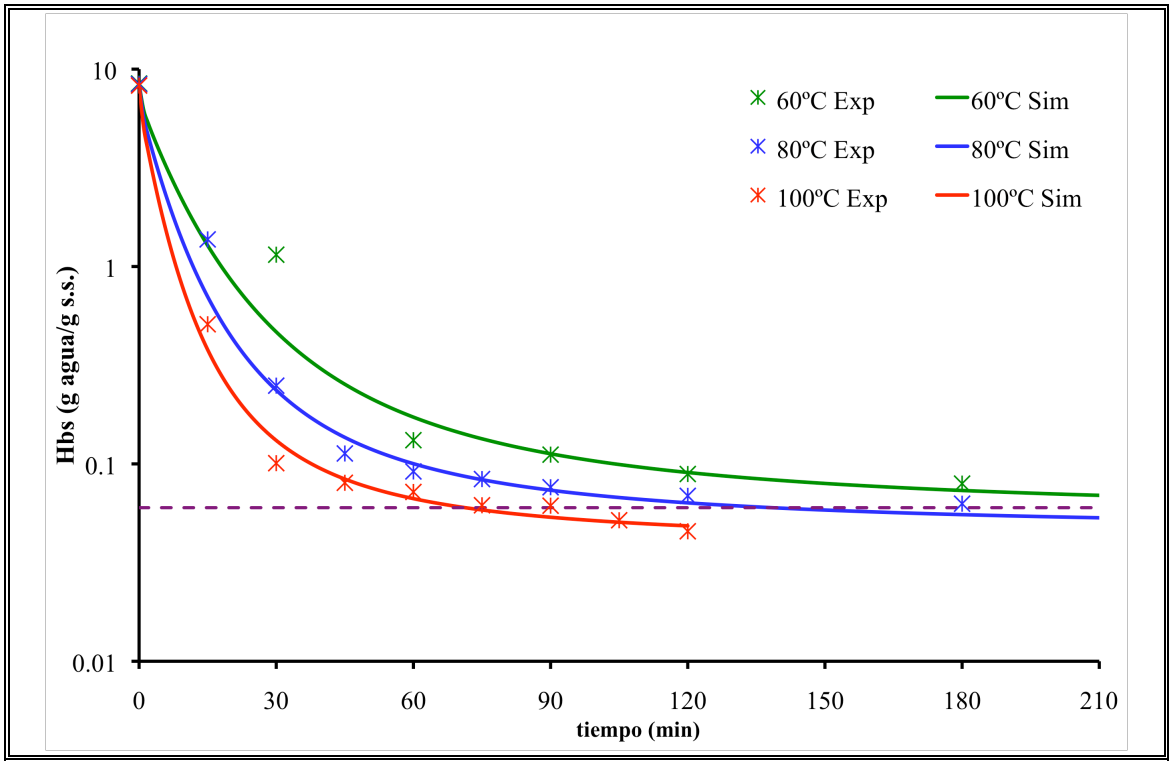


Figura 5-4: Cinética del contenido de agua en hojuelas de zanahoria deshidratadas por secado convectivo a 60, 80 y 100ºC, obtenida por medio de la simulación computacional

Utilizando la expresión empírica presentada en la Ecuación 28, se encontró una buena relación entre las humedades obtenidas experimentalmente y las humedades

encontradas por la simulación realizada (Figura 5-4). Lo anterior sugiere que es posible predecir la pérdida de humedad de los discos de zanahoria deshidratados por secado convectivo, utilizando un coeficiente de difusión variable, función de la humedad de la muestra y de la temperatura de proceso.

ii) Cinética de secado para procesos utilizando dos temperaturas de secado

Considerando que sólo las temperaturas de 80 y 100ºC permitieron alcanzar la humedad deseada en 3 horas o menos, se utilizaron sólo estas temperaturas para la realización de tratamientos combinados (dos temperaturas). Mediante la superposición del gráfico de la ocurrencia de la reacción de Maillard en función de la actividad de agua (Figura 1-5) y la isoterma de desorción obtenida (Figura 5-1), fue posible determinar las humedades (b.s.) correspondientes al inicio y término del peak de esta reacción, que según Labuza (1971) corresponden a una a_w de 0,9 y 0,6, respectivamente. En el caso estudiado, estas actividades de agua correspondieron a humedades (b.s.) de 1,00 y 0,27, respectivamente. De este modo, se establecieron tratamientos de secado con combinación de temperaturas (80 y 100ºC), que, como se ilustra en la Figura 5-4, consistieron en deshidratar las muestras de zanahoria hasta el instante pre o post peak de la reacción de Maillard, con temperaturas de 80 y 100ºC, continuando el secado hasta la humedad requerida con la otra temperatura. El instante de transición se determinó considerando el peak de la reacción de Maillard, la isoterma de desorción (Figura 5-5) y la cinética de secado de ambas temperaturas (Figura 5-2). En la Tabla V-3 se presentan los tratamientos que combinan dos temperaturas de secado, en término de las temperaturas de operación y de los instantes de transición de temperaturas.

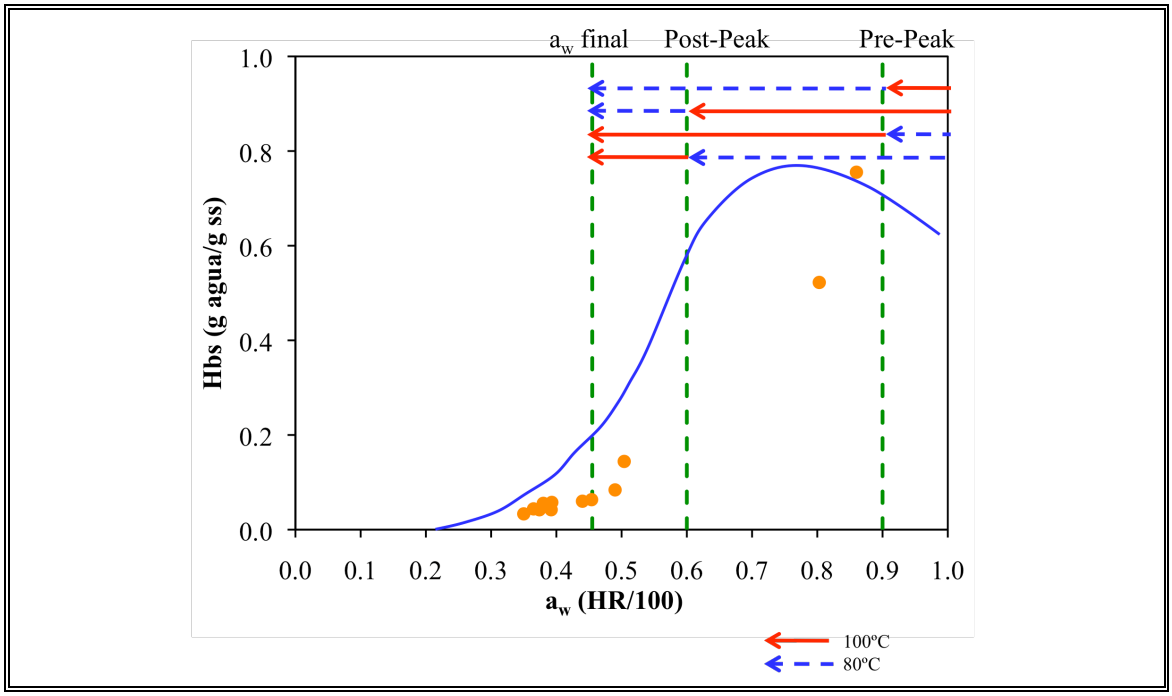


Figura 5-5: Determinación de procesos utilizando dos temperaturas de secado

Tabla V-3: Definición de tratamientos en dos temperaturas de secado y nomenclatura

Secado en dos etapas de temperaturas	Nomenclatura
10 minutos a 100ºC (pre-peak) completando con 80ºC	100ºC pre-peak
20 minutos a 100ºC (post-peak) completando con 80ºC	100ºC post-peak
15 minutos a 80ºC (pre-peak) completando con 100ºC	80ºC pre-peak
30 minutos a 80ºC (post-peak) completando con 100ºC	80ºC post-peak

En el caso de los tratamientos de dos etapas de temperaturas de secado, el tiempo necesario para alcanzar la humedad requerida dependió de la combinación tiempo-temperatura utilizada (Figs. 5-6 y 5-7). Así, los procesos de secado convectivo que

combinaron una temperatura de 80ºC al comienzo, con 100ºC hasta el término del secado, permitieron reducir el tiempo total de secado en, al menos, 45 minutos, en comparación con los tratamientos inversos. En particular, la mayor reducción de tiempo de secado se consiguió utilizando una temperatura de 80ºC por 15 minutos y completando el proceso con 100ºC (80ºC pre-peak), es decir, deshidratando los discos de zanahoria hasta el inicio del peak de la reacción de Maillard con una temperatura baja y completando el proceso con una mayor temperatura. En este caso, la humedad final se alcanzó al cabo de 45 minutos, tiempo incluso menor al que se requirió para el secado a 100ºC (75 minutos).

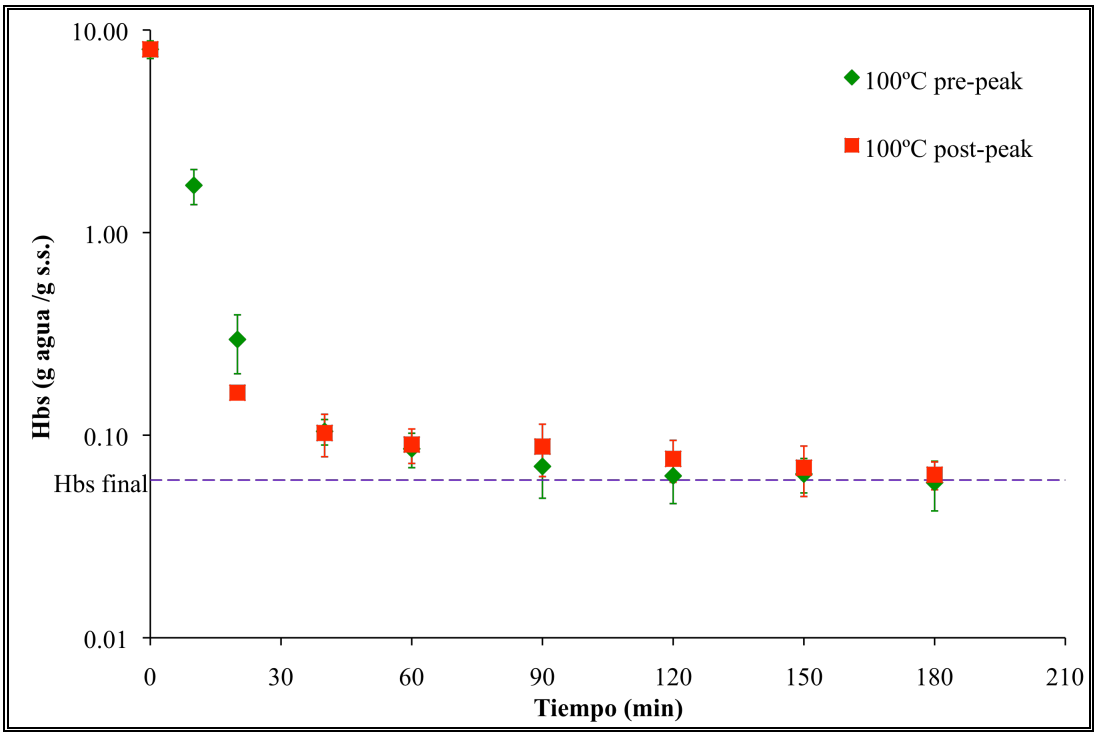


Figura 5-6: Evolución del contenido de agua en chips de zanahoria deshidratadas utilizando dos temperaturas de secado, combinando una temperatura de 100ºC seguida de 80ºC

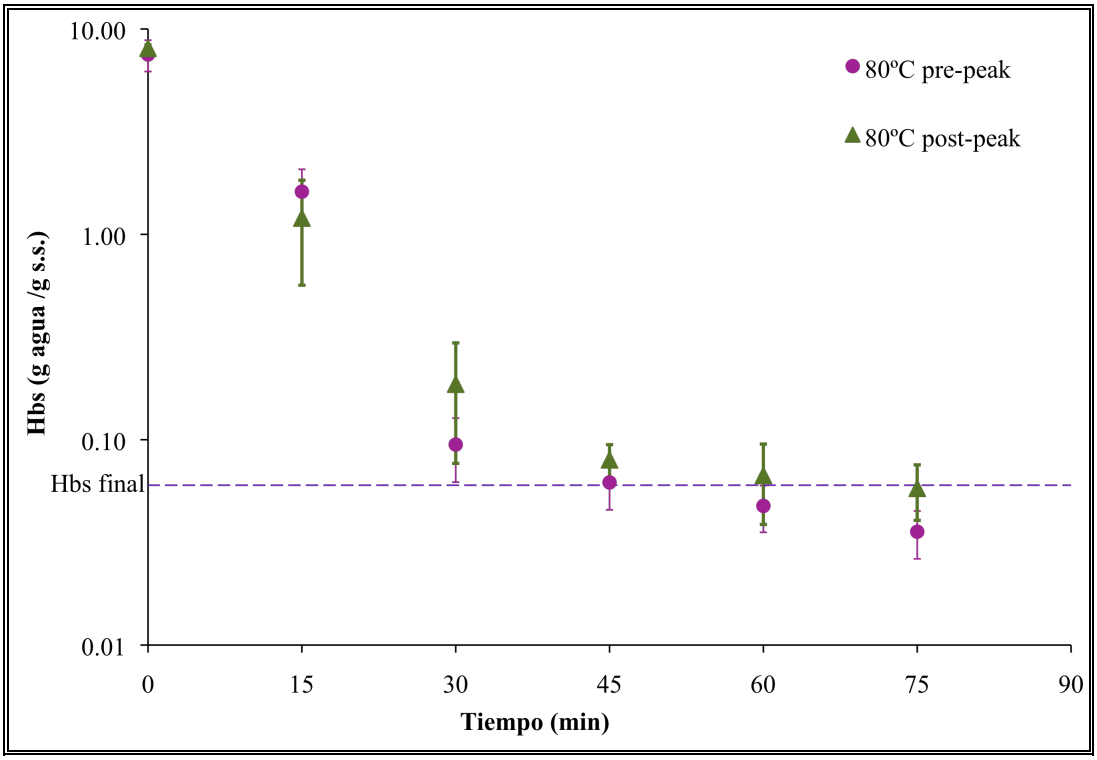


Figura 5-7: Evolución del contenido de agua en chips de zanahoria deshidratadas utilizando dos temperaturas de secado, combinando una temperatura de 80ºC seguida de 100ºC

El instante de transición de temperaturas en los procesos que combinan dos temperaturas de secado también presentó diferencias en el tiempo de secado (Figs. 5-6 y 5-7). Así en el caso en que se comenzó el proceso de secado con 100ºC hasta el inicio del peak, el tiempo requerido para alcanzar la humedad deseada se redujo en 60 minutos, en comparación a realizar el mismo cambio de temperaturas después del peak. Del mismo modo, en el tratamiento de dos etapas de temperaturas de secado que comenzó con 80ºC, aumentar la temperatura antes del peak permitió una reducción del tiempo de proceso en 30 minutos, en relación a la transición de temperaturas después del peak de la reacción de Maillard.

El comportamiento observado se debió a que cuando el secado se realiza a temperaturas altas, se forma en la superficie del alimento una capa de células contraídas que se adhieren unas a otras formando un sello (endurecimiento superficial o *case hardening*), dificultando la salida de agua desde el interior del alimento (Geankoplis, 1998). En este sentido, la utilización de bajas temperaturas seguidas de altas temperaturas, aumenta la velocidad de secado, ya que las bajas temperaturas al comienzo del proceso disminuyen el endurecimiento superficial y la combinación con una alta temperatura favorece la migración de humedad, aumentando la tasa de secado.

b) Selección de las condiciones óptimas para el secado convectivo

Utilizando como criterio el cambio de color de las zanahorias deshidratadas, los índices de pardeamiento no enzimático de la reacción de Maillard y el tiempo de proceso, se determinaron las condiciones óptimas para el secado convectivo, considerando secado en una y dos etapas de temperaturas.

En la Tabla V-4 se presentan los resultados obtenidos experimentalmente de la concentración de compuestos pardos, pérdida de color (ΔE) y tiempo de proceso. En el caso de la concentración de compuestos pardos de Maillard (melanoidinas), relacionados con la absorbancia a 420 nm en base seca (A_{420}/g s.s.), las pruebas realizadas mostraron una diferencia significativa ($p<0,05$) entre los distintos métodos de secado convectivo. Tanto las temperaturas de secado como la combinación de éstas presentaron relación con el pardeamiento no enzimático en zanahorias deshidratadas por secado convectivo. De este modo, mayores temperaturas produjeron mayor concentración de melanoidinas ($p<0,05$). Sin embargo, el tratamiento de dos etapas de temperaturas de secado en que se deshidrató a 100ºC hasta el inicio del peak de la reacción de Maillard y se continuó con 80ºC hasta la humedad requerida, no presentó deferencia significativa ($p>0,05$) con el secado a 80ºC, lo que se puede deber a que, por un lado el pasar por el peak

de la reacción de Maillard a bajas temperaturas es beneficioso en cuanto a la menor concentración de melanoidinas y a que el tiempo en que las hojuelas se expusieron a 100ºC no fue suficiente para que la superficie del alimento alcanzara altas temperaturas.

Tabla V-4: Parámetros de calidad en snacks de zanahoria deshidratados mediante secado convectivo en una y dos etapas de temperaturas de secado

Proceso de Secado	Proceso de secado	ΔE	A_{420}/g s.s.	tiempo (min)
Una etapa de temperatura	80ºC	8,73 ± 2,53a	0,115 ± 0,013a	180
	100ºC	16,13 ± 4,37b	0,332 ± 0,037d	75
Dos etapas de temperaturas	100ºC pre-peak	9,53 ± 2,42a	0,125 ± 0,011a	120
	100ºC post-peak	10,08 ± 2,84a	0,172 ± 0,014b	180
	80ºC pre-peak	15,49 ± 4,10b	0,188 ± 0,008b	45
	80ºC post-peak	18,03 ± 2,79b	0,278 ± 0,038c	75

Nota: las letras iguales, indicadas al lado de cada valor, significan que no hay diferencias significativas entre tratamientos ($p<0,05$).

En esta línea Eichner et al. (1985) estudiaron la relación entre la concentración de compuestos de la reacción de Maillard y las condiciones de secado convectivo de zanahorias en dos etapas de temperaturas, comparando el efecto del instante de transición (10, 20 y 30 minutos) de temperaturas (110ºC a 60ºC) en la concentración de estos compuestos. Los autores encontraron que el secado realizado a 110ºC por 10 minutos completando el proceso hasta alcanzar la humedad requerida a 60ºC, permitía reducir el pardeamiento. Los autores comentan que tipo proceso de secado en dos etapas de temperaturas mejora la calidad de zanahorias deshidratadas, pues utiliza bajas temperaturas, cuando el contenido de agua es crítico para el pardeamiento no enzimático.

En cuanto a la pérdida de color (ΔE), se presentaron diferencias significativas ($p<0,05$) entre este atributo y los tratamientos de secado convectivos estudiados, distinguiéndose dos grupos homogéneos entre sí (Tabla V-4). La retención de color se vio afectada significativamente ($p<0,05$) con la temperatura de proceso. De esta forma, el secado a 80ºC y el secado en dos etapas, que combina temperaturas de 100ºC al inicio del secado con 80ºC, fueron los que presentaron mayor conservación del color natural de zanahoria ($p<0,05$), pues estos tratamiento deben haber limitado la exposición de la superficie del alimento a altas temperaturas, a pesar de corresponder a los mayores tiempos de secado.

La variación de color (ΔE) es un parámetro de calidad crítico, pues incluye todas las reacciones de deterioro que ocurren durante el procesamiento de alimentos, incluyendo el pardeamiento no enzimático. En la literatura se relaciona frecuentemente la reacción de Maillard con la disminución de la luminosidad (L*) y aumento del tono rojo (a*), resultando en un mayor cambio de color (ΔE). En este sentido Quintas et al. (2007) modelaron el cambio de color (ΔE) durante el pardeamiento no enzimático en términos del cambio de color. Los autores encontraron que la concentración de hidroximetilfurfural, un producto de la reacción de Maillard, se correlaciona adecuadamente con el cambio de color (R^2=0,7). Considerando los resultados obtenidos de la pérdida de color y de la concentración de melanoidinas obtenidos en este trabajo, se observó el mismo fenómeno entre estos parámetros, mayor concentración de melanoidinas se relacionó con mayor pérdida de color (ΔE), con un coeficiente de regresión R^2 de 0,84 y $p<0,05$, explicado en parte porque las melanoidinas son polímeros que otorgan el carácter pardo a las muestras (Davies y Labuza, 1997), luego, mayores valores de la absorbancia a 420 nm, y por otro lado, esto resultaría también en mayor pérdida de color.

De acuerdo a los resultados expuestos en esta sección del estudio de secado convectivo, se encontró que tanto la temperatura de proceso como el contenido de agua fueron determinantes en la pérdida de agua, en la concentración de melanoidinas y en la pérdida de color. Menores temperaturas de secado estuvieron relacionadas con mayores tiempos de proceso, lo que se vio reflejado en valores más bajos de la difusividad efectiva arrojados por la modelación. Sin embargo, fue beneficioso en términos de que se produjo menor pérdida nutricional, reflejada en mayor preservación del color natural de la zanahoria.

Tomando en consideración el peak de la reacción de Maillard, el desarrollo de procesos que utilizan dos temperaturas de secado, permitió reducir en algunos casos el tiempo de proceso y, en otros, la pérdida nutricional de las hojuelas de zanahoria deshidratadas. Específicamente, el proceso que se comenzó con una temperatura de 100ºC hasta el inicio del peak y se completó con 80ºC hasta la humedad requerida (0,06 en b.s.), fue beneficioso en ambos aspectos, lográndose alcanzar la calidad de las hojuelas deshidratadas a 80ºC, pero reduciendo el tiempo de proceso en una hora, razones por las cuales estas condiciones fueron seleccionadas como óptimas del secado convectivo.

5.1.2. Secado a vacío

En esta sección se presenta la pérdida de agua en función de la temperatura del secado a vacío (presión de 49 mmHg) de hojuelas de zanahoria, con el fin de determinar la temperatura de operación que permite deshidratar las hojuelas de zanahoria hasta la humedad requerida (0,06 en b.s.) en un tiempo igual al requerido por el tratamiento óptimo de secado convectivo, que según la sección anterior fue de 2 horas.

Tabla V-5: Pérdida de agua en 120 minutos para el secado a vacío (49 mmHg) para distintas temperaturas

Temperatura (ºC)	Hbs (g agua/g s.s.)
50	0,118 ± 0,007
60	0,060 ± 0,002
70	0,040 ± 0,002

En la Tabla V-5 se presenta la pérdida de agua, en un tiempo de 2 horas, en función de la temperatura de secado a vacío. De acuerdo a estos resultados, la mínima temperatura que permitió deshidratar las hojuelas de zanahoria hasta una humedad (b.s.) de 0,06 en un tiempo de 2 horas, fue 60ºC, por lo que esta condición fue la seleccionada para los posteriores análisis.

Por lo tanto, la incorporación de vacío a la técnica de secado permitió utilizar menores temperaturas de operación que el secado convectivo, considerando el mismo tiempo de proceso y humedad final del producto alcanzado en dicho proceso.

5.2. Estudio de Atributos de Calidad de Hojuelas de Zanahorias Deshidratadas Mediante Fritura y Secado

En esta sección se presenta la comparación de atributos de calidad de procesos tradicionales de deshidratación, con y sin la aplicación de vacío, estudiándose mediante análisis instrumental y sensorial, el efecto de la temperatura y vacío en hojuelas de zanahoria deshidratadas. En primer lugar se presenta la determinación de atributos de calidad mediante procedimientos instrumentales y se complementa el estudio con la evaluación sensorial de chips de zanahoria elaborados utilizando las distintas técnicas de deshidratación: secado convectivo, secado a vacío, fritura atmosférica y fritura a vacío.

5.2.1. Evaluación instrumental

Los parámetros de calidad que se utilizaron para comparar los distintos procesos de deshidratación fueron: la retención de *trans* β-caroteno, la concentración de compuestos pardos de la reacción de Maillard (melanoidinas), la pérdida del color natural de zanahoria (ΔE) y la fuerza de fractura (F_f) en hojuelas de zanahoria deshidratadas. La elección de estos parámetros se basó en que se pretendió evaluar la calidad nutricional (*trans* β-caroteno y compuestos pardos) y calidad organoléptica (color y textura) de hojuelas de zanahoria deshidratadas mediante métodos tradicionales de deshidratación con y sin la aplicación de vacío.

En el caso de la retención de *trans* β-caroteno, las pruebas realizadas arrojaron una diferencia significativa ($p<0,05$) entre los distintos métodos de deshidratación (Tabla V-6). La incorporación de vacío, tanto en la fritura como en el secado, permitió aumentar significativamente ($p<0,05$) la retención de *trans* β-caroteno en comparación con los procesos desarrollados en condiciones atmosféricas, sin embargo no se encontraron diferencias significativas ($p>0,05$) entre la fritura a vacío y el secado a vacío, por operar a la misma presión y debido a que en ambos casos la temperatura de proceso es inferior a 105ºC (Chen et al.,1995). El efecto de las temperaturas también se hizo evidente en la degradación del *trans* β-caroteno, de este modo la fritura atmosférica (160ºC) presentó una retención de *trans* β-caroteno 50% menor que todos los otros métodos de deshidratación estudiados, mientras que no se encontraron diferencias significativas ($p<0,05$) entre los procesos realizados con temperaturas similares (secado convectivo y fritura a vacío). Los resultados presentados son similares a los reportados en la literatura para el secado (Suvarnakuta et al., 2005) y la fritura (Dueik et al., 2009), en que se expone que tanto menores temperaturas de proceso como la incorporación de vacío, permitirían una mayor retención de *trans* β-caroteno en zanahoria deshidratada.

Tabla V-6: Parámetros de calidad determinados instrumentalmente de hojuelas de zanahoria obtenidas mediante distintas técnicas de deshidratación

Proceso de Deshidratación	Tiempo (min)	ΔE	$\%R_{\beta\text{-carot}}$	A_{420}/g s.s.	F_f (N)
Secado convectivo (100ºC pre-peak)	120	9,53 ± 2,42a	80,58 ± 4,43b	0,125 ± 0,011b	4,49 ± 0,83a
Secado a vacío (60ºC)	120	6,75 ± 1,09a	85,56 ± 4,69a	0,089 ± 0,009a	8,09 ± 0,97b
Fritura atmosférica (160ºC)	3	41,04 ± 1,83b	33,49 ± 2,03c	0,664 ± 0,028c	4,68 ± 0,83a
Fritura a vacío (98ºC)	5	8,29 ± 2,45a	83,82 ± 4,76ab	0,137 ± 0,014b	5,42 ± 0,71a

Nota: las letras iguales, indicadas al lado de cada valor, significan que no hay diferencias significativas entre tratamientos ($p<0,05$).

La concentración de compuestos pardos fruto de la reacción de Maillard, expresada en la absorbancia a 420 nm en base seca (A_{420}/g. s.s.), presentó diferencias significativas ($p<0,05$) entre los distintos procesos de deshidratación (Tabla V-6). La incorporación de vacío a los métodos de deshidratación permitió reducir la concentración de melanoidinas (menores A_{420}/g. s.s) tanto en el secado como en la fritura en un 29% y 79%, respectivamente. La temperatura también influyó en la concentración de compuestos pardos, donde mayores temperaturas estuvieron relacionadas con mayores concentraciones de melanoidinas, mientras que temperaturas similares (secado convectivo y fritura a vacío) no mostraron diferencias significativas entre sí ($p>0,05$), a pesar de que el tiempo de exposición es radicalmente distinto. Resultados similares encontraron Leeratanarak et al. (2006), estudiando la calidad de rodajas de papas deshidratadas mediante secado convectivo y secado con vapor sobrecalentado a baja presión. Los autores

encontraron que tanto bajas temperaturas, como bajas presiones, resultaron ser beneficiosos en términos de producir menor pardeamiento no enzimático.

En cuanto a la variación del color, se observó una diferencia significativa ($p<0,05$) entre la variación del color (ΔE) y los procesos de deshidratación analizados, diferenciándose dos grupos homogéneos entre sí. Las hojuelas sometidas a fritura atmosférica (160ºC) presentaron una pérdida de color significativamente mayor ($p<0,05$) a las demás, las cuales no mostraron ser diferentes entre sí (Tabla V-6). Mariscal y Bouchon (2008), estudiaron la incorporación de vacío a la fritura en rodajas de manzana, encontrando que la fritura a vacío permitía reducir la pérdida de color significativamente en comparación con la fritura atmosférica, para una misma fuerza motriz (ΔT). Las inspecciones visuales (Figura 5-8) confirman los resultados obtenidos con el análisis de imágenes (ΔE). Las hojuelas de zanahoria deshidratadas por fritura atmosférica fueron las que presentaron menor conservación del color natural de zanahoria, con superficies más oscuras, en comparación a las demás muestras deshidratadas mediante secado convectivo, secado a vacío y fritura a vacío.

La intensidad de las reacciones de deterioro determinadas, reacción de Maillard (expresada en A_{420}/g s.s.) y degradación de *trans* β-caroteno ($\%R_{\beta\text{-carot}}$), presentaron una fuerte correlación con la variación de color (ΔE), con un coeficiente R^2 de 0,99 en ambos casos. El cambio de color producido se explica con que la ocurrencia de la reacción de Maillard produce melanoidinas, que son pigmentos pardos (Davies y Labuza, 1997) y porque la degradación de *trans* β-caroteno reduce el color anaranjado, pues los carotenoides son también pigmentos (Rodríguez-Amaya, 2001).

Figura 5-8: Fotografías de discos de zanahorias deshidratadas mediante distintas técnicas de deshidratación

La textura de las muestras, analizada mediante la fuerza de fractura (F_f), mostró diferencias significativas ($p<0,05$) entre los métodos de deshidratación, distinguiéndose 2 grupos homogéneos entre sí. Aunque la incorporación de vacío en la fritura no presentó diferencias significativas ($p>0,05$) tal como sugieren Da Silva y Moreira (2008), en el caso del secado la utilización de vacío provocó que las hojuelas presentaran una fuerza de fractura significativamente ($p<0,05$) superior, y por ende una dureza mayor a las demás analizadas (Tabla V-6). Este comportamiento se puede deber a que la temperatura óptima de activación de la enzima pectina metil esterasa, presente en la pared celular de las células vegetales, es de 76,7ºC para zanahorias (Lee et al., 1979). Según el autor la activación de la enzima hace posible que se liberen grupos carboxilos de la molécula de pectina, favoreciendo a interacciones con iones de calcio que están presentes en el tejido, alterando las propiedades estructurales.

Considerando los atributos de calidad determinados instrumentalmente, presentados en esta sección, la incorporación de vacío a la fritura permitió reducir significativamente el pardeamiento no enzimático, la degradación de *trans* β-caroteno y la pérdida de color natural de las zanahorias, sin alterar la textura. Sin embargo, en el caso del secado, aunque la incorporación de vacío presentó ventajas nutricionales, perjudicó la textura de las hojuelas, aumentando la fuerza de fractura al doble. Considerando lo anterior y que la fritura incorpora materia grasa al alimento, y por ello reduce el valor nutricional del alimento, el secado convectivo presentaría los mayores beneficios, por cuanto permitió una mejor conservación de las características nutricionales y organolépticas de las zanahorias frescas, minimizando la ocurrencia del pardeamiento no enzimático, la degradación de *trans* β-caroteno y la pérdida de color, permitiendo el desarrollo de una textura similar a la de los productos fritos. No obstante lo anterior, la determinación instrumental de los parámetros de calidad en alimentos sólo es válida si son apoyadas por análisis sensoriales.

5.2.2. Evaluación sensorial

Los atributos de calidad que se utilizaron para comparar los distintos procesos de deshidratación fueron: la apariencia, el aroma, el sabor, el retrogusto y la textura en hojuelas de zanahoria deshidratadas mediante procesos tradicionales de deshidratación, con y sin la aplicación de vacío. Los descriptores generados (color natural de zanahoria, aroma tostado, sabor a zanahoria natural, sabor amargo, retrogusto amargo y crocancia) fueron discriminantes entre las muestras con un 95% de confianza. La intensidad con que cada juez evaluó cada atributo fue desarrollada en una escala de 9 puntos, en que 0 representó que no se percibe el atributo y 9 que el atributo fue intensamente percibido.

La evaluación de las intensidades promedio de los descriptores generados, indicó que las cuatro muestras evaluadas (secado convectivo, secado a vacío, fritura

atmosférica y fritura a vacío) presentaron perfiles sensoriales distintos. La fritura atmosférica, técnica comúnmente utilizada para el desarrollo de snacks, se caracterizó por producir mayor sabor y retrogusto amargo, mayor aroma a tostado y menor color y sabor natural a zanahoria, en comparación con las demás técnicas de deshidratación utilizadas (Figura 5-9).

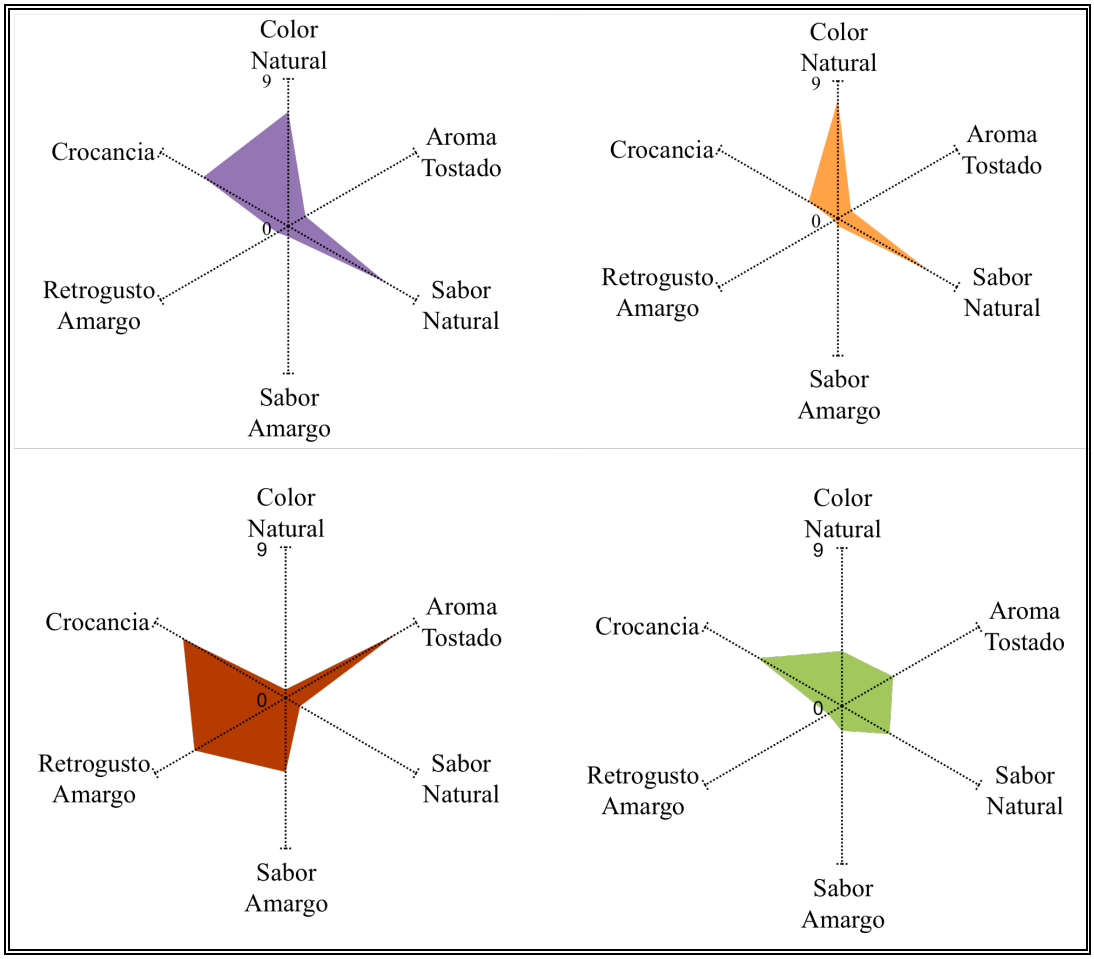


Figura 5-9: Perfiles sensoriales de hojuelas de zanahoria deshidratadas mediante secado convectivo, secado a vacío, fritura atmosférica y fritura a vacío

En la Tabla V-7 se presenta la evaluación por puntuación de cada muestra con los promedios obtenidos de los datos de los 8 panelistas en duplicado, para cada

atributo evaluado. La evaluación del aroma tostado se relacionó con el método de deshidratación de los chips de zanahoria, siendo afectado significativamente ($p<0,05$) por las condiciones utilizadas para su elaboración. Las muestras obtenidas mediante fritura atmosférica presentaron aroma a tostado significativamente ($p<0,05$) mayor a las desarrolladas mediante las otras técnicas de deshidratación. El secado (convectivo y a vacío), en tanto, fue el método que indujo menor aroma a tostado en las hojuelas de zanahoria deshidratadas (Tabla V-7). La percepción de aroma a tostado se correlacionó con la concentración de melanoidinas determinadas experimentalmente con un R^2 de 0,92, mostrando que la concentración de compuestos pardos se puede relacionar con la formación de compuestos volátiles, responsables del desarrollo de aromas, ambos frutos de la reacción de Maillard.

Tabla V-7: Atributos de calidad determinados mediante evaluación sensorial a chips de zanahoria deshidratadas mediante distintas técnicas de deshidratación

Proceso \ Atributos	Color Zanahoria	Aroma Tostado	Sabor Zanahoria	Sabor Amargo	Retrogusto Amargo	Crocancia
Secado convectivo (100ºC pre-peak)	7,00 a	1,21 c	6,93 a	0,64 b	0,79 b	6,00 a
Secado a vacío (60ºC)	7,79 a	1,00 c	6,93 a	0,5 b	0,29 b	2,21 b
Fritura atmosférica (160ºC)	0,50 c	7,64 a	1,00 c	4,43 a	6,29 a	7,07 a
Fritura a vacío (98ºC)	3,07 b	3,29 b	3,07 b	1,36 b	0,86 b	5,36 a

Nota: las letras iguales, indicadas al lado de cada valor, significan que no hay diferencias significativas entre tratamientos ($p<0,05$).

El carácter amargo en el sabor y en el retrogusto se vio afectado por las temperaturas a las cuales fueron deshidratadas las muestras de zanahoria,

independiente del método de deshidratación. De este modo, fue significativamente mayor ($p<0,05$) para las muestras deshidratadas mediante fritura atmosférica, que se efectuó a una temperatura considerablemente mayor a las utilizadas en los otros procesos de deshidratación. Como fue mencionado previamente, la alteración del sabor es otro efecto de la reacción de Maillard, por la generación de compuestos de bajo peso molecular que tienden a dar un sabor tostado y amargo a los alimentos sometidos a altas temperaturas (Berlitz et al., 2009). Al igual que en el caso del aroma a tostado, el carácter amargo se pudo relacionar con la concentración de compuestos pardos de la reacción de Maillard, encontrando un R^2 de 0,98 y 0,99 entre la concentración de melanoidinas y el sabor y retrogusto amargo, respectivamente.

La evaluación de la textura desarrollada en las hojuelas de zanahoria deshidratadas, evaluada con la crocancia, presentó una diferencia significativa ($p<0,05$) entre el secado a vacío y los demás métodos de deshidratación, los que no presentaron diferencias significativas ($p>0,05$) entre sí. De este modo, los chips de zanahoria deshidratados mediante secado a vacío presentaron una crocancia significativamente ($p<0,05$) menor a las demás hojuelas de zanahoria deshidratadas. Las características sensoriales de textura y las determinadas instrumentalmente presentaron un R^2 de 0,94, mostrando que la fuerza de fractura (F_f) fue un buen predictor de la crocancia de las hojuelas de zanahoria deshidratadas, en que menores valores de la fuerza de fractura estuvieron relacionados con mayor crocancia, tal como lo sugieren Segnini y Dejmek (1999) que estudiaron la relación entre el análisis sensorial e instrumental en papas fritas comerciales, encontrando una correlación importante entre la fuerza de fractura y todos los atributos sensoriales estudiados. Es así como la baja crocancia percibida en las hojuelas deshidratadas por secado a vacío puede ser explicada en términos de que la incorporación de vacío permitió el desarrollo de una textura distinta a las otras muestras, producto de que al utilizar una temperatura de 60ºC, la enzima pectina metil esterasa no se alcanza a activar (Lee et al., 1979). Luego, a pesar de

llegar a la misma actividad de agua en todos los procesos de deshidratación, no sólo no tienen el mismo contenido de humedad, sino que la estructura formada debió haber sido distinta. En el caso del secado a vacío, la textura resultó ser con mayor dureza, reflejada en una mayor fuerza de fractura y menor crocancia.

La técnica de deshidratación utilizada mostró influenciar significativamente ($p<0,05$) el color y el sabor "natural" de las hojuelas de zanahoria, distinguiéndose en ambos casos 3 grupos homogéneos entre sí. El secado convectivo y el secado a vacío fueron los que permitieron mejor conservación del color y sabor natural de zanahoria en las muestras. Las hojuelas elaboradas por fritura atmosférica, en tanto, presentaron significativamente ($p<0,05$) mayor pérdida de color y de sabor natural de zanahoria, por la alta temperatura que se utiliza (160ºC). Las mediciones instrumentales de la pérdida de color (ΔE) y de la retención de *trans* β-caroteno, determinadas en la sección anterior, muestran el mismo comportamiento determinado con el análisis sensorial, presentándose un R^2 de 0,65 y 0,62 entre el ΔE y la valoración del color y sabor de las muestras, respectivamente. En el caso de la retención de *trans* β-caroteno, se encontró un R^2 de 0,63 y 0,60 entre este atributo y la preservación del color y sabor natural a zanahoria de las muestras, respectivamente. Si bien los valores de R^2 encontrados para estas correlaciones son más bajos que los encontrados para las expuestas anteriormente, los resultados arrojados del análisis instrumental y sensorial presentan las mismas tendencias, so se consideran los valores que son "significativamente" distintos. Por su parte Labuza (1983) argumenta que aunque para estudios químicos los valores de R^2 son generalmente mayores que 0,95, mientras que en investigación de productos agrícolas, valores de 0,6 a 0,7 son igualmente aceptables.

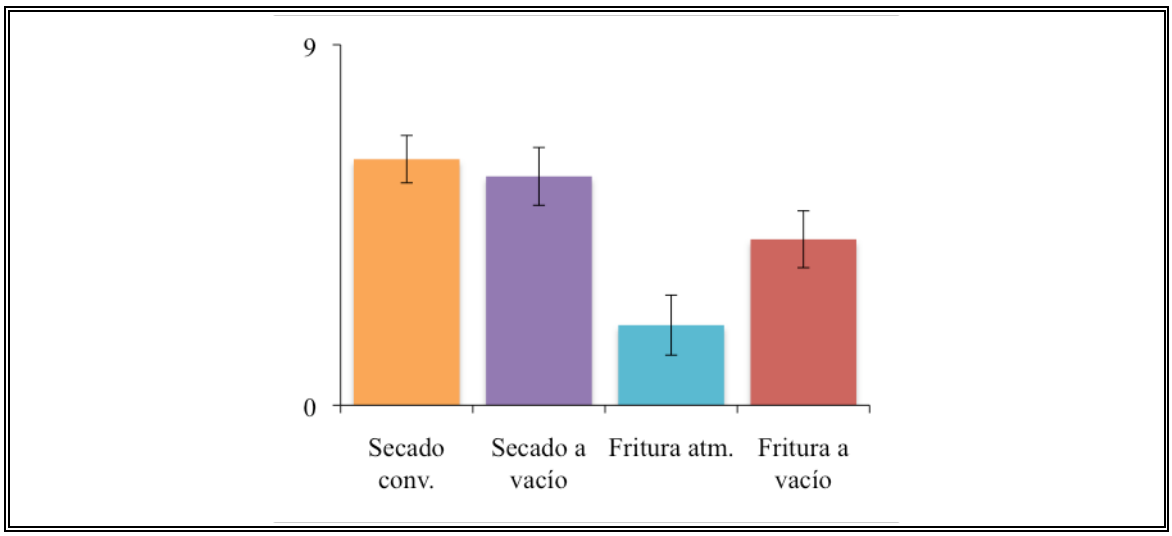


Figura 5-8: Aceptabilidad general de muestras deshidratas mediante distintos métodos de deshidratación, utilizando una escala de 9 puntos

En cuanto a la aceptabilidad general (Figura 5-8), que se refiere a la evaluación en una escala de 9 puntos del gusto (9) o desagrado (0) de los jueces de las muestras de hojuelas deshidratadas mediante distintos métodos de deshidratación, las muestras mejor evaluadas fueron las desarrolladas por secado convectivo y secado a vacío, sin presentarse diferencias significativas entre sí, mientras que la más baja aceptación se presentó en las hojuelas fritas atmosféricamente. La relación entre la aceptabilidad general y los atributos sensoriales se presenta en la Tabla V-8, en que se observa que a excepción de la textura, todos los atributos de calidad se correlacionaron con la aceptabilidad general de las muestras de zanahoria deshidratadas mediante secado convectivo, secado a vacío, fritura atmosférica y fritura a vacío. Este fenómeno indicaría que los panelistas no le otorgaron mayor importancia a las diferencias encontradas en el desarrollo de texturas de las hojuelas obtenidas por los distintos métodos de deshidratación.

Tabla V-8: Correlación entre aceptabilidad general y atributos de calidad determinados mediante evaluación sensorial a hojuelas de zanahoria deshidratadas mediante distintas técnicas de deshidratación

Atributo de Calidad	R^2
Color Natural a Zanahoria	0,94
Aroma Tostado	0,97
Sabor Natural a Zanahoria	0,95
Sabor Amargo	0,92
Retrogusto Amargo	0,81
Textura Crocante	0,36

De acuerdo a lo expuesto en esta sección, la evaluación sensorial de los atributos de calidad de chips de zanahoria se correlacionó adecuadamente con los parámetros determinados experimentalmente, encontrando que las mejores correlaciones fueron las que relacionaron el pardeamiento no enzimático con los parámetros sensoriales: aroma tostado y sabor y retrogusto amargo, y el desarrollo de texturas: crocancia (atributo sensorial) con fuerza de fractura (parámetro instrumental). Del análisis sensorial se encontró que la incorporación de vacío a la fritura permitió mejorar los atributos de calidad relacionados con las características nutricionales y organolépticas, sin alterar la crocancia encontrada en las muestras obtenidas por fritura en condiciones atmosféricas. Sin embargo, en el caso del secado, la incorporación de vacío no presentó ventajas organolépticas importantes, e incluso perjudicó la crocancia de las hojuelas. Además se observó que la aceptabilidad general, determinada por los panelistas, de las hojuelas de zanahoria deshidratadas se relacionó fuertemente con los parámetros de calidad determinados sensorialmente, a excepción de la crocancia, encontrando que los panelistas no le dieron mucha importancia a las diferencias en textura de las muestras de zanahoria deshidratadas.

6. CONCLUSIONES

La incorporación de vacío en los procesos de deshidratación tradicionales (secado y fritura) permitió obtener hojuelas de zanahoria con características nutricionales ventajosas, en términos de una mayor retención de *trans* β-caroteno y una menor concentración de compuestos pardos en relación a los mismos métodos sin aplicación de vacío. Esto se vio reflejado también en una mejor retención del color natural de la zanahoria.

Las condiciones de proceso seleccionadas como óptimas para el método de secado convectivo fue el secado en dos etapas de temperaturas: 10 minutos 100ºC, 110 minutos 80ºC, que permitieron alcanzar la gran calidad de las hojuelas deshidratadas a una temperatura menor (80ºC), reduciendo el tiempo de proceso en una hora.

La incorporación de vacío al método de secado presentó ventajas nutricionales importantes (mayor retención de *trans* β-caroteno y una menor concentración de compuestos pardos), sin embargo, perjudicó la textura de las hojuelas, aumentando la fuerza de fractura al doble.

La fritura a vacío, en tanto, permitió reducir significativamente el pardeamiento no enzimático, la degradación de *trans* β-caroteno y la pérdida de color natural de las zanahorias, permitiendo desarrollar una textura similar a la de las hojuelas fritas en condiciones atmosféricas.

El análisis sensorial arrojó resultados muy similares a los entregados por la evaluación instrumental, presentándose una buena correlación de los atributos de calidad determinados por ambos enfoques y, por lo tanto, se validaron los métodos instrumentales por su capacidad de predecir los atributos sensoriales de calidad estudiados. De este modo, se encontró que las mejores correlaciones fueron las que se relacionaron con el pardeamiento no enzimático y con el desarrollo de texturas.

Este trabajo sugiere que entre las distintas alternativas estudiadas, el proceso de secado convectivo es una buena alternativa para desarrollar snacks de mejor calidad y más saludables, pues produjo hojuelas de zanahoria con características de calidad nutricional y organoléptica ventajosas.

7. PERSPECTIVAS FUTURAS

De modo de complementar los resultados de este trabajo, se sugieren líneas de investigación. En primer lugar sería beneficioso realizar un estudio de aceptabilidad y preferencias del consumidor, pues sería de gran utilidad determinar los atributos de calidad relevantes para el consumidor, de modo de poder dirigir investigaciones futuras hacia ellos.

Por otro lado, es conveniente efectuar un estudio microestructural, en cuanto que permitiría poder entender con mayor claridad los cambios físicos, químicos y texturales asociados a los distintos métodos de deshidratación.

En tercer lugar, la realización de la evolución temporal de calidad durante el almacenamiento es muy importante para poder estudiar las cinéticas de los procesos de deterioro, bajo distintas condiciones de almacenamiento.

Finalmente, se sugiere evaluar económicamente los procesos estudiados, con el fin de analizar la factibilidad económica ellos, en términos de los costos de inversión y operación, para poder tener mayores antecedentes para la comparación de los distintos procesos de deshidratación.

BIBLIOGRAFIA

Aguilera, J.M. y Stanley, D.W. (1999). *Microstructural Principles of Food Processing and Engineering*. (2a. Edición). Gaithersburg, EE.UU.: Aspen Publishers Inc.

Aguilera J.M. (2003). Drying and Dried Products Under the Microscope. *Food Science and Technology International*, 9, 137-143.

Almeida-Dominguez, N. G., Valencia, M. E. y Higuera-Ciapara, I. (1990). Formulation of Corn-Based Snacks with High Nutritive Value: Biological and Sensory Evaluation. *Journal of Food Science*, 55, 228-231.

Arnoldi, A. (2002). Thermal Processing and Nutrition Quality. En C.J.K. Henry y C. Chapman (Ed.), *The Nutrition Handbook for Food Processors* (265-292). Cambridge, Reino Unido: Holanda: Woodhead Publishing Limited.

A.O.A.C. (1995). Official Methods of Analysis (16a Ed.), Washington: Association of Official Analytical Chemists.

Baik, O. y Mittal G.S. (2005). Heat and Moisture Transfer and Shrinkage Simulation of Deep-Fat Tofu Frying. *Food Research International*, 38, 183-191.

Baloch, A.K., Buckle, K.A. y Edwards, R.A. (1973). Measurement of Non-Enzymatic Browning of Dehydrated Carrots. *Journal of Science of Food and Agriculture,* 24, 389–398.

Berlitz, H.D., Grosch, W. y Schieberle, P.(2009). *Food Chemistry*. (4 Edición). Berlin, Alemania: Springer-Verlag.

Blumenthal, M.M. (1991). A New Look at the Chemistry and Physics of Deep-Fat Frying. *Food Technology*, 45, 68-71.

Bouchon, P. y Aguilera, J.M. (2001). Microstructural Analysis of Frying Potatoes. *International Journal of Food Science and Technology*, 36, 669-676.

Bouchon, P., Aguilera, J.M. y Pyle, D.L. (2003). Structure Oil-Absorption Relationships During Deep-Fat Frying. *Journal of Food Science*, 68, 2711-2716.

Briones, V. y Aguilera, J. M. (2005). Image Analysis of Changes in Surface Color of Chocolate. *Food Research International*, 38, 87–94.

Chen, B.H., Peng, H.Y. y Chen, H.E. (1995). Changes of Carotenoids, Color, and Vitamin A Contents during Processing of Carrot Juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 43, 1912-1918.

Da Silva, P.F. y Moreira, R.G. (2008). Vacuum Frying of High-Quality Fruit and Vegetable-Based Snacks. *Food Science and Technology*, 41, 1758-1767.

USDA-NCC, 1998. Carotenoid Database for US Foods-1998. Disponible en: http://www. nal.usda.gov/fnic/foodcomp/Data/car98/car98.html.

Davies, K. y Labuza, T. (1997). The Maillard Reaction: Application to Confectionery Products. Disponible en: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.22.5873&rep=rep1&type=pdf.

Delarue, J. y Sieffermann, J.M. (2004). Sensory Mapping using Flash Profile. Comparison with a Conventional Descriptive Method for the Evaluation of the Flavour of Fruit Dairy Products. *Food Quality and Preference*, 15, 383-392.

Desai, B.B. (2004). *Seeds Handbook: Biology, Production, Processing, and Storage*. (2a. Edición). Nueva York, EE.UU.: Marcel Dekker Inc.

Dobraszczyk, B.J, Ainsworth, P., Ibanoglu, S. y Bouchon, P. (2006). Baking, Extrusion and Frying. In J.G. Brennan (Ed.), *Food Processing Handbook* (pp.237-283) EE.UU.: John Wiley & Sons.

Doymaz, I. (2004). Convective Air Drying Characteristics of Thin Layer Carrots. *Journal of Food Engineering*, 61, 359-364.

Dueik, V. y Bouchon, P. (Submitted). Vacuum Frying: an Advanced Technology able to Overcome Most of Detrimental Changes Occurring During Atmospheric Frying. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*.

Dueik, V., Robert, P. y Bouchon, P. (2009). Vacuum Frying Reduces Oil Uptake and Improves the Quality Parameters of Carrot Chips. *Food Chemistry*. (Aceptada)

Eichner, K., Laible, W. y Wolf, W. (1985). The Influence of Water Content and Temperature on the Formation of Maillard Reaction Intermediates During Drying of Plant Products. En D. Simatos y J.L. Multon (Ed.), *Properties of Water in Food in Relation to Quality and Stability* (191-210). Dordrecht, Holanda: Martinus Nijhoff Publishers.

Farinu, A. y Baik, O. (2005). Deep Fat Frying of Foods-Transport Phenomena. *Food Reviews International*, 21, 389-410.

Garayo, J. y Moreira, R. (2002). Vacuum Frying of Potato Chips. *Journal of Food Engineering*, 55, 181-191.

Gatty B. (2008). IRI State of the Industry Report: Growth in Tough Times; Healthier Snacks Lead the Way. *Snack World*, Abril 2008, 13-19. Disponible en: http://www.sfa.org.

Geankoplis, C.J. (1998). *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias.* (3a. Edición). Mexico: Compañía Editorial Continental S.A.

Handelman, G.J. (2001). The Evolving Role of Carotenoids in Human Biochemistry. *Nutrition*, 17, 818–822.

Heldman, D.R. y Lund D.B. (2007). *Handbook of Food Engineering*. (2a. Ed.). Boca Raton, EE.UU.: CRC Press.

Hoffmann, G. (2009). *Modelo CIE L*a*b*.* Recuperado el 25 de Agosto de 2009 del sitio web: http://www.memoriagrafica.com/2009/03/modelo-de-color-cielab.html.

Hunt, R.W.G. (1991). *Measuring Color* (2a Edición). Chichester, EE.UU.: Ellis Horwood Ltd., 313.

Katz, E.E. y Labuza ,T.P. (1981). "Effect of Water Activity on the Sensory Crispness and Mechanical Deformation of Snack Food Products". *Journal of Food Science*, 46, 403-409.

Kayacier, A. y Singh, R.K. (2004). Application of Effective Diffusivity Approach for the Moisture Content Prediction of Tortilla Chips during Baking. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 275-281.

Koca, N., Burdurlu, H.S. y Karadeniz, F. (2007). Kinetics of Colour Changes in Dehydrated Carrots. *Journal of Food Engineering*, 78, 449-455.

Krokida, M.K. y Maroulis, Z.B. (1997). Effect of Drying Method on Shrinkage and Porosity. *Drying Technology*, 15, 2441-2458.

Krokida, M.K., Tsami, E. y Maroulis, Z.B. (1998). Kinetics on Color Changes During Drying of Some Fruits and Vegetables. *Drying Technology*, 16, 667-685.

Krokida, M.K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z.B. y Marinos-Kouris, D. (2001a). Colour Changes During Deep Fat Frying. *Journal of Food Engineering*, 48, 219-225.

Krokida, M.K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z.B. y Marinos-Kouris, D. (2001b). Effect of Pre-Treatment on Viscoelastic Behaviour of Potato Strips. *Journal of Food Engineering*, 50, 11-17.

Labuza. T.P. (1971). Properties of water and the keeping quality of foods. En H.F.Steward (Ed.), *Proceedings of the 3rd International Congress of Food Science & Technology* (pp. 618-635). Chicago, EE.UU.

Labuza, T.P. y Kamman, J.F. (1983). Reaction Kinetics and Acceletated Tests Simulation as a Function of Temperature. En I. Saguy (Ed.), *Computer-aided Techniques in Food Technology* (pp. 71-115). Nueva York, EE.UU.: Marcel Dekker Inc.

Lavelli, V., Zanoni, B. y Zaniboni, A. (2007). Effect of Water Activity on Carotenoid Degradation in Dehydrated Carrots. *Food Chemistry*, 104, 1705–1711

Leeratanarak, N., Devahastin, S. y Chiewchan, N. (2006). Drying Kinetics and Quality of Potato Chips Undergoing Different Drying Techniques. *Journal of Food Engineering*, 77, 635-643.

Mariscal, M. y Bouchon, P. (2008). Comparison Between Atmospheric and Vacuum Frying of Apple Slices. *Food Chemistry*, 107, 1561–1569.

Miranda, M.L y Aguilera, J.M. (2006). Structure and Texture Properties of Fried Potato *Products. Food Reviews International*, 22, 173-201.

Moreira, R.G., Castell-Pérez, M.E. y Barrufet, M.A. (1999). *Deep-Fat Frying: Fundamentals and Applications*. Gaithersburg, EE.UU.: Aspen Publishers Inc.

Mottram, D.S., Wedzicha, B.L. y Dodson, A.T. (2002). Acrylamide is Formed in the Maillard Reaction. *Nature*, 419, 448-449.

National Research Council (1929). *International Critical Tables*. (Vol. 5), Nueva York, EE.UU.: McGraw- Hill Book Company.

Pedreschi, F., León, J., Mery, D. y Moyano, P. (2006). Development of a Computer Vision System to Measure the Color of Potato Chips. *Food Research International*, 39, 1092-1098.

Perera, C.O. (2005). Selected Quality Attributes of Died Foods. *Drying Technology*, 23, 717-730.

Pérez-Tinoco, M.R., Pérez, A., Salgado-Cervantes, M., Reynes, M. y Vaillant F. (2008). Effect of Vacuum Frying on Main Physicochemical and Nutritional Quality Parameter of Pineapple Chips. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88, 945-953.

Quintas, M.A.C., Brandão, T.R.S. y Silva, C.L.M. (2007). Modelling Colour Changes During the Caramelisation Reaction. *Journal of Food Engineering*, 83, 483-491.

Rahman, M.S. (2001). Toward Prediction of Porosity in Foods During Drying: a Brief Review. *Drying Technology*, 19, 1-13.

Rodríguez-Amaya, D. (2001). A Guide to Carotenoid Analysis in Foods. Disponible en: http://www.ilsi.org/file/carotenoid.pdf.

Ruiz-López, I.I., Córdova, A.V., Rodríguez-Jimenes, G.C. y García-Alvarado, M.A. (2004). Moisture and Temperature Evolution During Food Drying: Effect of Variable Properties. *Journal of Food Engineering*, 63, 117–124.

Sacilik, K. y Elicin, A.K. (2006). The Thin Layer Drying Characteristics of Organic Apple Slices. *Journal of Food Engineering*, 73, 281-289.

Segnini, S. y Dejmek, P. (1999). Relationship between instrumental and Sensory Analysis of Texture and Color of Potato Chips. *Journal of Texture Studies*, 30, 677-690.

Shyu, S., Hua L. y Hwang, L. (2005). Effect of Processing Conditions on the Quality of Vacuum Fried Carrot Chips. *Journal of the Science of Food and Agriculture,* 34, 133–142.

Singh, R.P. (1983). Numerical Techniques. En I. Saguy (Ed.), *Computer-aided Techniques in Food Technology* (pp. 23-47). Nueva York, EE.UU.: Marcel Dekker Inc.

Singh, R.P. (1995). Heat and Mass Transfer in Foods During Deep-Fat Frying. *Food Technology,* 49, 134-137.

Singh, B. y Gupta, A.K. (2006). Mass Transfer Kinetics and Determination of Effective Diffusivity during Convective Dehydration of Pre-Osmosed Carrot Cubes. *Journal of Food Engineering*, 79, 459-470.

Singh, S. y Tyagi, V.K. (2001). Deep-Fat Frying of Foods—Its Significance on Nutrition and Health. *Journal of Food Science and Technology*, 38, 545–552.

Srikiatden, J. y Roberts, J.S. (2008). Predicting Moisture Profiles in Potato and Carrot during Convective Hot Air Drying using Isothermally Measured Effective Diffusivity. *Journal of Food Engineering*, 84, 516-525.

Sulaeman, A., Tan, K. B., Taylor, S. L. y Driskel, J. A. (2002). Sensory Acceptability of Deep-Fried Carrot chip Product as Evaluated by American and Southeast Asian Consumer Panels. *Journal of Food Quality*, 25, 453-467.

Suvarnakuta, P., Devahastin, S. y Mujumdar, A.S. (2005). Drying Kinetics and β-Carotene Degradation in Carrot Undergoing Different Drying Processes. *Journal of Food Science*, 70, 520-526.

Tapiero H., Townsed D.M. y Tew K.D. (2004). Dossier: Influence of Alcohol, Consumption and Smoking Habits on Human Health. The Role of Carotenoids in the Prevention of Human Pathologies. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 58, 100-110.

Vincent, J.F. (1998). The Quantification of Crispness. *Journal of the Science of Food and Agriculture,* 78, 162- 168.

Yam, K.L y Papadakis, S.E. (2004). A Simple Digital Imaging Method for Measuring and Analyzing Color of Food Surfaces. *Journal of Food Engineering*, 61, 137-142.

A N E X O S

ANEXO A: EQUIPOS

Figura A-1: Instrumentos para la extracción de muestras de zanahorias estandarizadas

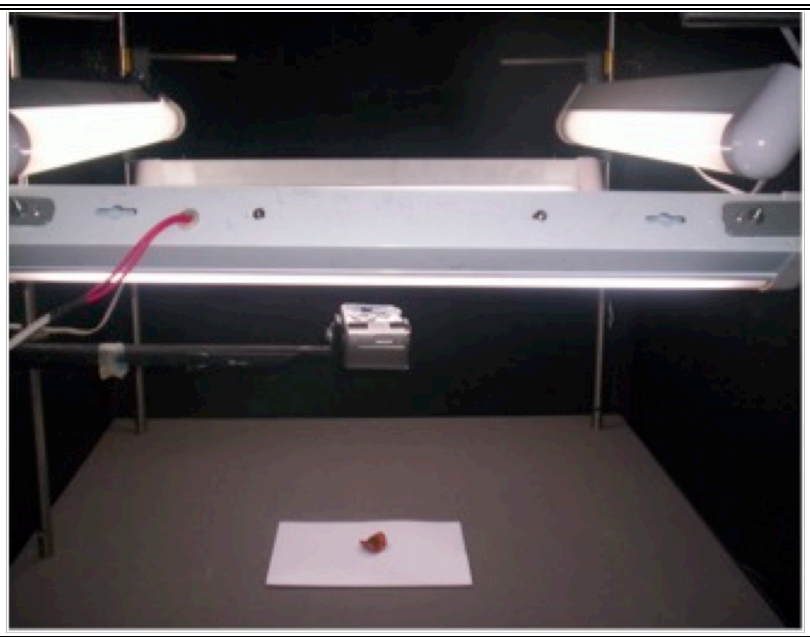


Figura A-2: Montaje del sistema de captura de imágenes

Figura A-3: Horno para secado convectivo

Figura A-4: Horno a vacío

Figura A-5: Canasta del equipo fritura

Figura A-6: HPLC utilizado para la detección de carotenos (modelo L-6200A, Merck-Hitachi, Alemania)

Figura A-7: Centrífuga utilizada para el análisis de los compuestos de la reacción de Maillard

Figura A-8: Espectrofotómetro UV–VIS utilizado para la detección de la concentración de melanoidinas (modelo T70, Baush & Lomb, EE.UU.)

ANEXO B: CÓDIGO COMPUTACIONAL

En esta sección se presenta la metodología computacional utilizada para la resolución del problema de difusión con difusividad variable. La implementación del algoritmo de búsqueda y estimación de los parámetros óptimos del coeficiente difusivo se realizó según la Figura B-1.

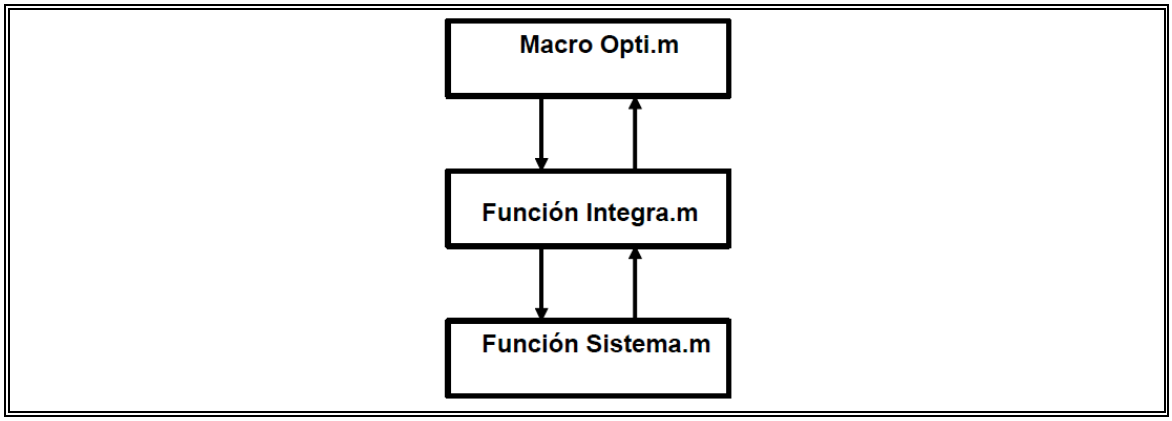


Figura B-1: Representación de la implemetación del algoritmo de búsqueda y estimación de parámetros óptimos para el problema de difusión

Macro Opti.m

A continuación se presentan los macros Opti60.m, Opti80.m y Opti100.m, que definen los datos, llaman a la optimización y muestran los resultados para las temperaturas de 60, 80 y 100ºC respectivamente.

```
%Macro Opti60.m
global  Cexp texp C0 a b L N
L=0.001; N=100;
Cexp=[8.454289461 1.148021973 0.131855393 0.111414651 0.088873673
0.079461709 0.071414105 0.068094431 0.05803371]';
texp=60*[0 30 60 90 120 180 240 300 360];
C0=zeros(N-1,1); for i=2:N-1, C0(i,1)=Cexp(1); end; %Condicion inicial
x0=[1.5e-10 3e-10];%Valores de parametros a estimar iniciales Diff
lb=[1e-11 1e-10];
up=[1e-09 1e-09];
options=psoptimset('TolMesh',1e-20,'TolX',1e-20,'TolFun',1e-
20,'MaxIter',2000);
xopt=patternsearch(@Integra, x0, [],[],[],[],lb,up,options);
[T,C] = ode23s(@Sistema,[texp],C0);
Cprom=mean(C,2);
```

```
cr=(Cexp-Cprom)./(11*Cexp); %Error Rel
ECM=norm(cr);
t=[0:60:360*60];
[T,C] = ode23s(@Sistema,[t],C0);
Cprom=mean(C,2);
hold on
plot(T/60,Cprom,'b-')
plot(texp/60,Cexp,'r*')
hold off
for i=1:9, D(i)=(log(Cprom(i))-b)*a; end

%Macro Opti80.m
global  Cexp texp C0 a b L N
L=0.001; N=100;
Cexp=[8.386570702 1.372194765 0.249138361 0.112912013 0.091560814
0.083776041 0.076143717 0.068882617 0.062851151 0.055225065
0.052742065]';
texp=60*[0 15 30 45 60 75 90 120 180 240 270];
C0=zeros(N-1,1); for i=2:N-1, C0(i,1)=Cexp(1); end; %Condicion inicial
x0=[2.5e-10 6e-10];%Valores de parametros a estimar iniciales Diff
lb=[1e-11 1e-10];
up=[1e-09 1e-09];
options=psoptimset('TolMesh',1e-20,'TolX',1e-20,'TolFun',1e-20,
'MaxIter', 2000);
xopt=patternsearch(@Integra, x0, [],[],[],[],lb,up,options);
[T,C] = ode23s(@Sistema,[texp],C0);
Cprom=mean(C,2);
cr=(Cexp-Cprom)./(11*Cexp);
ECM=norm(cr);
t=[0:60:270*60];
[T,C] = ode23s(@Sistema,[t],C0);
Cprom=mean(C,2);
hold on
plot(T/60,Cprom,'b-')
plot(texp/60,Cexp,'r*')
hold off
for i=1:9, D(i)=(log(Cprom(i))-b)*a; end

%Macro Opti100.m
global  Cexp texp C0 a b L N
L=0.001; N=100;
Cexp=[8.25781596 0.509851998 0.100838981 0.080217686 0.072076185
0.061706177 0.061407852 0.051811128 0.045558012]';
texp=60*[0 15 30 45 60 75 90 105 120];
C0=zeros(N-1,1); for i=2:N-1, C0(i,1)=Cexp(1); end; %Condicion inicial
x0=[3e-10 1e-09];%Valores de parametros a estimar iniciales Diff
lb=[1e-11 1e-10];
up=[1e-09 2e-09];
options=psoptimset('TolMesh',1e-20,'TolX',1e-20,'TolFun',1e-
20,'MaxIter',2000);
xopt=patternsearch(@Integra, x0, [],[],[],[],lb,up,options);
[T,C] = ode23s(@Sistema,[texp],C0);
Cprom=mean(C,2);
cr=(Cexp-Cprom)./(9*Cexp);
ECM=norm(cr);
t=[0:60:120*60];
```

```
[T,C] = ode23s(@Sistema,[t],C0);
Cprom=mean(C,2);
hold on
plot(T/60,Cprom,'b-')
plot(texp/60,Cexp,'r*')
hold off
for i=1:9, D(i)=(log(Cprom(i))-b)*a; end
```

Función Integra.m

Esta función integra las ecuaciones del modelo del sistema para un valor dado de los parámetros y calcula la función objetivo.

```
function fobj=Integra(x)
global  Cexp texp C0 a b L N
a =x(1);
b =x(2);
[T,C] = ode23s(@Sistema,[texp],C0);
Cprom=mean(C,2);
c=(Cexp-Cprom)./(length(Cexp)*Cexp);%Error relativo
fobj=(norm(c));
return
```

Función Sistema.m

Esta función define las ecuaciones diferenciales del proceso, dados los parámetros a y b.

```
function yp=Sistema(t,c)
global  Cexp texp C0 a b L N
dz=L/N;
%D(i)=a*ln(c(i))+b
%yp(N)=0;
yp(N-1)=-(a*log(c(N-1))+b)*(c(N-1)-c(N-2))/dz^2;%Asumiendo que
dC(N)/dx=0 --> C(N)=C(N-1)
yp(1)=0;%superficie siempre seca
c(1)=0;
for i=2:N-2,
    yp(i)=(a*log(c(i+1))+b)*(c(i+1)-c(i))/dz^2-(a*log(c(i))+b)*(c(i)-
c(i-1))/dz^2;
end
yp=yp(:);
return
```

ANEXO C: CROMATOGRAMAS

A continuación se presentan algunos cromatogramas obtenidos con el software Empower™ 2 (Waters, EE.UU.) para el análisis de β-caroteno. El tiempo de retención para *trans* β-caroteno fue de los 27 minutos, a diferencia del *trans* α-caroteno que se observó al cabo de 25 minutos. En el caso de los procesos de deshidratación, las temperaturas llevaron a la isomerización de ambos compuestos (Figura C-2 y C-3). La identificación de los isómeros se llevó a cabo con el gráfico que relaciona longitud de onda vs. intensidad para los tiempos de retención identificados (parte superior de las figuras).

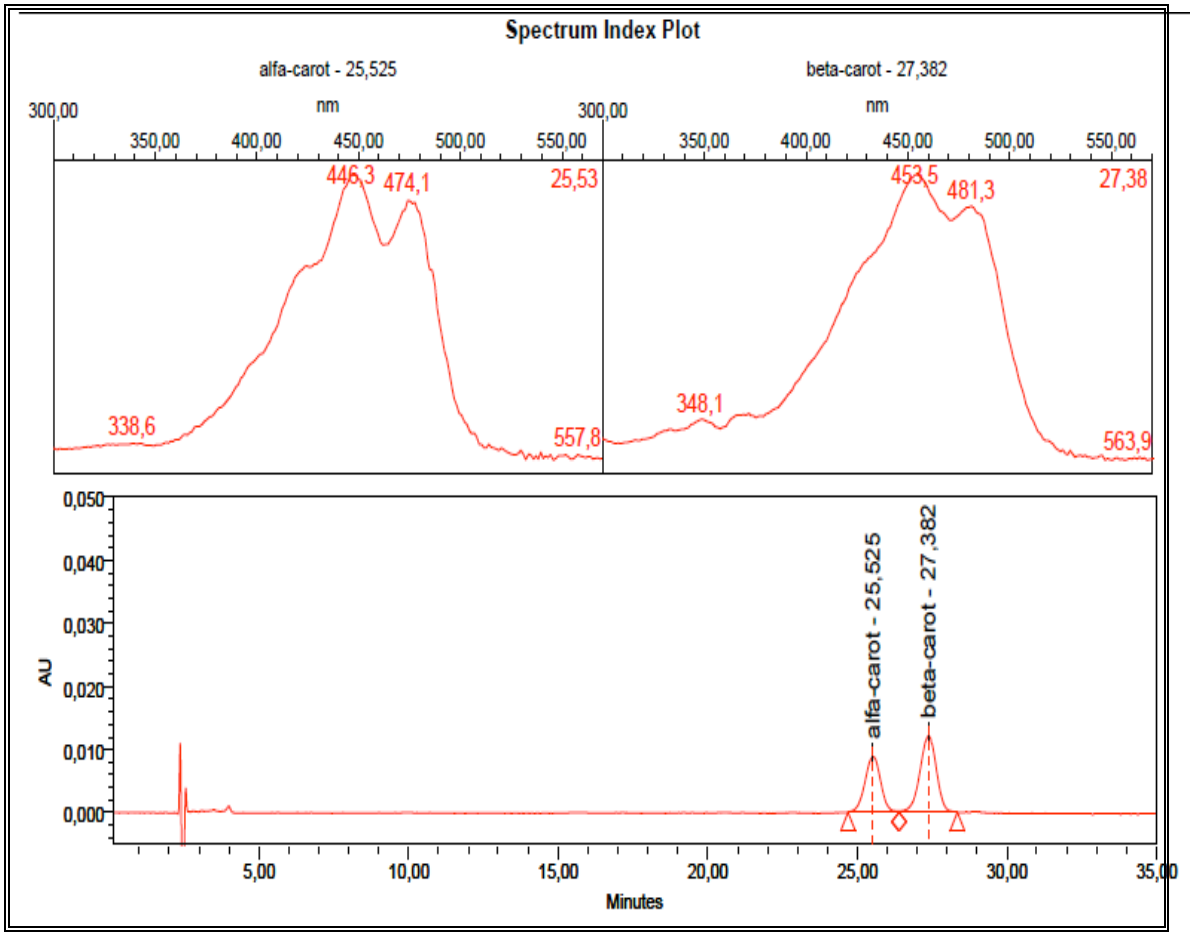


Figura C-1: Cromatograma para muestra de zanahoria fresca

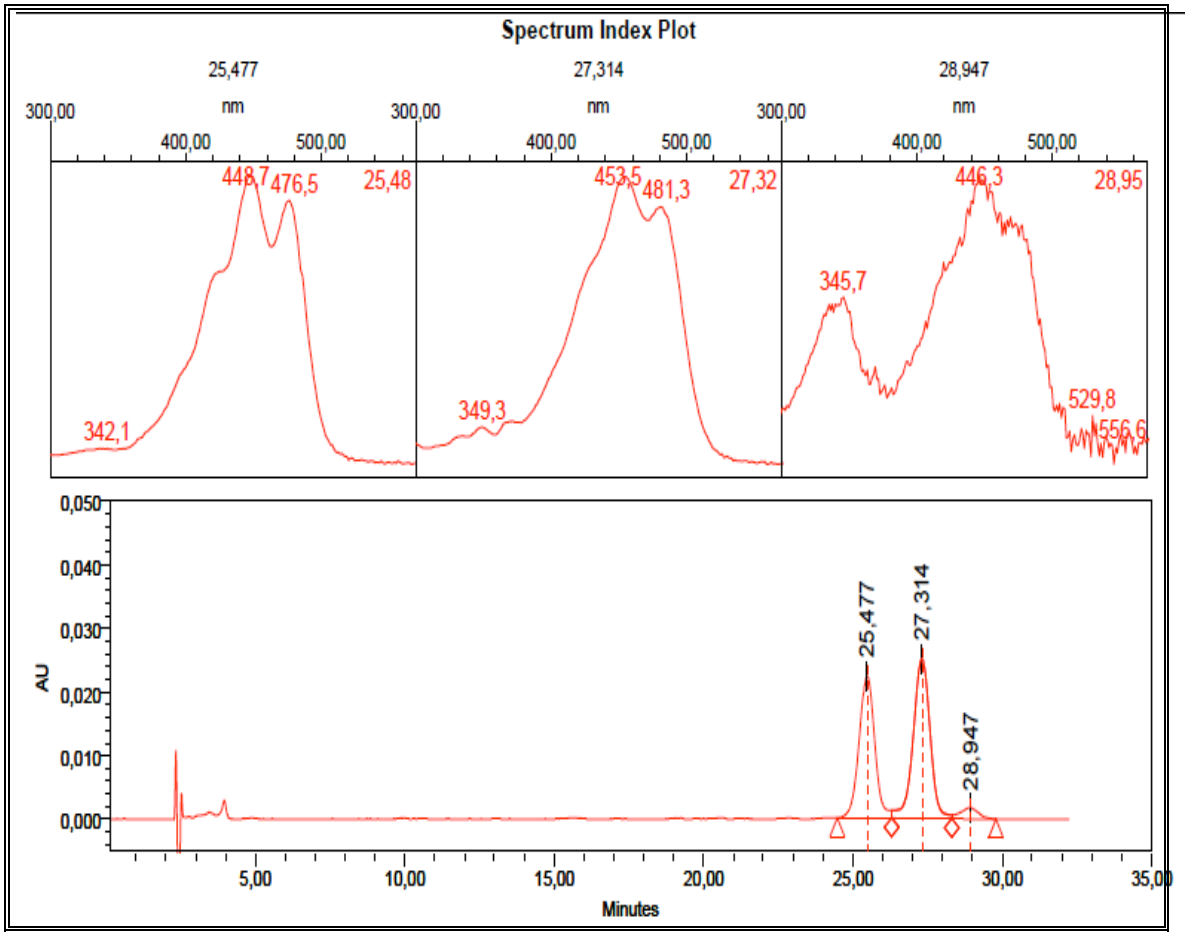


Figura C-2: Cromatograma para muestra de zanahoria deshidratadas mediante secado a vacío (60ºC)

ANEXO D: FOTOGRAFÍAS HOJUELAS DE ZANAHORIA

Figura D-1: Fotografía hojuela de zanahoria fresca

Figura D-2: Fotografías hojuelas de zanahoria deshidratadas mediante secado convectivo hasta una humedad de 0,06 (b.s.)

Figura D-3: Fotografías hojuelas de zanahoria deshidratadas mediante secado a vacío hasta una humedad de 0,06 (b.s.)

Vacío

Atmosférica

Figura D-4: Fotografías hojuelas de zanahoria deshidratadas mediante fritura atmosférica y a vacío hasta una humedad de 0,06 (b.s.)

ANEXO E: ANÁLISIS SENSORIAL

Durante la primera sesión el panel desarrolló el vocabulario descriptivo, para cada una de las muestras. En el análisis sensorial se utilizaron aquellos descriptores con mayor frecuencia de uso (Tabla E-1). Las intensidades de percepción de estos atributos se basó en escalas de 10 puntos (Tabla E-2).

Tabla E-1: Descriptores desarrollados por el panel sensorial (Centro de Aromas, DICTUC)

Atributos	Descripción Atributos	Definición Atributos
Apariencia	Color Naranjo	Color naranjo típico del vegetal
Aroma	Zanahoria	Aroma a zanahoria característico del vegetal
	Tostado	Tostado quemado
Sabor	Zanahoria	Sabor a zanahoria característico del vegetal
	Amargo	Amargo cafeína
Retrogusto	Amargo	Amargo cafeína
Textura	Crocancia	Crocancia grado de fracturabilidad
Aceptabilidad General		Evaluación de gusto o desagrado por las muestras

Tabla E-2: Definición de escalas por atributo (Centro de Aromas, DICTUC)

Atributos	Descripción Atributos	Definición Escalas
Apariencia	Color Naranjo	0 = alterado 9 = natural
Aroma	Zanahoria Tostado	0 = nada / 9= intenso 0 = nada / 9 = intenso
Sabor	Zanahoria Amargo	0 = nada / 9= intenso 0 = nada / 9 = intenso
Retrogusto	Amargo	0 = nada / 9 = intenso
Textura	Crocancia	0 = nada / 9 = intenso
Aceptabilidad General		0 = me desagrada extremadamente 5 = no me desagrada ni agrada 9 = me agrada extremadamente

A continuación se presentan fotografías, en secuencia, de una se las sesiones de evaluación sensorial con panel entrenado.

Cada juez ordena las muestras (rotuladas con un número de 3 dígitos), de acuerdo a los atributos generados según la escala definida.

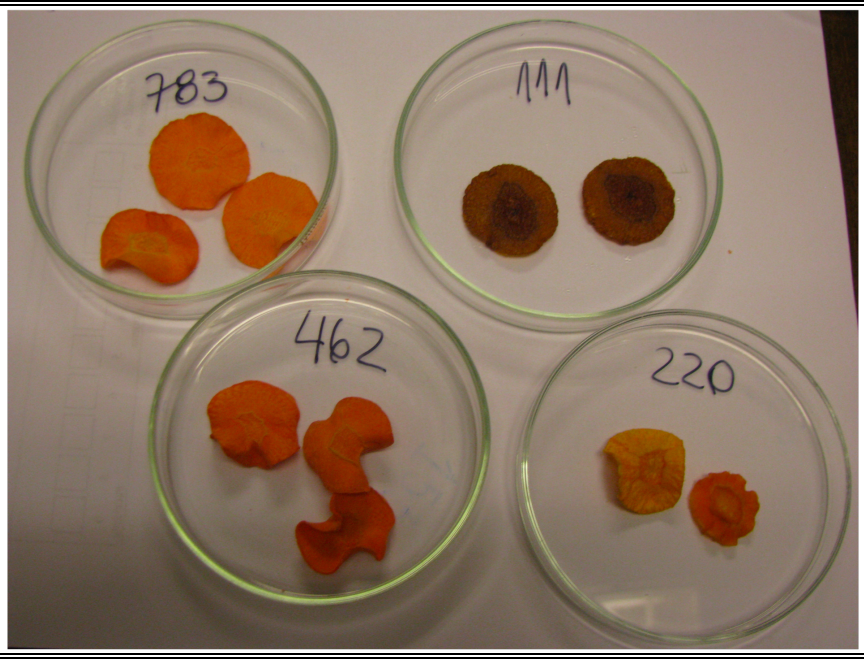


Figura E-1: Presentación de las muestras deshidratadas

Figura E-2: Disposición de muestras y formulario evaluación sensorial

ANEXO F: ANÁLISIS ESTADÍSTICO

La comparación de los resultados se hizo utilizando el software Statgraphics Plus para Windows 5.1. Se realizó comparación de promedios mediante la prueba de Duncan de rangos múltiples, en los casos que se cumplían los requisitos de normalidad y homogeneidad de varianza, en otros casos se compararon medianas mediante la prueba de Kruskal-Wallis.

F.1. Comparación condiciones secado convectivo

Se analizaron estadísticamente los contenidos de humedad para los tiempos determinados experimentalmente, de modo de poder asegurarse de que no habían diferencias significativas entre ellos.

Posteriormente, el cambio de color y concentración de los compuestos de la reacción de Maillard fueron analizados, para el contenido de humedad final, en busca de diferencias estadísticamente significativas ($p<0.05$).

A continuación se presenta el resumen estadístico para cada atributo según el método de secado, el resultado de la prueba de Duncan (si se cumple normalidad) o el gráfico de cajas y bigotes (si se utiliza la comparación entre medianas)

Resumen Estadístico para dE

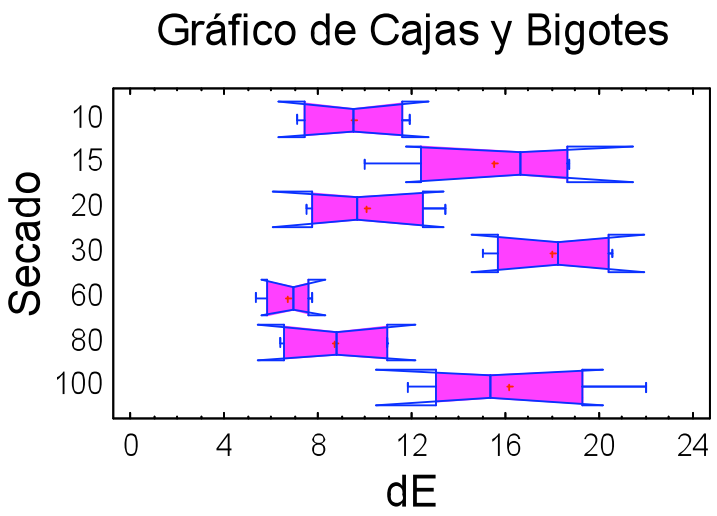
Secado	Frecuencia	Media	Varianza	Error estándar
10’100°C	4	9,52551	5,83417	1,2077
15´30°C	4	15,4855	16,7847	2,04846
20’100°C	4	10,0832	8,08623	1,42181
30´80°C	4	18,0284	7,81628	1,39788
Vacío	4	6,74662	1,19413	0,546381
80°C	4	8,73415	6,40945	1,26584
100°C	4	16,129	19,0569	2,18271
Total	28	12,1046	24,0606	0,926989

Secado	Rango	Asimetría tipi.	Curtosis típificada
10’100°C	4,79822	0,00152713	-2,14487
15´30°C	8,74996	-0,833697	-0,16537
20’100°C	5,91098	0,296952	-1,5194
30´80°C	5,4878	-0,115221	-2,0824
Vacío	2,33494	-0,462802	-1,0425
80°C	4,54385	-0,010426	-2,41915
100°C	10,2111	0,774889	0,375851
Total	16,6352	1,08009	-0,93868

Contraste de Kruskal-Wallis para dE según Secado

Secado	Tamaño muestral	Rango Promedio
10	4	11,25
15	4	20,0
20	4	12,25
30	4	24,0
60	4	4,5
80	4	8,0
100	4	21,5

Estadístico = 19,3522 P-valor = 0,00360836



Resumen Estadístico para Abs

Tratamientos	Frecuencia	Media	Varianza	Error estándar
Vacío	3	0,088624	0,000088164	0,00542107
20’100°C	3	0,17216	0,000193471	0,00803059
30’80°C	3	0,277548	0,00142076	0,0217621
100°C	3	0,33239	0,00134315	0,0211593
10’100°C	3	0,124797	0,00011242	0,00612154
80°C	3	0,115354	0,000155611	0,0072021
15’80°C	3	0,18774	0,0000608201	0,0045026
Total	21	0,185516	0,00757087	0,0189873

Tratamientos	Rango	Asimetría tipi.	Curtosis típificada
Vacío	0,0178319	1,00112	
20’100°C	0,0271852	0,7329	
30’80°C	0,070313	-1,09528	
100°C	0,073273	-0,0961094	
10’100°C	0,0212	-0,0847699	
80°C	0,0249392	-0,101525	
15’80°C	0,0138443	1,21364	
Total	0,287065	1,43429	-0,537009

Contraste de Varianza
Contraste C de Cochran: 0,421041 P-valor = 0,263623
Contraste de Bartlett: 2,09081 P-valor = 0,192782
Contraste de Hartley: 23,3601
Test de Levene: 0,869793 P-valor = 0,540476

Tabla ANOVA para Abs según Tratamientos

Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	0,144669	6	0,0241114	50,02	0,0000
Intra grupos	0,0067488	14	0,000482057		
Total (Corr.)	0,151417	20			

```
Contraste Múltiple de Rango para Abs según Tratamientos
--------------------------------------------------------------------------------
Método: 95,0 porcentaje Duncan
Tratamientos   Frec.     Media             Grupos homogéneos
--------------------------------------------------------------------------------
Vacío          3         0,088624          X
80°C           3         0,115354          X
10’100°C       3         0,124797          X
20’100°C       3         0,17216            X
15’80°C        3         0,18774            X
30’80°C        3         0,277548             X
100°C          3         0,33239              X
--------------------------------------------------------------------------------
```

F.2. Comparación procesos tradicionales de deshidratación y aplicación de vacío

Los atributos de calidad determinados (concentración de compuestos pardos, pérdida de color, contenido de β-caroteno y textura) se comparan para los distintos procesos de deshidratación estudiados.

A continuación se presenta el resumen estadístico para cada atributo según el método de secado, el resultado de la prueba de Duncan (si se cumple normalidad) o el gráfico de cajas y bigotes (si se utiliza la comparación entre medianas).

Nota: SC corresponde a secado convectivo, SV a vacío, FA fritura atmosférica y FV a vacío.

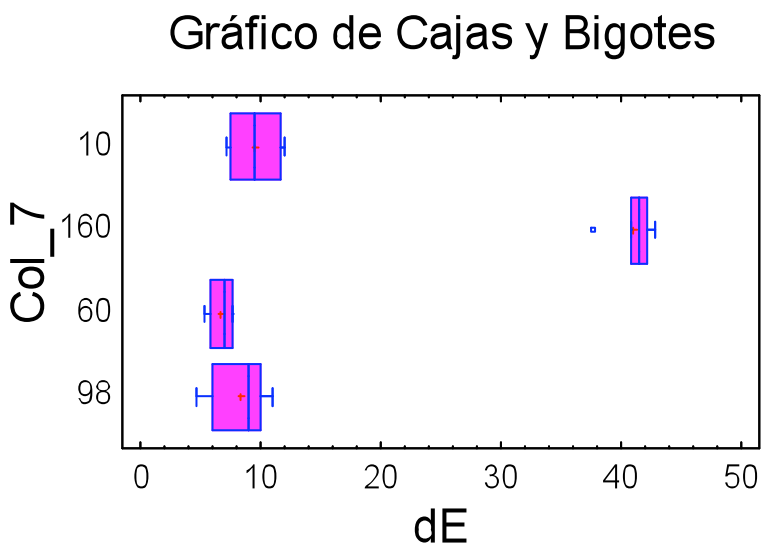
```
Resumen Estadístico para dE
Proceso            Frecuencia            Media                 Varianza               Error
estándar
-------------------------------------------------------------------------------------------
--
SC                 4                 9,52551              5,83417             1,2077
FA                 6                 41,0364              3,35487             0,74776
SV                 4                 6,74662              1,19413             0,546381
FV                 6                 8,29137              5,9813              0,998441
-------------------------------------------------------------------------------------------
--
Total              20                18,0528             242,692             3,48347

Proceso            Rango            Asimetría tipi. Curtosis típificada
```

-SC	4,79822	0,00152713	-2,14487
FA	5,15551	-1,60897	1,49623
SV	2,33494	-0,462802	-1,0425
FV	6,33627	-0,746884	-0,485915
Total	38,1632	1,65614	-1,1093

Contraste de Kruskal-Wallis para dE según Proceso

Proceso	Tamaño muestral	Rango Promedio
10	4	10,0
160	6	17,5
60	4	4,75
98	6	7,66667

Estadístico = 13,5833 P-valor = 0,00353067



Resumen Estadístico para Abs

Proceso	Frecuencia	Media	Varianza	Error estándar
SC	3	0,124797	0,00011242	0,00612154
FA	4	0,663746	0,000799078	0,014134
FV	3	0,136991	0,000206755	0,00830171
SV	3	0,088624	0,000088164	0,00542107
Total	13	0,285094	0,0696176	0,0731792

Proceso	Rango	Asimetría tipi.	Curtosis típificada
SC	0,0212	-0,0847699	
FA	0,0566911	-0,264342	-1,69328
FV	0,0275465	-0,939145	
SV	0,0178319	1,00112	
Total	0,606552	1,37811	-0,957843

Contraste de Varianza
Contraste C de Cochran: 0,662356 P-valor = 0,124361
Contraste de Bartlett: 1,522 P-valor = 0,365701
Contraste de Hartley: 9,06354
Test de Levene: 3,55337 P-valor = 0,0607013

Tabla ANOVA para Abs según Abs

Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	0,832199	3	0,2774	777,29	0,0000
Intra grupos	0,00321191	9	0,000356879		
Total (Corr.)	0,835411	12			

Contraste Múltiple de Rango para Abs según Proceso

Método: 95,0 porcentaje Duncan

Proceso	Frec.	Media	Grupos homogéneos
SV	3	0,088624	X
SC	3	0,124797	X
FV	3	0,136991	X
FA	4	0,663746	X

Resumen Estadístico para Retención b-caroteno

Proceso	Frecuencia	Media	Varianza	Error estándar
SC	9	0,855611	0,00220179	0,0156411
SV	9	0,80576	0,00196684	0,014783
FV	8	0,838226	0,00226492	0,016826
FA	8	0,334881	0,000410071	0,00715953
--Total	34	0,7158	0,0479252	0,0375442

Proceso	Rango	Asimetría tipi.	Curtosis típificada
--SC	0,115185	0,822055	-0,998929
SV	0,110641	0,814461	-0,973105
FV	0,141436	-0,0314614	-0,301935
FA	0,0598338	0,00216564	-0,320233
Total	0,618934	-2,7861	-0,500121

Tabla ANOVA para Retención b-caroteno según Proceso

Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	1,52946	3	0,50982	293,71	0,0000
Intra grupos	0,0520739	30	0,0017358		
Total (Corr.)	1,58153	33			

Contraste Múltiple de Rango para Retención b-caroteno según Proceso

Método: 95,0 porcentaje Duncan

Proceso	Frec.	Media	Grupos homogéneos
FA	8	0,334881	X
SV	9	0,80576	X
FV	8	0,838226	XX
SC	9	0,855611	X

Resumen Estadístico para Textura

Proceso	Frecuencia	Media	Error estándar
SC	18	4,49472	0,202721
AV	18	8,08939	0,228879
FV	5	5,42052	0,315414
FA	5	4,678	0,369397
Total	46	6,02188	0,280686

Proceso	Rango	Asimetría tipi.	Curtosis tipificada
SC	2,694	-1,09352	-0,484536
SV	3,712	0,447575	-0,176524
FV	1,655	0,0238822	-1,00186
FA	1,78	-0,285989	-1,30312
Total	7,095	0,988985	-1,25261

Tabla ANOVA para Textura según Proceso

Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	129,761	3	43,2536	54,51	0,0000
Intra grupos	33,324	42	0,793429		
Total (Corr.)	163,085	45			

Contraste Múltiple de Rango para Textura según Proceso

Método: 95,0 porcentaje Duncan

Proceso	Frec.	Media	Grupos homogéneos
SC	18	4,49472	X
FA	5	4,678	X
FV	5	5,42052	X
SV	18	8,08939	X