



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE

**Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y
Agrimensura**



**Secado de berenjenas (*Solanum
melongena*, L.). Cinética.
Transformaciones durante el
proceso**

Bioq. María Guadalupe Chaves

Directores: Dr. Jorge R. Avanza[†] Ing. Oscar D. Quiroga

**Manuscrito para optar al grado de Doctor de la UNNE,
Área Ciencias Químicas.**

2010

A Sofia.

A Facundo

A Fernando

A El Maestro, con todo cariño.

El espíritu humano avanza de continuo, pero avanza en línea espiral.

Johann W. Goethe

Agradecimientos

El presente Trabajo de Tesis Doctoral me ha demandado un esfuerzo y dedicación que he podido enfrentar gracias al apoyo y acompañamiento que he recibido durante el desarrollo del mismo. Sin esta asistencia, sin duda el camino hubiese sido más extenso y menos enriquecedor.

En primera instancia quiero agradecer el Apoyo Institucional recibido mediante las becas y subsidios otorgados por parte de la Universidad Nacional del Nordeste a través de la Secretaría General de Ciencia y Técnica, así como de la Secretaría de Postgrado. Así mismo hacer extensivo el mismo a las autoridades y personal que se desempeña en estas áreas.

A las autoridades de la Facultad de Ciencias Exactas, Naturales y Agrimensura, por brindarme el espacio para el desarrollo de este trabajo, así como a la Comisión de Postgrado de esta Facultad, por las gestiones oportunamente realizadas.

A mis directores de tesis, al Dr. Jorge R. Avanza[†] y al Ing. Oscar D. Quiroga, cuya guía en las distintas etapas de este trabajo ha trascendido lo académico, contribuyendo a mi formación integral, como ser humano y como profesional inserto en una Comunidad Científica.

A mi madre y hermanos, por apoyarme en las distintas etapas de mi carrera.

A mi Tía Mabel, por la confianza de siempre y por sus oportunas palabras de ánimo.

A mi esposo por el apoyo incondicional en todo este tiempo.

A los hermanos que he encontrado en la vida y que han contribuido con empujones oportunos, Pity, Marcos, Paula y Belén.

A Beatriz Álvarez de Avanza y Susana Elinbaum de Quiroga por recibirme con cariño en sus hogares.

A Sr. Jaramillo por la provisión del material de estudio para realizar el trabajo experimental

A los profesionales de esta Universidad y otras del país que han contribuido, muchas veces desinteresadamente, al desarrollo de esta Tesis, Prof. Ada Agrelo de Nassiff[†] (FaCENA-UNNE), Dra. Alicia Chaves (CIDCA-UNLP), Dra. Sonia Sgroppo (FaCENA-UNNE), Dr. Sergio Giner (CIDCA-UNLP), Dra. Alicia Judis (F.A.I.-UNNE), Dr. Miguel Schmalko (UNAM), Dra. Silvia Mazza (F.C.A.-UNNE), Dra. Olga Vasek (FaCENA-UNNE), Biot. Marina Cardozo (FaCENA-UNNE), a FRUTICOR S.A. y Biot. Maria del Carmen Gauna Pereira.

A mis compañeras de trabajo: Victoria, Adriana, Carola, Maida, Karina, Gabriela y Ana.

PREFACIO

Gran parte del presente Trabajo de Tesis Doctoral fue desarrollado en el “Laboratorio de Tecnología Química de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura de la UNNE, “Dr. Jorge Ramón Avanza”, de la ciudad de Corrientes, (Argentina)”. El objetivo principal que me propuse alcanzar durante su desarrollo, fue estudiar: **“Secado de Berenjena (*Solanum melongena*, L). Cinética. Transformaciones durante el proceso”**.

Para ello se trabajó en base a un plan de actividades previamente elaborado, el cual puede sintetizarse en la ejecución de las siguientes tareas:

- a) Búsqueda, recopilación y revisión de todo tipo de información bibliográfica que presente una relación directa con el tema de conservación de alimentos mediante secado, tales como: manipulación del producto; almacenaje y transporte; y rehidratación.
- b) Selección, desarrollo y aplicación de técnicas fisicoquímicas que se utilizan actualmente para caracterizar las muestras vegetales.
- c) Diseño, selección y construcción del sistema experimental.
- d) Experimentación sobre la base de un diseño previo de experimentos.
- e) Selección de la metodología que se utiliza durante el procesamiento de los datos experimentales.
- f) Selección de modelado del proceso en función de los mecanismos cinéticos que se hallan involucrados.

La labor realizada y los resultados obtenidos correspondientes a cada uno de los ítems “a” a “f”, se tratan luego, en menor o mayor grado de detalle, a lo largo de los 12 capítulos que se desarrollan en lo que sigue de esta Tesis.

Previo a entrar en el tratamiento de cada uno de los 12 capítulos, estimo conveniente hacer notar en este punto que desde que se inició el presente Trabajo de Tesis ha transcurrido algún tiempo, durante el cual hubieron muchos sucesos importantes en mi vida. Algunos de ellos fueron muy buenos, otros no tan buenos y algunos muy lamentables.

Entre las cosas buenas de destacar deseo mencionar mi casamiento y, con el correr del tiempo, la llegada de mi hija Sofía, quién cambió mi vida llenándola de felicidad.

Entre las cosas no muy buenas, debo destacar la gran cantidad de inconvenientes que se presentaron y retrasaron la finalización de este Trabajo de Tesis, pero que felizmente pude superar, se debieron a diversos factores. Entre ellos debo destacar la necesidad de cimentar mis conocimientos en disciplinas tales como: análisis estadístico; termodinámica de procesos irreversibles; fenómenos de transporte; adiestrarme en el manejo de distintos tipos de software; etc. Otro factor importante que debo destacar, es el hecho de que la bibliografía básica relativa al proceso de secado en sí, no resulta del todo precisa debido a que en ella no se indican específicamente los límites de validez adjuntos a cada uno de los distintos modelos cinéticos. También deseo destacar como importante, el error que cometí de seguir los criterios que se utiliza con mayor frecuencia en la bibliografía para elegir la variable intensiva del proceso, la cual es definida como la relación entre la masa de agua que contiene la muestra vegetal con respecto de la masa de sólido seco. Es decir:

$$M = \frac{m_w^L}{m_s^S}$$

donde: M, es el contenido de humedad en base seca del vegetal; m_w^L y m_s^S , son masa de agua y de sólido seco, respectivamente; adjuntas a la muestra vegetal.

Mediante esta variable, en un principio, se correlacionaron muchísimos datos, pero con el correr del tiempo pude darme cuenta que no era la variable intensiva más apropiada para seguir los cambios observados durante el secado de rodajas de berenjena. Con mi director actual de Trabajo de Tesis, discutí la necesidad de reprocesar todos los datos obtenidos con la nueva variable intensiva que estoy trabajando actualmente, pero llegamos a la conclusión de que eso no iba a modificar mayormente algunas de las conclusiones que se obtuvieron oportunamente, y en lo único que redundaría sería en dilatar aún más la finalización de este Trabajo de Tesis. Por tal motivo, se podrá ver en algunos capítulos, que muchos datos experimentales fueron correlacionados por modelos generalizados, de tipo: $M = F(t)$.

Entre las cosas ingratas que me sucedieron, debo mencionar la lamentable e inesperada pérdida de mi director de trabajo, el Dr. Jorge Ramón Avanza. Esto significó para mí un duro golpe, principalmente por sus filiales afectos y mi profunda amistad con su hija mayor y los demás miembros de su familia. Como muy bien pude apreciar con el correr tiempo, el Dr. Avanza fue una persona muy querida y respetada intelectualmente, por muchos de sus colegas y amigos que se hallan dispersos a lo largo y ancho de nuestro

país. Como una manera de demostrar todo mi agradecimiento por su enseñanza y consejos recibidos, dedico al Dr. Jorge Ramón Avanza el presente Trabajo de Tesis Doctoral.

NOTACION

a	cromaticidad rojo-verde
a_w	actividad del agua
A	área de una superficie de control abierta a flujos convectivos, [ℓ^2]
A_1, A_2	áreas de control abiertas a flujos convectivos de ingreso y de salida del sistema experimental, respectivamente, [ℓ^2]
A	coeficiente empírico: ec.(4.2); ec.(4.5); ec.(5.2); modelos de Henderson y Pabis (1961); de Wang y Singh (1978); de Yaldız y Ertekin (2001); de Midilli y col. (2002)
A°	factor preexponencial
Abs	absorbancia
ΔA	diferencia de absorbancia
$A _k$	área de la k-ésima superficie abierta a un flujo convectivo, [ℓ^2]
A_{tot}^o	área total de la superficie expuesta de una muestra vegetal húmeda tipo rodaja, [ℓ^2]
A_s	aire seco no condensable
b	cromaticidad azul-amarillo
b_1, b_2	coeficientes cinéticos de la ec.(11.2), $1/[t]$ y $1/[t^2]$, respectivamente
B	coeficiente empírico: ec.(4.2); ec.(4.5); ec.(5.2); modelo de Wang y Singh (1978); de Midilli y col. (2002)
BI	índice de pardeamiento (browning index)
c_1, c_2, c_3	coeficientes de la ec.(7.6)
c_{pf}	calor específico por unidad de masa del fluido, [ℓ^2]/[t^2][T]
C	constante de la ec.(11.23)
C	contenido de glucosa
C^*	intensidad del color (Chroma)
C	coeficiente empírico: modelo de Yaldız y Ertekin (2001)
C_b	constante relacionada con el calor de sorción o constante energética
C_g	constante de Guggenheim
COR	porcentaje de recuperación de agua con respecto de la muestra inicial fresca
CRS	coeficiente de retención de materia seca
$\%C_D$	porcentaje de contracción con respecto del diámetro

$\%C_e$	porcentaje de contracción con respecto del espesor
$\%C_{Em}$	porcentaje de contracción con respecto del eje mayor
$\%C_{En}$	porcentaje de contracción con respecto del eje menor
$\%C_\ell$	porcentaje de contracción con respecto de la longitud característica
D	diámetro de rodajas de berenjena, [ℓ]
$\mathcal{D}_{ef}$	coeficiente de difusión, [ℓ^2]/[t]
$\mathcal{D}_0$	factor de Arrhenius, [ℓ^2]/[t]
e	espesor de una muestra de berenjena tipo rodaja o tipo lonja, [ℓ]
e'	espesor teórico estimado, [ℓ]
$\%E$	error porcentual
Ea	energía de activación, [m][ℓ^2]/[t^2]
En	longitud del eje menor de un corte tipo lonja, [ℓ]
Em	longitud del eje mayor de un corte tipo lonja, [ℓ]
ΔE	diferencia total de color
F_{mik}^f	caudal másico de la especie química i de la fase fluida f ($f=G$, gas; $f=L$, líquida), evaluado sobre áreas de control abiertas a flujos convectivos del sistema experimental ($k=1$, área de ingreso; $k=2$; área de salida), [m]/[t]
F_{V1}^G	flujo volumétrico de aire húmedo medido en el área de ingreso al sistema, [ℓ^3]/[t]
F_{V2}^G	flujo volumétrico de aire húmedo medido en el área de salida del sistema, [ℓ^3]/[t]
$F_{V\infty}^G$	flujo volumétrico del aire húmedo a la salida de la zona de calefacción, [ℓ^3]/[t]
F_{vik}^f	flujo volumétrico de la especie química i de la fase fluida f ($f=G$, gas; $f=L$, líquida), evaluado sobre áreas de control abiertas a flujos convectivos del sistema experimental ($k=1$, área de ingreso; $k=2$; área de salida), [ℓ^3]/[t]
h	coeficiente de transferencia convectiva de calor, [m]/[t^3][T]
$\mathcal{H}$	humedad del aire
$\mathcal{H}_1$	humedad del aire medida en el punto de ingreso al sistema experimental
$\mathcal{H}_2$	humedad del aire medida en el punto de salida del sistema experimental
$\mathcal{H}_p$	humedad porcentual del aire
$\mathcal{H}_{p1}$	humedad porcentual del aire correspondiente al punto de ingreso al sistema experimental

$\mathcal{H}_{p2}$	humedad porcentual del aire correspondiente al punto de salida del sistema experimental
$\mathcal{H}_{p\infty}$	humedad porcentual del aire correspondiente a la salida de la zona de calefacción
$\mathcal{H}_R$	porcentaje de humedad relativa
$\mathcal{H}\mathcal{R}_{eq}$	humedad relativa porcentual de equilibrio del aire
$\mathcal{H}_{sat}$	humedad de aire húmedo saturado
H^*	atributos de color (Hue)
K	constante de corrección de las propiedades de la multicapa con respecto del líquido
k	coeficiente cinético: ec.(5.8); modelos de Mujumdar y Menon (1995); de Page (1949); de Overhults y col. (1973); de Henderson y Pabis (1961); de Wang y Singh (1978); de Yaldiz y Ertekin (2001); de Midilli y col. (2002)
k_c	coeficiente de transferencia convectiva de masa, $[m]/[\ell^2][t]$
ℓ	longitud característica de la muestra vegetal, $[\ell]$
$[\ell]$	unidad de longitud
L	luminosidad
$[m]$	unidad de masa
m_A^G	masa de aire húmedo, $[m]$
m_{As}^G	masa de aire seco, $[m]$
m_W^G	masa de vapor de agua contenida en el aire, $[m]$
m_V^L	masa de especies químicas volátiles que contiene la muestra vegetal, $[m]$
m_W^L	masa de agua que contiene la muestra vegetal, $[m]$
m_{Weq}^L	masa de agua de equilibrio de la muestra vegetal, $[m]$
m_{tot}^S	masa total de la muestra vegetal húmeda, $[m]$
m_s^S	masa de sólido seco de la muestra vegetal, $[m]$
m_{rh}	masa de la muestra rehidratada, $[m]$
m_{rh}^o	masa del producto seco antes de rehidratar, $[m]$
m_{rh}^∞	masa de la muestra rehidratada a tiempo infinito, $[m]$
m_{sreh}	masa de sólido seco del material rehidratado, $[m]$
M	humedad en base seca del vegetal ($[m]$ de agua/ $[m]$ de sólido seco)

M_{eq}	humedad de equilibrio de la muestra vegetal ($[m]$ de agua de equilibrio/ $[m]$ de sólido seco)
M_r	relación de humedad libre de la muestra vegetal ($[m]$ de agua libre sin evaporar/ $[m]$ de agua libre inicial)
M_{mb}	contenido de humedad de la monocapa del modelo de BET ec. (7.4)
M_{mg}	contenido de humedad de la monocapa del modelo de GAB ec. (7.5)
M^*	humedad crítica de la muestra vegetal
M'	humedad residual de la muestra vegetal
MBE	error medio
MR	relación de humedad de la muestra vegetal húmeda ($[m]$ de agua/ $[m]$ inicial de agua)
n	coeficiente empírico de los modelos: de Page (1949); de Overhults y col. (1973)
n_A^G, n_W^G	moles de aire húmedo y de vapor de agua, respectivamente
$n_W^{(m_i)}$	densidad de flujo másico de vapor de agua evaluada en la superficie interfacial de la muestra vegetal, $[m]/[\ell^2][t]$
N	número de datos experimentales
N	número de la Tabla que identifica al conjunto de datos experimentales que se obtuvieron a un mismo valor inicial de las factores del sistema
N_j	número de datos experimentales de la j-ésima tabla
p	presión total del sistema, $[m]/[\ell][t^2]$
p	presión de vapor del agua contenida en el alimento, $[m]/[\ell][t^2]$
p	nivel de significancia en un test LSD de Fisher
p°	presión de vapor del agua pura, $[m]/[\ell][t^2]$
p_1	presión total medida en el punto de ingreso al sistema experimental, $[m]/[\ell][t^2]$
p_2	presión total medida en el punto de salida del sistema experimental, $[m]/[\ell][t^2]$
p_W	presión parcial de vapor de agua en aire húmedo, $[m]/[\ell][t^2]$
p_{Wsat}	presión parcial de vapor de agua en aire húmedo saturado, $[m]/[\ell][t^2]$
p_∞	presión total del aire húmedo a la salida de la zona de calefacción, $[m]/[\ell][t^2]$
p°	presión de vapor del agua pura a la temperatura T, $[m]/[\ell][t^2]$
%P	error porcentual promedio
q_c	densidad de flujo de calor, $[m]/[t^3]$
r	potencia, ec.(7.7)

r_{sec}	velocidad de secado, $[m]/[\ell^2][t]$
R	constante de los gases, $[m][\ell^2]/[t^2][T]$
R^2	coeficiente de correlación
RR	grado de rehidratación
RR_{max}	capacidad de rehidratación máxima
$RMSE$	raíz cuadrada media del error
t	tiempo, $[t]$
$[t]$	unidad de tiempo
$t_{\text{máx}}$	tiempo máximo de secado, $[t]$
T	temperatura, $[T]$
T	temperatura del aire de secado, $[T]$
$[T]$	unidad de temperatura
$T_1, T_2,$	temperaturas del aire húmedo en las áreas de ingreso y de salida del sistema experimental, respectivamente, $[T]$
$T_{\text{bh1}}, T_{\text{bh2}}$	temperatura de bulbo húmedo del aire en las áreas de ingreso y de salida del sistema experimental, respectivamente $[T]$
T_M	temperatura de la muestra vegetal, $[T]$
T_Ω	temperatura sobre la superficie interfacial, $[T]$
T_∞	temperatura evaluada en el seno de la corriente gaseosa, $[T]$
T_∞	temperatura de bulbo seco del aire medida a la salida de la zona de calefacción, $[T]$
v_A^G	velocidad media del aire húmedo, $[\ell]/[t]$
v_{A1}^G, v_{A2}^G	velocidad media del aire húmedo en las áreas de ingreso y de salida del sistema experimental, respectivamente, $[\ell]/[t]$
v_{As1}^G	velocidad media del aire seco en el área de ingreso al sistema experimental, $[\ell]/[t]$
v_{As2}^G	velocidad media del aire seco en el área de salida del sistema experimental, $[\ell]/[t]$
v_∞	velocidad del aire de secado, $[\ell]/[t]$
Var_j	varianza asociada al modelo j , ec.(11.4)
V_{tot}^S	volumen total de la muestra vegetal, $[\ell^3]$
$V_{W^\circ}^S$	volumen inicial de agua que contiene la muestra vegetal húmeda, $[\ell^3]$
w_V^G	flujo másico de las especies químicas volatilizables evaluada sobre la superficie interfacial, $[m]/[t]$

w_w^G	flujo másico de vapor de agua evaluada sobre la superficie interfacial, $[m]/[t]$
w_w^G	velocidad de secado de la muestra vegetal, $[m]/[t]$
w_w^*	velocidad adimensional de secado, ec.(11.13)
w_{tot}^f	flujo másico total de las especies químicas que se hallan en la fase fluida f ($f=G$, fase gas; $f=L$, fase líquida), que se transfieren desde una fase a la otra a través de la superficie interfacial, debido a mecanismos de transporte convectivos, $[m]/[t]$
w_i^f	flujo másico de la i -ésima especie química que se halla en la fase fluida f ($f=G$, fase gas; $f=L$, fase líquida), que se transfiere desde una fase a la otra a través de la superficie interfacial, debido a mecanismos de transporte convectivos, $[m]/[t]$
$w_i^G _{\Omega}$	flujo másico de la i -ésima especie química gaseosa evaluada sobre la superficie interfacial Ω , $[m]/[t]$
W	vapor de agua condensable
X	masa de agua evaporada con respecto de la masa inicial del vegetal húmedo o grado de secado de la muestra vegetal

Letras griegas

α	coeficiente de proporcionalidad, ec.(7.7)
β	coeficiente, ec.(11.12)
γ	parámetro que toma en cuenta la estructura del sorbato agua, ec.(7.7)
δ	potencia, ec.(9.3)
ε_{tot}^0	porosidad inicial de la muestra vegetal húmeda
$\langle \varepsilon_j(\%) \rangle$	error porcentual de regresión asociado al modelo j -ésimo, ec.(11.3)
ρ	densidad, $[m]/[\ell^3]$
ρ_w	densidad del agua, $[m]/[\ell^3]$
ρ_{tot}^0	densidad inicial de la muestra vegetal, $[m]/[\ell^3]$
ρ_A^G	densidad del aire húmedo, $[m]/[\ell^3]$
ρ_{A1}^G, ρ_{A2}^G	densidad del aire húmedo en las áreas de entrada y de salida de sistema experimental, respectivamente, $[m]/[\ell^3]$
ρ_f	densidad del fluido, $[m]/[\ell^3]$

ρ_{As}^G	concentración másica de aire seco, $[m]/[\ell^3]$
ρ_W^G	concentración másica del vapor de agua en el aire húmedo, $[m]/[\ell^3]$
λ_W	calor latente de vaporización por unidad de masa de agua, $[\ell^2]/[t^2]$
Ω	área total de la superficie expuesta de la muestra o superficie control, $[\ell^2]$
$\omega_{W\Omega}$	fracción másica de vapor de agua evaluada en la superficie interfacial
$\omega_{W\infty}$	fracción másica de vapor de agua evaluada en el seno de la corriente gaseosa
ξ	coordenada interna en la que tiene lugar la difusión, $[\ell]$
χ^2	chi cuadrado

Supraíndices

o	variable medida en el instante inicial
exp	dato experimental
cal	dato calculado

Subíndices

exp	dato experimental
teo	dato calculado

INDICE

Agradecimientos.....	7
Prefacio.....	10
Notación.....	13
Índice.....	21

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

1.1. CONSIDERACIONES GENERALES.....	27
1.1.1 Antecedentes.....	27
1.1.2 Características generales, cultivo y cosecha.....	27
1.1.3 Producción e importancia económica.....	28
1.1.4 Manejo post-cosecha.....	31
1.1.5 Consumo, usos y aporte nutricional.....	31
1.2. PRESERVACIÓN DE ALIMENTOS.....	33
1.2.1 Conservación por deshidratación.....	34
1.2.2 Sistemas de deshidratación.....	37
1.2.3 Isotermas de adsorción.....	38
1.3 CAMBIOS FISICOQUÍMICOS QUE SE PRODUCEN DURANTE EL SECADO.....	39
1.3.1 Fenómenos físico-químicos y estructurales.....	39
1.3.2 Pardeamiento de las muestras vegetales.....	42
1.4. REHIDRATACIÓN DE PRODUCTOS DESHIDRATADOS.....	46
1.5. ALMACENAMIENTO DE PRODUCTOS DESHIDRATADOS.....	47
1.6. ESTADO DEL CONOCIMIENTO RESPECTO DEL SECADO DE BERENJENAS.....	48
1.7. RESUMEN DE LA LABOR REALIZADA EN EL PRESENTE TRABAJO DE TESIS DOCTORAL.....	50

Capítulo 2: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. MATERIA PRIMA VEGETAL.....	53
2.2. ENSAYOS DE DESHIDRATACIÓN POR CONVECCIÓN FORZADA CON AIRE CALIENTE.....	53
2.2.1 Experimentos preliminares con muestras individuales.....	53

2.2.2 Equipo experimental y condiciones operativas.....	54
2.3. CAMBIOS ESTRUCTURALES QUE EXPERIMENTA LA MUESTRA.....	56
2.3.1 Cambios macroestructurales.....	56
2.3.2 Cambios estructurales microscópicos.....	57
2.4. CAMBIOS QUÍMICOS.....	58
2.5. ENSAYOS DE REHIDRATACIÓN.....	62
2.5.1 Método empleado.....	62
2.5.2 Medidas de textura.....	62
2.6. ALMACENAMIENTO.....	63
2.6.1 Preparación y almacenado de las muestras deshidratadas.....	63
2.6.2 Análisis microbiológico.....	64
2.6.3 Isotermas de adsorción.....	65
2.7. DESHIDRATACIÓN EN BANDEJAS.....	66

Capítulo 3: RESULTADOS Y DISCUSION

PARTE 1: Deshidratación

3.1. INTRODUCCIÓN.....	69
3.2. DATOS EXPERIMENTALES CORRESPONDIENTES AL SECADO DE	
MUESTRAS VEGETALES.....	71
3.2.1 Influencia de la velocidad de aire de secado.....	71
3.2.2 Influencia de la temperatura de secado.....	73
3.2.3 Efecto de las dimensiones iniciales de las rodajas.....	75
3.2.4 Velocidad de secado en función del contenido de humedad.....	82

Capítulo 4: RESULTADOS Y DISCUSION

PARTE 2: Cambios físicos durante el secado

4.1. INTRODUCCIÓN.....	88
4.2. CAMBIOS ESTRUCTURALES QUE EXPERIMENTA LA MUESTRA	
VEGETAL.....	89
4.2.1 Contracción de las longitudes características.....	89
4.2.2 Variación del volumen en función del contenido de humedad.....	97
4.3. OBSERVACIONES SOBRE VARIACIONES EN LA MICRO-	
ESTRUCTURA.....	103

4.4. COMENTARIOS FINALES.....	110
-------------------------------	-----

Capítulo 5: RESULTADOS Y DISCUSION

PARTE 3: Cambios químicos durante el secado

5.1. INTRODUCCIÓN.....	112
5.2. CONTENIDO NUTRICIONAL DEL PRODUCTO FRESCO Y SECO.....	113
5.3. VARIACIONES DE ALGUNOS COMPONENTES DURANTE EL SECADO.....	114
5.3.1 Azúcares reductores extraíbles.....	114
5.3.2 Estudios de pH.....	116
5.3.3 Acidez titulable	116
5.4. PARDEAMIENTO.....	117
5.4.1 Estudios de antipardeamiento.....	124

Capítulo 6: RESULTADOS Y DISCUSION

PARTE 4: Rehidratación

6.1. INTRODUCCIÓN.....	129
6.2. REHIDRATACIÓN DE RODAJAS NO TRATADAS.....	131
6.2.1 Influencia de la temperatura de secado.....	131
6.2.2 Influencia de la temperatura de rehidratación.....	134
6.2.3 Influencia del tamaño de los trozos.....	136
6.2.4 Variación de textura de las rodajas durante la rehidratación.....	140
6.3. REHIDRATACIÓN DE RODAJAS TRATADAS.....	141

Capítulo 7: RESULTADOS Y DISCUSION

PARTE 5: Isotermas de adsorción y almacenamiento

7.1. INTRODUCCIÓN.....	147
7.2. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN Y TRATAMIENTO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES.....	152
7.3. ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO.....	157

Capítulo 8: RESULTADOS Y DISCUSION

PARTE 6: Tratamiento cinético

8.1. INTRODUCCIÓN.....	160
8.2. OBJETIVO.....	161
8.3. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO	161
8.4. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL.....	162
8.4.1 Caracterización deL Subsistema gaseoso.....	163
8.4.2 Variables fisicoquímicas adjuntas al subsistema gaseoso.....	164
8.4.3 Caracterización de la muestra vegetal.....	166
8.4.4 Conclusiones acerca del sistema experimental.....	166
8.5. MODELADO DEL SISTEMA EXPERIMENTAL.....	167
8.5.1 Modelado de la fase gaseosa	167
8.5.2 Modelado de la muestra vegetal húmeda.....	168
8.5.3 Ecuación fundamental del modelado.....	170
8.6. CARACTERIZACIÓN DE LOS MODELOS CINÉTICOS.....	171

Capítulo 9: RESULTADOS Y DISCUSION

PARTE 7: Tratamiento cinético mediante la segunda ley de Fick

9.1. INTRODUCCIÓN.....	175
9.2. TRATAMIENTO CINÉTICO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES.....	182
9.2.1 Cálculo del coeficiente de difusividad efectiva del agua considerando la disminución del espesor instantáneo experimental.....	182
9.2.2 Cálculo del coeficiente de difusividad efectiva del agua considerando la disminución de volumen.....	188

Capítulo 10: RESULTADOS Y DISCUSION

PARTE 8. Ensayos de deshidratación en bandejas

10.1. INTRODUCCIÓN.....	192
10.2. RESULTADOS Y TRATAMIENTO CINÉTICO.....	194
10.3. EVALUACIÓN DEL GRADO DE PARDEAMIENTO DURANTE EL SECADO.....	202

Capítulo 11: RESULTADOS Y DISCUSION

PARTE 9. Tratamiento cinético mediante el empleo de un software

11.1. METODOLOGÍA.....	205
11.2. ESTADO INICIAL DE LOS PRINCIPALES FACTORES.....	206
11.3. RESULTADOS DEL TRATAMIENTO CINÉTICO.....	209
11.3.1 Modelo de correlación más probable.....	209
11.3.2 Comentarios acerca del modelo de correlación más probable.....	214
11.4. ANÁLISIS FENOMENOLÓGICO DEL MODELO MÁS PROBABLE.....	214
11.4.1 Velocidad de secado en función del tiempo.....	215
11.4.2 Velocidad de secado en función del grado de secado.....	216
11.4.3 Análisis de los principales parámetros cinéticos del proceso.....	217
11.4.4 Estimaciones del tiempo de secado.....	219
11.5. CINÉTICA DE LA EVAPORACIÓN DESDE UNA SUPERFICIE	
MOJADA.....	221

Capítulo 12: CONCLUSIONES

12.1. GENERALIDADES.....	225
12.2. DESHIDRATACIÓN MEDIANTE SECADO.....	225
12.3. CAMBIOS ESTRUCTURALES OBSERVADOS Y CUANTIFICADOS.....	226
12.4. CAMBIOS QUÍMICOS ESTUDIADOS.....	228
12.5. GRADO DE REHIDRATACIÓN O REHIDRATABILIDAD.....	229
12.6. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN Y ALMACENAMIENTO.....	231
12.7. TRATAMIENTO CINÉTICO.....	232
12.7.1 Modelado del sistema experimental.....	232
12.7.2 Modelos cinéticos aplicados al secado individual de rodajas y lonjas de berenjena.....	233
12.7.3 Modelos cinéticos aplicados al secado en bandejas de rodajas de berenjena.....	238
BIBLIOGRAFÍA.....	240

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. CONSIDERACIONES GENERALES

1.1.1 Antecedentes

La berenjena *Solanum melongena*, L. es una especie vegetal de la familia de las solanáceas, nativa de los climas tropicales. Los especialistas encuentran su origen en el este de la India, donde su crecimiento era prácticamente espontáneo. La mitología hindú la consideraba como un regalo de los dioses al pueblo, ya que su consumo le proporcionaba calma y sosiego. Posteriormente, en los siglos XIV - XV los árabes introdujeron esta hortaliza en Europa, extendiéndose su cultivo por todo el Mediterráneo durante el siglo XVI. En América fue introducida por los conquistadores y cultivada en Brasil alrededor del año 1650. (Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, 2001; Kashyap y col., 2003)

Pero más allá del origen divino atribuido por los hindúes, la berenjena tuvo poca aceptación durante los primeros años en Europa, debido a que le atribuyeron generación de locura en quienes las consumían y ser tóxica para el organismo, por lo que los botánicos del siglo XVI la denominaron *manzana loca*.

Con la llegada de los colonizadores al nuevo mundo, esta especie hortícola comenzó a difundirse en diversos países del continente americano, de tal forma que en la actualidad se destaca su cultivo en EE.UU., México y Argentina.

Se la denomina: *beringela*, en Brasil; *eggplant*, en Estados Unidos; *aubergine*, en Francia; y *melanzana*, en Italia.

1.1.2 Características generales, cultivo y cosecha

La berenjena es una planta anual y herbácea. La porción comestible es la pulpa del fruto.

Desde el punto de vista agronómico, los cultivares de berenjena se clasifican de acuerdo a la precocidad, color y forma de los frutos. Se pueden encontrar frutos de color violeta (negra), blanca y jaspeada o veteada. En cuanto a la forma puede ser ovalada, en forma de pera, redonda o alargada.

El ciclo de las berenjenas es de nueve a diez meses. Desde que se planta hasta que se inicia la recolección suelen transcurrir 100 a 125 días, según las variedades y época de

cultivo. La recolección se realiza manualmente, y tarda entre 25 a 40 días en alcanzar la maduración, luego de la polinización. (Ryall y Lipton, 1983).

Se desarrolla favorablemente en regiones de clima tropical, pues la planta requiere para su crecimiento exitoso temperaturas cálidas para llevar a cabo su ciclo biológico. La temperatura óptima para el crecimiento de la planta es de 23-25 °C, durante el día, y 16-18 °C, durante la noche. A temperatura inferior a 12°C se observa malformación de los primeros frutos, transformación de sépalos en hojas, etc.

Según datos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional correspondiente al periodo 1961-1990, la provincia de Corrientes presenta temperaturas medias de 27°C, en las estaciones de primavera-verano (con mínima de 21°C y máxima de 34°C) y de 15°C en el otoño e invierno (con mínima de 11°C y máxima de 21°C).

En la provincia de Corrientes, la cosecha se inicia en el mes de abril y se extiende hasta fines de diciembre.

1.1.3 Producción e importancia económica

La producción mundial de berenjena, conforme a datos de la FAO, que registra los correspondientes a solamente 68 países, se ubica en las 34 millones de toneladas. Se estima que el total real superaría los 45 millones de toneladas, de contarse con los datos del total de los países productores. A pesar de ello, se destaca en la información disponible una importante evolución en los últimos 15 años, con un incremento del 165 %, pasando de 12.8 millones de toneladas en 1990 a 34 millones en 2005. Más del 80 % de la producción se concentra entre China (53 %) e India (30%). Les siguen en orden de importancia, aunque con una participación muy reducida: Egipto con 3.1 %, Turquía 2.9 %, Japón 1.2 %, Italia 1.1 % Sudan 0.9 % e Indonesia 0.8 %.

Los principales países que demandan esta hortaliza son: EEUU con 57807 toneladas, Francia 38552 tons., Alemania 28842 tons., Siria 22251 tons., Reino Unido 15928 tons., China 14883 tons., Canadá 13596 tons., Italia 11780 tons., Rusia 11196 tons., Holanda 9712 tons., y Líbano 6339 tons. (Sagpya, 2007)

Argentina, conforme a los datos del Censo Nacional Agropecuario del año 2002 (ver Tabla 1.1), cuenta con una superficie implantada de 1254.3 hectáreas a campo y 28.9

hectáreas bajo cubierta. Esto permite estimar una producción superior a las 30.000 toneladas anuales.

Tabla 1.1: Superficie implantada con Hortalizas Bajo Cubierta (m²)
Censo Nacional Agropecuario 2002. Hortalizas y Legumbres

Superficie implantada con Hortalizas Bajo Cubierta (m ²) – CNA 02												
Provincia	TOTAL	Acelga	Aji	Ajo	Apio	Batata	Berenjena	Brócoli	Calabaza	Cebolla	Chaucha	Choclo
Mendoza	143.741	4.000	0	8	3.000	0	200	0	4.000	4.000	6.000	0
San Juan	19.000	1.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cuyo	162.741	5.000	0	8	3.000	0	200	0	4.000	4.000	6.000	0
Chaco	100.838	8.760	0	100	0	104	300	0	0	0	6.000	0
Corrientes	9.891.641	23.777	16.890	1.050	308	300	45.908	60	0	50	122.441	37
Formosa	149.410	26.225	1.800	1.005	1.310	0	1.200	2.000	900	1.500	600	700
Misiones	178.455	3.268	1.390	65	400	755	2.184	400	403	400	2.204	565
Catamarca	12.433	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
NEA	10.332.777	62.050	20.080	2.220	2.018	1.159	49.592	2.460	1.303	1.950	131.245	1.303
Jujuy	159.983	44	0	2	0	0	1	0	0	8	0	2
La Rioja	6.548	330	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Salta	2.391.570	250	50.000	0	250	0	70.000	0	0	0	0	0
Santiago del Estero	66.663	700	0	0	0	0	10.000	0	30	4	0	10.000
Tucumán	293.665	0	2.300	0	0	0	50	0	0	0	0	0
NOA	2.918.429	1.324	52.300	2	250	0	80.051	0	30	12	0	10.002
Buenos Aires	14.226.794	254.428	26.475	400	1.413.776	0	144.855	15.820	1.010	9.825	158.522	1.640
Córdoba	270.822	10.322	0	103	32.719	8.000	1.000	0	500	4.100	0	0
Entre Ríos	1.031.261	42.890	10.256	200	21.009	0	1.286	300	140	38	9.708	400
La Pampa	33.205	6.260	55	0	50	0	1.010	80	200	0	90	100
San Luis	67.000	0	5.000	0	9.400	0	10.000	0	0	0	0	0
Santa Fe	354.070	1.590	0	0	44.750	0	870	265	1.750	50	3.950	400
Pampeana	15.983.152	315.490	41.786	703	1.521.704	8.000	159.021	16.465	3.600	14.013	172.270	2.540
Chubut	45.292	4.242	5.237	26	33	0	234	2	17	46	10	452
Neuquén	36.188	1.342	320	7	5.856	0	230	81	14	203	1.242	112
Río Negro	114.408	3.923	1.546	49	15.403	0	240	10.000	30	25	3.861	406
Santa Cruz	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tierra del Fuego	20.024	682	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0
Patagonia	215.912	10.189	7.103	82	21.292	0	729	10.083	61	274	5.113	970
TOTAL PAIS	29.613.011	394.053	121.269	3.015	1.548.264	9.159	289.593	29.008	8.994	20.249	314.628	14.815

Fuente: INDEC

Las principales provincias productoras son: Buenos Aires 23 %; Santa Fe 17 %; Salta 17.5 %; Córdoba 7.5 %; Jujuy 6.8 %; Mendoza 6.8 % y Formosa 4.3 %. Su cultivo se extiende también al resto de las provincias aunque en menor medida.

El mercado interno se encuentra abastecido a lo largo de todo el año, básicamente por la producción nacional.

En el Mercado Central de Buenos Aires, principal centro de concentración de la ciudad de Buenos Aires y alrededores, la oferta anual proviene en gran medida del NOA y de la provincia de Buenos Aires. También intervienen Santa Fe y Corrientes con participaciones superiores al 3 %, y otras provincias que aportan menos de 0.5 %. En el año 1997, la producción de Corrientes cubrió cerca del 6 % de las necesidades internas del país. En el promedio de los años 2003 a 2006, la participación provincial en la oferta fue: Salta más de 60 %, Buenos Aires 23 %, Santa Fe 8 %, Jujuy 4 % y Corrientes 3 %.

El ingreso al Mercado de Concentración de Buenos Aires se produce a lo largo de todo el año desde distintas zonas del país, con una disminución en la cantidad de bultos durante los meses de invierno, época en la que comienza la importación desde Paraguay y Brasil, para satisfacer la demanda requerida. (ver Tabla 1.2) (Sagpya, 2007)

Tabla 1.2: Disponibilidad de oferta zonal en la Argentina. (Sagpya, 2007)

Provincia	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Buenos Aires												
Salta												
Santa Fe												
Corrientes												
Jujuy												
Formosa												
Mendoza												
Brasil												
Paraguay												

Abundante
 Regular
 Escaso o nulo

1.1.4 Manejo post-cosecha

Dentro de los factores ambientales que influyen en el deterioro de los productos hortícolas se encuentran: la temperatura, la humedad relativa, la composición atmosférica y la presencia de etileno.

La berenjena presenta una perecibilidad relativa alta (Jha y Matsuoka, 2001) y su vida potencial por almacenamiento es de 2 a 4 semanas a temperatura y humedad relativa adecuada. Perteneciente a un grupo de vegetales que se dañan con temperaturas mayores a 30°- 35°C, tienen un rango óptimo de tránsito y almacenamiento que varía entre 10° y 12.5°C, a 90-95 % de humedad relativa ambiente; son susceptibles al daño por frío a temperaturas por debajo de 0°C, (Mangione y Sanchez, 1999; Moretti y col., 2005) donde para ciertas variedades de berenjena el intervalo crítico es de 1 a 5 °C (Rodríguez, 2000). Además, es muy sensible a la presencia de etileno, y aunque tiene una baja producción de este gas, al igual que el pimiento, el melón, el zapallo y la sandía, debe cuidarse de no exponerlos junto a otros productos vegetales que sí lo generan, ya sea durante el almacenamiento o el transporte. La exposición de estos frutos al etileno disminuye su tiempo de conservación de 14 días a 3-5 días. (Mangione y Sanchez, 1999).

Rodríguez (2000) encontró que el tratamiento con aire a 35°C durante 1 hora y almacenamiento en bolsas PBD (polietileno de baja densidad) selladas, resultaron efectivos para reducir la incidencia del daño por frío en frutos enteros de berenjenas de tipo *Black nite*.

1.1.5 Consumo, usos y aporte nutricional

La berenjena siempre fue considerada una hortaliza de importancia secundaria, sin embargo ha habido un creciente interés de la población por consumir productos de origen vegetal con bajas calorías, de manera que su volumen de comercialización ha venido aumentando continuamente. (Moretti y col., 2005).

Sus frutos se consumen cocidos, fritos, asados o en escabeches. En algunos países, como Italia, se los prepara como dulces. En Brasil se están ensayando mezclas para preparar biscochos a partir de la harina de berenjena (Perez y Germani, 2007).

Es una Solanácea rica en minerales (especialmente hierro) y vitaminas A, B₁, riboflavina, niacina y ácido ascórbico. (Flick, y col., 1978; Kashiap y col., 2003). En la

Tabla 1.3 se detalla el contenido nutricional de la berenjena (ver también Belitz y Grosh, 1988)

Además, es uno de los diez vegetales que poseen una elevada capacidad de absorción de radicales oxígeno y esto es atribuido a su alto contenido de polifenoles. (Cao, y col., 1996). Whitaker y Stommel (2003), encontraron que el contenido de conjugados del ácido hidroxycinámico con potencial efecto benéfico para la salud, es substancial en el fruto de berenjenas de cultivares comerciales (0.5-1.5 % en base seca), ubicando al fruto de berenjena a la par de la cereza dulce, kiwi y otros frutos de elevado contenido en ácido fenólicos (King y Young, 1999). La actividad antioxidante de sus extractos ha sido objeto de estudios recientes y ha sido reportada por Noda y col (2000), Huang y colaboradores (2004), Hanson y col., (2006), Singh y col. (2009).

Tabla 1.3: Contenido nutricional de berenjena ("Tablas de composición de alimentos" El pequeño "Souci- Fachmann-Krant, (1987)	
	x100g de pulpa fresca
Energía	17 Kcal
Agua	92.6 g.
Cenizas	0.5 g.
Proteínas	1.2 g.
Lípidos	0.2 g.
Fibra	1.4 g.
Hidratos De Carbono	2.5 g.
Ácidos orgánicos	0.2 g.
Sales Minerales	0.5 g.

Por otra parte, tiene antecedentes en la medicina tradicional japonesa, cuyos usos en ciertos aspectos ha comenzado a justificarse mediante investigaciones recientes.

Se le ha atribuido un efecto nutraceutico por la reducción de riesgo en dolencias del tipo coronarias y ciertos estudios han confirmado esta propiedad. Tal es el caso de investigaciones realizadas por Jorge y col. (1998) que entre otros resultados, verificaron la reducción de colesterol total y residual, LDL plasmáticas, triglicéridos y peroxidación lipídica en conejos hipercolesterolémicos, tratados con jugo de berenjena. Similares resultados obtuvieron Sudheesh y col. (1997) en ratones. Yoshikawa y col. (1996) encontraron que posee actividad antitumor y antimicrobiológica. Samaru (1989) halló que la epidermis y los sépalos del fruto poseían actividad anticarcinogénica.

1.2. PRESERVACIÓN DE ALIMENTOS

La mayoría de las frutas y hortalizas contienen más de 80 % de agua y por lo tanto son altamente perecibles. Las pérdidas ocasionadas por disminución en el contenido de agua y putrefacción de los frutos alcanzan el 30 o 40 % en países en desarrollo de clima tropical y subtropical, debido a un manejo postcosecha inadecuado, así como deficiencias en el transporte e instalaciones de almacenamiento. Además de la pérdida física y económica, se producen mermas importantes en la disponibilidad de nutrientes esenciales como vitaminas y minerales.

El mayor logro del procesamiento de alimentos es convertir estos últimos que son perecibles en productos estables, que luego serán almacenados por períodos extensos de tiempo, reduciendo pérdidas, manteniéndose disponibles en épocas de escasez y fuera de estación, especialmente en zonas alejadas del lugar de producción. (Jayaraman y Das Gupta, 1992).

Alzamora (2002), emplea conceptos ecológicos y especifica que *la preservación de alimentos se basa en la aplicación de factores de estrés conducentes a la inhibición del crecimiento y/o la muerte de la comunidad microbiológica como así también a la prevención del establecimiento de otras comunidades*. Además indica que los principales factores que afectan la sobrevivencia y el crecimiento microbiano en alimentos y que constituyen la base de la mayoría de los procesos de conservación, se clasifican en:

- factores intrínsecos: sean químicos (nutrientes, naturaleza de solutos, pH y capacidad buffer, potencial de óxido reducción, presencia de conservadores y otras sustancias antimicrobianas) o físicos (actividad de agua, viscosidad, microestructura, compartimentalización, hielo y efectos de la crioconcentración).
- factores de procesamiento: aquellos que se aplican deliberadamente a un alimento para conservarlo que provocan cambios en el número y/o tipo de microorganismos; cambios en la composición y/o estructura de alimentos.
- factores extrínsecos: aquellos que actúan fuera del alimento, controlándose la mayoría durante el almacenamiento del producto (temperatura, humedad relativa, presión parcial de oxígeno, presencia de otros gases).

- factores implícitos y microbianos: dependientes de la naturaleza de los microorganismos *per se* y de sus interacciones (microorganismos presentes, velocidades y fases lag de crecimiento, efectos sinérgicos y antagónicos).
- efectos netos: se refieren a los efectos interactivos de los factores antes citados.

La manipulación de uno o mas, de los factores antes mencionados, constituyen la base de los métodos de conservación de alimentos, entre los que encontramos: esterilización, pasteurización, aplicación de altas presiones hidrostáticas, pulsos de alto voltaje, o radiaciones, congelación, refrigeración, deshidratación ($a_w < 0.6$), reducción de actividad del agua ($0.6 < a_w < 0.86$), atmósferas modificadas y refrigeración, atmósferas modificadas enriquecidas en CO₂, acidificación, fermentación láctica o acética, adición de conservadores, enzimas y emulsificantes.

1.2.1 Conservación por deshidratación

En general, los términos que se emplean en relación con los procesos de desecación de alimentos son un tanto imprecisos. Por ejemplo, se dice que un alimento desecado al sol es aquel en el que se ha eliminado su humedad por exposición a la acción de los rayos solares, sin necesidad de aplicarle calor artificial ni controlar las variaciones de temperatura, humedad relativa o de velocidad de aire. Mientras que un alimento deshidratado, es aquel que se ha secado mediante calor producido artificialmente bajo condiciones controladas de temperatura, humedad relativa y de circulación de aire. (C.A.A., 2002; Frazier y Westhoff, 1993). Por lo tanto, el término deshidratación se reserva al secado artificial bajo condiciones controladas, a fin de que se produzcan cambios mínimos en las propiedades, tanto nutricionales como funcionales de los alimentos. Además, los términos deshidratación y secado son utilizados frecuentemente de manera indistinta.

La deshidratación es probablemente el método de conservación de alimentos perecederos más antiguo practicado por el hombre. En efecto, el hombre viene empleando la energía solar para reducir el contenido de agua de los productos alimenticios desde épocas inmemoriales, y se lo considera como el procedimiento más antiguo y menos costoso de conservación, que aún es vigente, (ver por ej.: Casp y Abril, 1999).

A partir del siglo XVIII comienza el secado acelerado, debiéndose destacar que en el año 1795 se inventa el cuarto de deshidratación mediante aire caliente.

El proceso de deshidratación consiste en la eliminación de agua contenida en el producto, de manera de prevenir el crecimiento y reproducción de microorganismos perjudiciales así como de minimizar ciertas reacciones de deterioro; proporciona una reducción substancial en peso y volumen de producto, disminuyendo el costo de empaque o embalaje y transporte, facilitando al mismo tiempo su almacenamiento por prolongados períodos de tiempo a temperatura ambiente, características que lo hacen particularmente atractivo para fines civiles, militares y espaciales. (ver: Desrosier, 1985; Jayaraman y Das Gupta, 1992; Sokhansanj y Jayas, 1995; Jayaraman y Das Gupta, 1995; Casp y Abril, 1999; Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 2000).

La principal dificultad de éste método de conservación reside en los cambios fisicoquímicas indeseables que afectan la calidad del producto final, principalmente en lo que hace a textura, sabor y apariencia; aunque su popularidad se deba principalmente a que se genera un producto nuevo, de vida útil prolongada y reducido volumen. (Maskan, 2001a).

Los alimentos secos y deshidratados son más concentrados que cualquier otra forma de productos alimenticios preservados. (Casp y Abril, 1999).

Un alimento deshidratado aceptable debe competir en precio con otros tipos de alimentos conservados; tener un sabor, olor y apariencia comparable con el del producto fresco o con los de productos procesados por otros medios; tiene que reconstituirse fácilmente, retener los valores nutritivos y ser estable durante el tiempo que dure su almacenamiento.

La demanda de productos alimenticios deshidratados, especialmente aquellos que son fácilmente reconstituibles, ha experimentado en los últimos años un notable incremento, promovido por el estilo de vida en naciones desarrolladas. Ello se debe, en parte, a la creciente resistencia de los consumidores al uso de químicos en la preservación de alimentos; y al notable aumento que ha experimentado el uso de alimentos de alta calidad, de fácil elaboración y cocción rápida.

Estos acontecimientos, han traído como consecuencia un renovado interés en el estudio de las operaciones de secado.

Desde un punto de vista tecnológico, la deshidratación es frecuentemente el paso final en un proceso industrial de alimentos y determina, en un alto porcentaje, la calidad final del producto a ser manufacturado. Estas son seguramente las dos mayores razones para la atención que aún sigue recibiendo la investigación en deshidratación. (Serenio y Medeiros, 1990)

Dada la diversidad de alimentos que pueden ser sometidos al proceso de secado, es indispensable realizar ensayos experimentales que permitan fijar las condiciones óptimas de los factores involucrados en el mismo (Susuki y col., 1976; Gabitto y Aguerre, 1985; Sgroppo y col, 1990; Fusco y col., 1991; Viollaz y Rovedo, 2002; Pabis y Jaros, 2002)

Existen relaciones matemáticas entre las principales variables controlables durante el secado y la transferencia de calor y materia. Se ha reportado un amplio número de estudios teórico-experimentales referidos a los efectos de los principales factores involucrados en la cinética del secado de vegetales, tales como: la temperatura; la humedad del aire; la velocidad del aire de secado; la forma y las dimensiones del secadero; la geometría y las dimensiones características del material a secar y su contenido inicial de humedad libre. De esta manera se pretendería lograr una mayor comprensión del proceso de secado y a su vez poder predecir adecuadamente, en base a algunas corridas experimentales, el tiempo necesario para el procesamiento de una muestra vegetal dada, así como alguna de las características finales del producto deshidratado buscado.

La diversidad de estudios cinéticos acerca de la deshidratación de vegetales hortalizas y frutas, disponibles en la bibliografía es muy amplia. Entre los mismos encontramos las investigaciones realizadas por Sgroppo y col. (1990) para la elaboración de chips de mandioca; Diamante y Munro (1991) sobre trozos de papas; Hawlader y col. (1991) acerca de tomates partidos al medio; Sigge y colaboradores (1998) acerca del efecto de la temperatura y de la humedad relativa del aire de secado sobre la cinética y tiempo de secado entre 55 y 75°C de dados de pimientos green bell (*Capsicum annuum*, L.); Midilli y col., (1999) sobre hongos y polen; Doymaz y Pala, (2002a), San Juan y col. (2003) sobre trozos de pimientos rojos; Krokida y col. (2003a) acerca de zanahoria, ajo, porotos verdes, hongos, pimientos, papa, calabaza, tomate, maíz, puerro y cebolla.

También son dignos de destacar los trabajos realizados con ciertas frutas, tales como bananas (Queiroz y Nebra, 2001), uvas (Azzouz et. al, 2002), manzanas pretratadas con

radiación gamma (Wang y Chao, 2002), kiwi (Maskan, 2001a) y damascos enteros pretratados con azufre (Togrul y Pehlivan, 2003).

1.2.2 Sistemas de deshidratación

La diversidad de productos alimenticios existente ha llevado a desarrollar numerosos tipos de secaderos para la industria alimentaria. La selección de un secadero particular, y por tanto de un método específico de secado, depende de una serie de factores entre los cuales se incluye el estado inicial de las materias primas y sus propiedades, la forma física deseada y las características del producto, las condiciones necesarias de operación y los costos del mismo, así como la disponibilidad de dicha tecnología.

Se pueden distinguir tres tipos básicos de procesos de secado aplicados a frutas y hortalizas: secado solar; deshidratación atmosférica incluyendo procesos por lote (hornos, torre, armario) y procesos continuos (túnel, cinta, lecho fluidizado, entre otros), en cámaras con pasaje previo por pulverizadores (spray), tambor y microondas; y deshidratación sub-atmosférica (vacío en estantes, tambor o cinta y liofilización). Recientemente se ha incluido el uso de procesos a baja temperatura y bajo consumo energético, tal como la deshidratación osmótica.

La liofilización es uno de los métodos que se utiliza para obtener productos deshidratados de almacenamiento prolongado, ya que la conversión del agua líquida existente en las muestras vegetales en hielo y su posterior sublimación, disminuye los cambios físicos y bioquímicos que se hallan involucrados en el deterioro de alimentos debido al crecimiento y reproducción de microorganismos. Generalmente, mediante este proceso, se logra un producto deshidratado que conserva mejor su sabor, textura y valor nutricional, que con cualquier otro método de secado, pero tiene el inconveniente que es costoso. (Long Wu y col., 2009)

Mientras que el secado al sol se practica todavía en algunas regiones del país, para ciertas frutas, tales como: higos, duraznos, ciruelas, uvas, y dátiles; el proceso de deshidratación atmosférica se utiliza para manzanas, ciruelas y varias hortalizas. Los procesos continuos, tales como túnel, cinta y lecho fluidizado son principalmente utilizados para hortalizas, así como el secado en bandejas. El secado por atomización es aconsejable para zumos de frutas concentrados y leche, y el proceso de deshidratación a

vacío es útil para frutas de baja humedad y alto contenido de azúcar. (Jayaraman y Das Gupta, 1995; Casp y Abril, 1999)

1.2.3 Isotermas de adsorción

Uno de los parámetros más importantes en alimentos deshidratados es la condición de equilibrio que determina el límite del proceso, siendo este una parte importante del gradiente que provoca el movimiento del agua. Las isotermas de adsorción muestran la relación que existe entre la actividad del agua, a_w , y la humedad de equilibrio contenida en un producto alimenticio, M_{eq} , a temperatura y presión constante.

La actividad del agua es un factor determinante en el estudio de la estabilidad de los alimentos secos, donde ésta última se define como la relación entre la presión de vapor de agua del alimento y la presión de vapor del agua líquida pura a la misma temperatura. (Singh y Heldman, 1998)

El conocimiento de las isotermas de adsorción de alimentos es de gran importancia para el desarrollo en la industria alimenticia, ya que brinda información útil para la optimización del proceso de secado y el diseño de secaderos; la selección del material de empaquetamiento (Timmerman y col, 2001); la predicción de la vida útil del producto y la evolución del contenido de humedad durante el almacenamiento, (Gal, 1987).

La relación entre actividad del agua, a_w , y la humedad de equilibrio, M_{eq} , ha sido ampliamente estudiada con el objetivo de lograr una descripción matemática del proceso y es así que se han propuesto diversas ecuaciones (algunas de ellas no desarrolladas originalmente para sistemas alimentarios) entre las que encontramos el modelo de Brunauer, Emmett y Teller (1938), (ver también Labuza, 1968; Iglesias y Chirife, 1976a) que presenta un rango limitado de aplicabilidad, hasta valores de a_w de 0.3-0.4, el modelo de Guggenheim, Anderson y de Boer (GAB) propuesto formalmente por van den Berg en 1981 con un rango de aplicabilidad de: $0.1 < a_w < 0.9$, el modelo propuesto en 1982 por Ferro Fontán, Chirife, Sancho e Iglesias, con un rango de aplicabilidad equivalente al de GAB, entre otros. (Ver por ej.: Wang y Brennan, 1991; Viswanathan; Jayas, Hulasare, 2003).

Diversos autores han tratado de ajustar estas ecuaciones a sus datos experimentales de manera de dilucidar cual de ellos es el más adecuado para describir el proceso. Entre

ellos encontramos a Wang y Brennan (1991) para papas; García y col. (1998) para okara; Gabas y col. (1998) para la cáscara y pulpa de uvas Italia; Kaymak-Ertekin y Sulatanoglu (2001) para pimientos morrones; Viswanathan y col. (2003) para rodajas de tomate y cebollas en trozos; Kaymak-Ertekin y Gedik (2004) quienes trabajaron sobre isotermas de damascos, manzanas y papas.

El envasado de productos deshidratados es el paso siguiente más importante después de una operación de secado. La selección de un material de envasado adecuado juega un papel importante en la estabilidad del producto durante su almacenamiento. (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 2000), ya que el objetivo principal es mantener durante el mayor tiempo posible su estado original (Heiss, 1977)

Los productos secos deben mantenerse siempre a una humedad de equilibrio tal que no permita el crecimiento de mohos, lo cual suele darse cuando la humedad del alimento se halla en equilibrio con una humedad relativa de aire inferior al 70%, pudiendo esta última si bien ser imprescindible, puede no ser suficiente para el mantenimiento de la calidad del producto. (Heiss, 1977)

1.3. CAMBIOS FISICOQUÍMICOS QUE SE PRODUCEN DURANTE EL SECADO

Durante la deshidratación se produce una serie de cambios fisicoquímicos, que luego influye en la calidad del producto final y en su vida útil, tales como: color, olor, "flavor", textura, valor nutricional. La rigurosidad de estos cambios depende de la composición inicial del alimento y de la severidad del método de secado empleado, principalmente.

1.3.1 Fenómenos físico-químicos y estructurales

Las frutas y hortalizas juegan un papel importante en la dieta y nutrición humana. Son fuente indispensable de nutrientes esenciales, tales como vitaminas y minerales, además de proveer fibra cruda, volumen, color, flavour y variedad a la dieta. (Jayaraman y Das Gupta, 1992).

Durante la deshidratación de los alimentos se producen cambios de naturaleza física y química, así como también modificaciones nutricionales, que dependen de la temperatura

de secado, contenido de humedad y tiempo total de procesamiento. (Kiranoudis y col., 1997; Casp y Abril, 1999)

Un calentamiento suave mejora la digestibilidad de las proteínas e hidratos de carbono, sin embargo si se utilizan temperaturas y tiempos de procesado inadecuados, pueden causar daños en el alimento. El efecto del secado en las proteínas se traduce en un descenso de la digestibilidad y valor biológico de las mismas. Además, la calidad de los lípidos también queda afectada por la deshidratación. Los peróxidos se forman de las reacciones de lípidos con proteínas y vitaminas, o por la descomposición en productos secundarios y provocando sabores desagradables, olores fuertes, ranciedad organoléptica (Barbosa-Canovas, Vega-Mercado, 2000). Se producen también pérdidas de componentes volátiles del "flavor", donde la pérdida no solo depende de la masa molecular y presión de vapor de estos componentes sino también de su solubilidad en agua. Algunas vitaminas (A y C) pueden destruirse parcialmente por oxidación durante el secado por aire caliente. (Cheftel, 1992)

La pérdida de agua y el aumento de temperatura del producto durante el secado producen cambios estructurales que ocasionan variación de las dimensiones y en algunos casos la pérdida de la forma original del producto. (Kiranoudis y col., 1997; Casp y Abril, 1999)

El encogimiento de los alimentos es un fenómeno físico común observado en procesos de deshidratación, produciendo consecuencias en la calidad del producto final obtenido (cambios en la forma del material vegetal, pérdida de volumen inicial y aumento de la dureza del mismo), lo que genera en la mayoría de los casos, una impresión negativa en el consumidor.

La disminución de volumen durante el secado de alimentos frutihortícolas ha sido observada por numerosos autores, (Lozano y col., 1983; Balaban y Pigott, 1988; Wang y Brennan 1995a). Por ej.: Suzuki y col. (1976) estudiaron los cambios físicos producidos en zanahorias, papas y batatas durante el secado; McMin y Magee (1997a,b) lo hicieron en papas secadas a distintas temperaturas; Maskan (2001a), en kiwis.

La relación de la variación de volumen del material vegetal durante el proceso de secado con el contenido de humedad del mismo, ha sido objeto de estudio de numerosos investigadores. La contracción es raramente despreciable y es recomendable tenerla en cuenta en la predicción de perfiles de humedad durante la deshidratación. Para este

propósito diversos autores han propuesto modelos que predicen el cambio de volumen del material durante el secado. Mayor Sereno (2004) realizaron una recopilación de modelos matemáticos que han sido destinados para explicar el fenómeno de la contracción durante el secado y los clasifican en dos grupos, según el tipo de aproximaciones que se pueden hacer para modelar el encogimiento durante el mismo. El primero consiste en ecuaciones de tipo empíricas que describen la contracción como una función del contenido de humedad. La segunda aproximación está basada en la interpretación física del sistema y trata de predecir los cambios geométricos basados en las leyes de conservación de masa y volumen. En ambos casos agrupan modelos lineales y no lineales que describen el encogimiento en función del contenido en humedad, que han sido aplicados a diferentes productos frutihortícolas por diferentes investigadores, entre los cuales debemos destacar los siguientes: Vaccarezza y col.(1974); Suzuki y col. (1976); Gabitto y Aguerre (1985); Sgroppo y col. (1990); Fusco y col. (1991); Lang y col. (1994); Mulet (1994); Tulasidas (1995); Viollaz y Robedo (2002); Pabis (1999).

Este fenómeno es importante si se considera el proceso de secado como un fenómeno de tipo difusional debido a que se produce una variación en la distancia requerida para el movimiento de las moléculas de agua durante el secado (Zogzas y Maroulis, 1996) y es recomendable su consideración en la predicción de perfiles de humedad durante la deshidratación, ya que raramente resulta despreciable. (Hernández y col., 2000; Mayor y Sereno, 2004).

La reducción de volumen no está siempre relacionada directamente a la cantidad de agua evaporada, el fenómeno de contracción es específico, dependiendo de las características de la célula y estructura del tejido (McMinn y Magee, 1997a,b).

Los alimentos poseen una estructura subordinada a su naturaleza, pudiendo ser modificada por el procesamiento al cual son sometidos, donde los cambios en las características geométricas de las células puede estudiarse por análisis de imágenes (Bolin y Huxsoll, 1987), siendo la microscopía electrónica una de las técnicas mas utilizadas (Prestamo y col., 1998; Rahman y col., 2002; Bai y col., 2002). Ramos y col. (2004) estudiaron y cuantificaron los cambios microestructurales durante el primer periodo de secado de uvas, mediante técnicas estereo-microcópicas. Banjongsinsiri y col. (2004) utilizaron la criomicroscopía electrónica de barrido (cryo-SEM) para evaluar el efecto de la impregnación a vacío de ciertas sustancias para mantener la firmeza de berenjenas.

La deshidratación utilizando bajas temperaturas, como es el caso del proceso de liofilización, permite un aumento de la porosidad y una contracción reducida, pero es de elevado costo, debido a que se prolonga el tiempo requerido para la deshidratación. (Barbosa-Canovas y Vega-Mercado, 2000)

1.3.2 Pardeamiento de las muestras vegetales

El color es una de las características organolépticas que definen la calidad y aceptabilidad de los productos frutihortícolas deshidratados.

El desarrollo de color, debido a reacciones de pardeamiento enzimático y no enzimático, es uno de los mayores problemas asociados al procesamiento y almacenamiento de estos productos.

El primer fenómeno se debe principalmente a la acción de la enzima polifenoloxidasas (PPO) sobre los compuestos fenólicos para formar finalmente pigmentos de estructura indeterminada (pardos-marrones) sobre la superficie de frutas y vegetales durante su procesamiento (Severini y col., 2003). Este tipo de pardeamiento no ocurre en células intactas, ya que los compuestos fenólicos (sustratos) se encuentran separados de la enzima; cuando el tejido es dañado por el corte, ambos son liberados y al entrar en contacto, traen consigo la formación de pigmentos oscuros alterando las características organolépticas y bioquímicas del mismo. Los factores que determinan este tipo de pardeamiento son: la presencia de PPO, concentración de compuestos fenólicos, pH, temperatura y disponibilidad de oxígeno. El pH óptimo de actividad de la enzima se encuentra entre 4 y 7, y su resistencia a la temperatura varía según la especie y cultivar, temperaturas mayores a 50°C provocan una disminución notable de la actividad, a 80°C la enzima es inactivada totalmente. (Vámos-Vigyázó, 1981). A este respecto, Concellón y col. (2004) estudiaron los cambios en la actividad de la PPO durante el almacenamiento de berenjenas (*Solanum melongena* L. cv Money Maker No. 2) a bajas temperaturas, con especial énfasis aquellas que provocan el daño por frío. Encontraron que a 30°C se registraba la mayor actividad de la enzima PPO, comenzando a decrecer a partir de 35°C.

El segundo fenómeno puede ocurrir a través de diferentes mecanismos, principalmente por reacciones de tipo Maillard entre grupos carbonilos de aminoácidos libres o aminas y azúcares reductores, ácido ascórbico o dehidroascórbico. Depende de la

composición química del producto o del medio (Buera y col., 1987; Nuñez y Laencina, 1990); del pH (O'Beirne, 1986); de la disponibilidad de oxígeno y contenido de humedad (Eichner y Karel, 1972); de la temperatura (Fox y col., 1983; Karel, 1984); y tiempo de tratamiento.

Otra reacción no enzimática común en alimentos con bajo contenido en humedad son las reacciones de caramelización, que se producen por calentamiento directo de carbohidratos.

La temperatura, T , y la actividad acuosa, a_w , tienen una marcada influencia sobre la velocidad de pardeamiento, (Okos y col., 1992; Pezzutti y Crapiste, 1997). Durante la deshidratación, la velocidad máxima de pardeamiento ocurre típicamente en el rango de a_w 0.5-0.75 (Labuza y Saltmarch, 1981). Throller y Christian (1978) encontraron que la reacción de Maillard posee una velocidad máxima en el intervalo de a_w comprendido entre 0.65 a 0.75 para frutas; este hecho explica el fácil pardeamiento de alimentos secos y concentrados. También ha sido observado que la velocidad de pardeamiento aumenta el doble o el triple por cada 10°C de aumento de temperatura, en sistemas modelo (Barbosa-Canovas y Vega-Mercado, 2000)

Se sabe que en alimentos de baja humedad, la reacción de Maillard se inicia por la formación de intermediarios insípidos e incoloros (Eichner, 1981). En alimentos deshidratados que contienen la combinación azúcar-ácido, como la mayoría de las frutas, uno de los posibles mecanismos de pardeamiento es la degradación de azúcares que lleva a la producción de furfurales (Anet, 1964). Estos productos se condensan con compuestos nitrogenados y/o polimerizan para dar materiales resinosos marrones. Por ejemplo, cuando los azúcares se calientan en presencia de ácidos orgánicos, se forman compuestos furanos, generando 5-hidroximetilfurfural (5-HMF) como principal derivado (Wolfrom, 1948; Singh, 1948).

En la deshidratación de productos tales como cebolla, papa o zanahoria predomina el pardeamiento no enzimático (reacciones de Maillard) (Legault y col., 1954; Peleg y col., 1970).

Dependiendo del caso, el pardeamiento puede ser estéticamente deseable o indeseable, ya sea porque se desarrollan colores, aromas y sabores en los alimentos, afectando incluso en algunos casos la capacidad de rehidratación de los mismos. Muchas

veces evitando la reacción de pardeamiento, se evitará la pérdida de nutrientes esenciales como por ejemplo en el caso de los aminoácidos.

Los alimentos son sometidos, en general, a diversos procesos de preparación previa a la deshidratación, para hacer ésta más efectiva y lograr una mejor apariencia y preservación.

El pardeamiento puede ser impedido por inactivación mediante: calor (escaldado o blanqueado); inhibición enzimática; exclusión, remoción o transformación de los substratos (oxígeno y fenoles); disminución del pH por debajo del rango óptimo de actividad (Langdon, 1987; Pizzocaro y col., 1993; Jiang y col., 1999); adición de antioxidantes que inhiban la acción de la polifenoloxidasas (PPO) previniendo la formación de melaninas; y tratamientos enzimáticos con proteasas que hidrolizan la enzima polifenoloxidasas. (Labuza y col., 1992)

El escaldado de vegetales puede ser realizado exponiendo los mismos a agua caliente (método más común), soluciones calientes o a ebullición conteniendo ácidos y/o sales, con vapor de agua (Kidmose y Martens, 1999) o bien, irradiando con microondas los productos inmersos en agua o soluciones (Chen y col., 1971; Ramaswamy y Van de Voort, 1990; Severini y col., 2005) por varios segundos o minutos.

Dentro de los diversos métodos de tratamientos, se deben mencionar los indicados por Lewicki y col. (2002), quienes trataron cubitos de tomate por inmersión en soluciones CaCl_2 seguida de una deshidratación osmótica, obteniendo así más rápidamente los productos deshidratados, pero con bajas propiedades de rehidratación; Aknabi y col. (2006), quienes trataron tomates enteros y rodajas de tomate por inmersión en soluciones al 1% de metabisulfito de sodio durante 3 minutos, según lo recomendado por Baloch y col. (1997); Kingsly y col. (2007) quienes sumergieron trozos de duraznos en soluciones al 1% de metabisulfito de potasio durante 2 minutos a 50°C y blanqueando luego con soluciones de ácido ascórbico al 1%. Sarsavadia y col. (1999) trataron rodajas de ajo por inmersión en soluciones de NaCl al 5 % durante 10 minutos, previo al secado. Bon y col. (1997), aplicaron un escaldado a rodajas hemisféricas de papas. Así mismo se han utilizado tratamientos para rodajas de tomate secados en bandejas (Hawtlader y col., 1991), tallos de brócoli (Simal y col., 1998), damascos (Togrul y Pehlivan, 2003), entre otros. Ertekin y Yaldiz (2004), sumergieron rodajas de berenjena en agua hirviendo durante 5 minutos como tratamiento previo al secado de las mismas en bandejas. Ertekin y Yaldiz (2004)

sumergieron rodajas de berenjena en agua hirviendo, como tratamiento previo al secado; Kingsly y col, (2007) pretrataron rodajas de durazno por inmersión en soluciones de metabisulfito de sodio.

Entre de los agentes antipardeantes más utilizados se encuentra el ácido láctico, el cual presenta un buen poder acidificante lo que provoca una disminución de la actividad enzimática y no provee de sabor ácido, debido a su muy bajo impacto organoléptico (Severini y col., 2003).

El NaCl y CaCl₂ son usados generalmente para el “blanqueo” de vegetales, siendo el primero un inhibidor de la PPO, pero a elevadas concentraciones. En particular éste último, es bien conocido por su capacidad de retener la firmeza de las paredes celulares. (Bartolomé y Hoff, 1972; Lee y Howard, 1999). La firmeza y resistencia al reblandecimiento resultante de la adición de CaCl₂ ha sido atribuido a la estabilización de la membrana y formación de pectatos de calcio, que incrementan la rigidez de la pared celular (Poovaiah, 1986; Bourne, 1989; Jackman y Stanley, 1995). El CaCl₂ ha sido utilizado como pretratamiento previo al secado de tomates (Buescher y Hobson, 1982; Baloch y col., 1997; Lewicki y col. 2002), así como el NaCl (Tripathi y Nath, 1989; Olorunda y col., 1990).

Otros agentes antipardeantes, muy difundidos en cuanto a su utilización, son los sulfitos bajo sus diferentes presentaciones (bisulfitos, metabisulfito, dióxido de azufre, etc.), debido a que son multifuncionales, es decir que, previenen el pardeamiento enzimático y no enzimático, controlan el crecimiento de microorganismos y actúan como agentes blanqueantes, antioxidantes o reductores. Madero y Finne (1982) propusieron que el bisulfito ejerce un efecto inhibitorio competitivo sobre la polifenoloxidasas, al atrapar los grupos sulfhidrilos del sitio activo de ésta última. El metabisulfito de sodio o potasio se presenta como una alternativa al azufrado convencional con SO₂ de duraznos (Togrul y Phelivan, 2003; Daniele y Urfalino, 2005; Kingsly y col, 2007), su aplicación al secado de tomates ha sido investigado por Tripathi y Nath (1989), Olorunda y col. (1990), Baloch y col. (1997); y al secado de berenjenas por Mousa, Sagar y Khurdiya. (2004). El anhídrido sulfuroso es empleado frecuentemente durante la preparación de puré de patata deshidratado. Muchas veces es aplicado en vez del escaldado, ya que además de lo ya indicado favorece la permeabilización de las membranas para la deshidratación, preserva las vitaminas A y C, aunque destruye la B₁. Montes (1964), sugiere que en general podría

incorporarse a la muestra vegetal hasta 2000-3000 ppm de SO₂, ya que al final del proceso de secado habría disminuido a 1000 ppm.

El ácido cítrico ejerce un efecto inhibitor sobre la polifenoloxidasa (Langdon, 1987; Pizzocaro y col., 1993) mediante dos mecanismos: por quelación del cobre (necesario para el funcionamiento de la enzima) y por acidulación, disminuyendo el pH y por tanto la actividad de la misma. (Jiang y col., 1999)

El ácido ascórbico previene el pardeamiento enzimático por reducción de compuestos quinónicos a sus compuestos polifenólicos originales (Walter, 1977), no siendo recomendable su uso en el secado convectivo por aire caliente ya que el mismo se descompone dando productos coloreados.

El ácido oxálico ha demostrado una actividad antipardeante en trozos de manzana y banana, por disminución de la actividad de la polifenoloxidasa. Además, se ha encontrado que mejora la tolerancia de los pimientos morrones a los tratamientos por calor, incrementando la estabilidad de la membrana (Zhang y col., 2001). Presenta el inconveniente de que una elevada ingesta en la dieta podría reducir la absorción de ciertos minerales debido a la formación de sales insolubles. (Son y col., 2001).

El pardeamiento de alimentos provocado por el proceso de secado ha sido evaluado a través de las medidas de Hunter L, a, b, CIELAB o bien, a través del cálculo de diferentes parámetros como: Croma (C*), Hue (H*), Diferencia total de color (ΔE) o a través del Índice de pardeamiento (BI) (Buera y col., 1986; Mascan, 2001b) o bien a través de medidas espectrofotométricas de extractos obtenidos a partir de las muestras vegetales. (Özoglu y Bayındırlı, 2002). Dependiendo de las características del producto frutihortícola, será conveniente la utilización de uno u otro.

1.4. REHIDRATACIÓN DE PRODUCTOS DESHIDRATADOS

La mayoría de los productos deshidratados deben ser reconstituídos antes de su consumo, lo que hace necesario determinar las condiciones óptimas para la realización de dicho proceso; en consecuencia, es importante obtener productos rehidratados de textura aceptable en el menor tiempo posible.

Un problema común en los alimentos deshidratados es la pérdida de la capacidad de rehidratación de los mismos. Durante la deshidratación se producen fenómenos de

contracción y distorsión del tejido vegetal y sus capilares, lo que resulta en una reducción de la reabsorción de agua en comparación al contenido en agua del producto original y esto contribuye a modificar su textura. La disminución de la capacidad de la retención de agua que se manifiesta en la rehidratación puede deberse a la desnaturalización y agregado de proteínas debido al efecto del calor, el aumento de concentración en sales y la desorción del agua; puede ser el resultado de la destrucción de geles (pectinas y almidones) así como de la modificación de la presión osmótica causada por la destrucción de membranas celulares. (Cheftel, 1992)

Diversos investigadores han reconocido que el grado de rehidratación es dependiente de la composición original del producto, condiciones del proceso y preparación, así como de la extensión del desorden químico y estructural provocado por el proceso de secado (Okos y col., 1992; Mc Inn y Magee, 1997b; Ghannam and Mc Kenna, 1997; Lewicki, 1998 a y b).

Haas y colaboradores (1974) correlacionaron la duración y severidad del proceso de secado con la velocidad y grado de rehidratación del producto, encontrando que se alcanzaba una mayor rehidratación en aquellos productos secados a tiempos cortos.

1.5. ALMACENAMIENTO DE PRODUCTOS DESHIDRATADOS

La estabilidad de los alimentos deshidratados durante su almacenamiento está relacionada con el contenido y/o la actividad de agua, y por ende con el grado de movilidad de reactivos que llevarían a un deterioro del producto ya sea químico, microbiológico o ambos.

Los microorganismos necesitan agua para su crecimiento y metabolismo, por lo tanto cualquier método que elimine agua, evita la proliferación microbiana siempre y cuando la actividad del agua, a_w , del producto obtenido y el de su almacenamiento sea inferior al necesario para la supervivencia de los mismos.

Los microorganismos detectados en estos tipos de alimentos provienen del producto fresco e impurezas adquiridas durante el secado y empaquetamiento de los mismos. El número que al principio es alto, disminuye durante las distintas fases de elaboración, como selección, lavado, limpieza, pelado, blanqueado y desecado. Mediante la desecación por aire caliente, como por dehidro-congelación se destruyen gran parte de los mismos. Es

importante que el producto terminado cuyo contenido de humedad debe estar por debajo del 10% se almacene en lugares secos y fríos. La humedad relativa del aire en las zonas de almacenamiento deberá estar por debajo del 70%, puesto que de lo contrario puede facilitarse la propagación de los microorganismos existentes. En estas condiciones al desempaquetar las hortalizas desecadas se observa que no se ha formado agua de condensación. (Muller, 1992)

Los alimentos deshidratados no son estériles. La reducción de número de microorganismos como resultado de las operaciones de deshidratación es baja. Incluso en algunos casos la temperatura de secado podría favorecer el crecimiento de los mismos (Cheftel, 1992).

La vida útil de productos como cebolla, papa o zanahoria deshidratados está limitada por el pardeamiento no enzimático, el deterioro del flavour y del valor nutritivo (Legault y col., 1954; Peleg y col., 1970) que son reacciones limitadas por la difusión/movilidad de los componentes. En estos casos la reacción de Maillard es la reacción de deterioro que predomina (Hodge, 1953; Reynolds, 1963).

1.6. ESTADO DEL CONOCIMIENTO RESPECTO AL SECADO DE BERENJENA

Sgroppo y Avanza. (2002) estudiaron el secado de rodajas de berenjena, sin tratamiento previo, a temperaturas comprendidas entre 40 y 90°C, sin realizar el modelado del proceso. Además realizaron ensayos de rehidratación a 25°C y 98°C. Observaron fenómenos de contracción durante el proceso de secado, así como la disminución del tiempo total de secado al incrementarse la temperatura y encontraron que el grado de rehidratación de las rodajas era superior a 98°C.

Ertekin y Yaldiz (2004) estudiaron el secado de rodajas berenjena de espesor 0.635, 1.27 y 2.54 cm en bandeja a temperaturas de 30 a 70°C y velocidades de aire de secado de 0.5 a 2.0 m/s, previo tratamiento por inmersión en agua hirviendo durante 5 minutos. Haciendo uso del tratamiento tradicional de los datos, encontraron que el incremento de la temperatura y velocidad del aire de secado disminuía el tiempo total de secado, así como el pretratamiento empleado y el uso de rodajas de espesor menor. Por otra parte, el incremento de la temperatura de secado disminuía la luminosidad de las muestras; mientras que el incremento de la velocidad de aire de secado lo aumentaba. Observaron que al

aumentar la velocidad de aire de secado, aumentaba el grado de rehidratación alcanzado, obteniéndose el mayor valor a 50°C. Además encontraron que el modelo de Midilli y col., (2002) fue el que mejor describía las curvas de secado de berenjenas.

Mousa, Sagar y Khurdiya. (2004), estudiaron el secado de rodajas de berenjena (*Solanum melongena* L., variedad *Pusa Uttam*) pretratadas con diferentes tratamientos a 58°C y encontraron que el mas adecuado para inhibir el pardeamiento consistía en pelar la berenjena, blanquear y luego realizar una inmersión en una solución al 1.5 % p/v de metabisulfito de potasio.

Akpinar y Dincer (2005), estudiaron el proceso de secado de rodajas de berenjenas de 5 mm de espesor y 35 mm de diámetro a 55°C, 65°C y 75°C y velocidades de aire de secado de 1.0 y 1.5 m/s. Mediante cuatro modelos matemáticos determinaron los parámetros del proceso de secado (coeficiente de secado, factor lag y tiempo de vida media) y parámetros de transferencia de humedad (difusividad del agua, coeficiente de transferencia de humedad); encontrándose un elevado grado de concordancia entre los datos experimentales y los cálculos teóricos. Encontraron que los valores de difusividad del agua se incrementaban con el aumento de la temperatura y velocidad del aire de secado; y que el aumento de la temperatura de secado disminuía el tiempo de secado total.

Akpinar y Bicer (2005) modelaron el secado de rodajas de berenjena de 6 mm en lecho utilizando un secadero por convección, a temperaturas de 50, 65 y 75°C, con velocidades de aire de secado de 1 a 1.5 m/s. Con el objeto de estimar y seleccionar el modelo que mejor describía el secado de berenjenas bajo estas condiciones, ajustaron ocho expresiones matemáticas semiteóricas y empíricas a los datos obtenidos, determinándose los coeficientes de cada una mediante regresión no lineal. El modelo de Page fue el modelo que describía mejor las curvas de secado de berenjenas con un coeficiente de correlación de 0.9999.

Long Wu y colaboradores (2007) estudiaron el proceso de secado a vacío de rodajas de berenjena a diferentes presiones y temperaturas. Evaluaron el efecto de éstos últimos sobre la tasa de secado y el encogimiento de las muestras vegetales. Además, modelaron el proceso de secado encontrando que el modelo Wang y Singh (1978) ajustaba satisfactoriamente a los datos experimentales.

Otros trabajos más recientes dignos de mencionar son los de Long Wu y col. (2008 y 2009), en los cuales estudiaron diferentes aspectos de la conservación de trozos de berenjena frescos por secado parcial de los mismos y posterior congelación.

1.7. RESUMEN DE LA LABOR REALIZADA EN EL PRESENTE TRABAJO DE TESIS DOCTORAL

La labor realizada a través del presente Trabajo de Tesis, fue bastante amplia, dado que se estudiaron diversos temas relacionados con la conservación de alimentos mediante el proceso de secado. Un resumen de los mismos se indica a continuación:

Se realizó el estudio de la velocidad de secado de trozos de berenjena. En una primera etapa se utilizó un secadero de laboratorio de aire forzado, estudiando la influencia que tenían sobre el proceso: la temperatura; la velocidad del aire de secado; la forma y el tamaño de trozos individuales de berenjena. Para ello se utilizaron dos tipos de muestras vegetales, a saber, corte tipo rodaja y corte tipo lonja.

Dadas las características nutricionales de la berenjena se estudiaron también los cambios que experimentaban las mismas durante el proceso.

Además, dada la deformación y oscurecimiento superficial del trozo de berenjena durante el secado, se estudió la influencia de la temperatura sobre los mismos, y se realizaron ensayos tendientes a disminuir dichos efectos. Para ello se ensayaron diferentes antipardeantes recomendados en la bibliografía, escogiendo aquellos más económicos, y de fácil alcance y aplicación.

Un requisito importante para todo producto deshidratado es la rehidratabilidad del mismo, ya que para ser consumido debe absorber agua, de manera de retomar las características del producto original, en textura, sabor, olor y digestibilidad, o por lo menos de manera aproximada. Es así que se estudió la rehidratabilidad de los trozos de berenjena deshidratados, a 25°C y 100°C, ya que estas serían las temperaturas ordinarias de uso.

Se realizaron estudios respecto a las isotermas de equilibrio de rodajas de berenjena deshidratadas mediante el método estático, encontrándose que los datos experimentales ajustaban adecuadamente a la ecuación de GAB a todas las temperaturas ensayadas estimas de errores bajas.

Otro factor significativo es el almacenamiento y para ello se realizaron ensayos para determinar el tiempo de almacenamiento de los trozos desecados empaquetados al vacío, ya que no es objeto de éste estudio la conservación del mismo no se estudiaron otras posibilidades de almacenamiento.

En una segunda etapa se realizaron ensayos en un secadero de bandejas con rodajas de berenjena de espesor 0.661 ± 0.00988 cm, previamente tratadas por inmersión con metabisulfito de sodio al 0.5% p/v durante 3 minutos a 25°C, que en base a experiencias previas resultó ser un antipardeante adecuado para las rodajas de berenjena.

En una tercera etapa se realizó el tratamiento cinético de los datos experimentales de secado de rodajas individuales, encontrándose una expresión matemática que describe el proceso de secado con un error menor al 1%.

La producción de berenjenas secas resulta interesante a los efectos de proveer una alternativa adicional de aprovechamiento para los productores de la Región del Nordeste Argentino, dado que muchas veces el productor no vende su producción completa, ya sea porque no cumple las exigencias de tamaño, peso y apariencia para la venta como producto fresco o bien porque el precio ofertado en el mercado no resulta conveniente para el productor.

Capítulo 2

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. MATERIA PRIMA VEGETAL

Se utilizaron frutos (*Solanum melongena* L. var. *Sanata*) provistos por un productor del departamento de Bella Vista, provincia de Corrientes (Fig.2.1). Los mismos fueron cosechados en su grado de madurez comercial, es decir cuando alcanzaron su mayor desarrollo en la planta, con un peso aproximado que variaba entre 200 y 300 g. Luego los frutos se lavaron con hipoclorito de sodio 1%, se secaron rápidamente y se los conservó a $10 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa ambiente de 80%, hasta ser procesados antes de los 4 días de cosechados, de acuerdo a lo recomendado por Jha y col.(2002).

Para determinar contenido de humedad de las distintas muestras que se utilizaron, se empleó el método de desecación en estufa de aire a 105°C , hasta alcanzar valores de pesada constante. (AOAC, 1990).

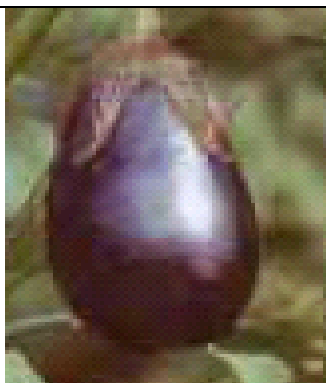


Figura 2.1: Fotografía de fruto de berenjena

2.2. ENSAYOS DE DESHIDRATACION POR CONVECCION FORZADA CON AIRE CALIENTE

2.2.1 Experimentos preliminares con muestras individuales

Durante la experimentación preliminar se utilizó el material vegetal descrito según ítem 2.1. Se tomaron 2 frutos al azar a los que se cortó en sentido transversal o longitudinal, (conservando la cáscara del fruto), obteniéndose de este modo muestras tipo rodajas y tipo lonjas, respectivamente, dependiendo del tipo de ensayo que habría de

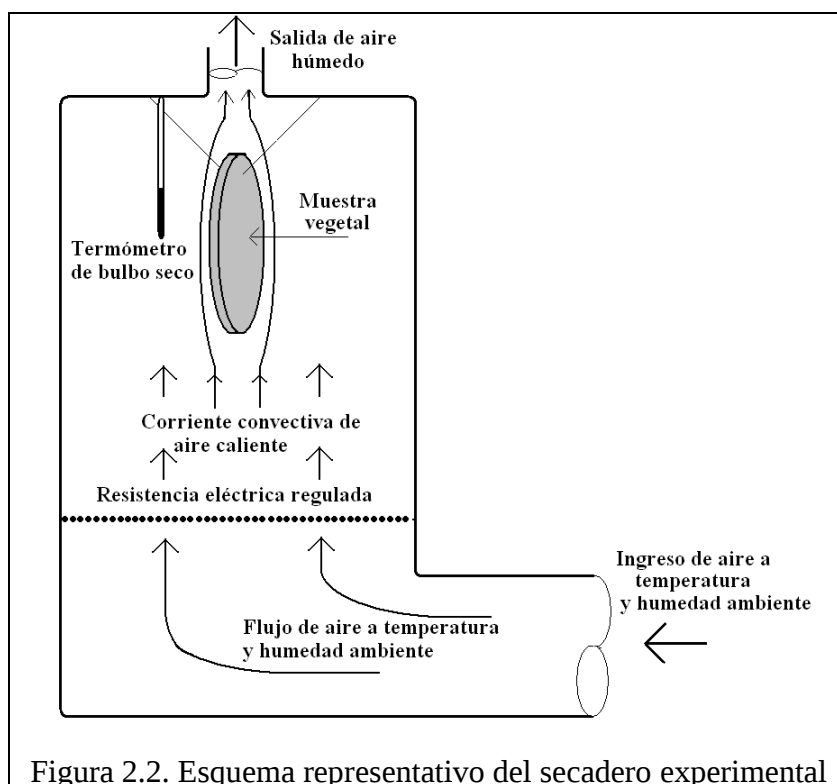
realizarse. En la Tabla 2.1, pueden verse valores medidos del diámetro y espesor de muestra tipo rodajas. La forma de las mismas puede verse más adelante en la Fig. 2.3.

Tabla 2.1: Dimensiones de rodajas estudiadas	
Diámetro inicial D° (cm)	Espesor inicial e° (cm)
4.561 (1 ± 0.047)	0.739 (1 ± 0.070)
5.543 (1 ± 0.069)	0.727 (1 ± 0.109) 1.259 (1 ± 0.068)
6.637 (1 ± 0.036)	0.682 (1 ± 0.064) 1.275 (1 ± 0.094)
7.019 (1 ± 0.026)	0.676 (1 ± 0.057) 1.388 (1 ± 0.021)

Los cortes longitudinales (lonjas), resultaron de forma elíptica con los siguiente valores medidos: a) eje menor inicial, En° , 5.891 (1 ± 0.121) cm; b) eje mayor inicial, Em° , 11.829 (1 ± 0.111) cm; y c) espesor inicial, e° , 0.664 (1 ± 0.086) cm. La forma de las mismas puede verse más adelante en la Fig. 2.4.

2.2.2 Equipo experimental y condiciones operativas

Como equipo experimental se utilizó un secadero de laboratorio, el cual se halla disponible en el “Laboratorio de Tecnología Química de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura de la UNNE (Corrientes, Argentina)”. El mismo consistía en una cabina prismática con orificios de entrada y salida, tales que permitían la circulación de un flujo continuo de aire que ingresaba por la parte inferior del equipo, mediante un turboventilador eléctrico, a las condiciones de temperatura y humedad ambientales. Luego atravesaba una resistencia eléctrica que era controlada mediante un regulador de voltaje tipo Variac, donde el aire se calentaba hasta alcanzar la temperatura de trabajo previamente programada. Luego era forzado a circular alrededor de la muestra vegetal y, finalmente, salía por la parte superior del equipo, tal como se muestra en la Fig. 2.2.



En todos los experimentos, los valores de temperatura y humedad relativa del aire de que ingresaba al equipo de secado, fueron determinados en base a la medida de la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo y la utilización de la carta psicrométrica. La velocidad del aire de secado fue medida con un aerímetro Testo 405-V1, cuya precisión es de 0.01 m/s.

Los niveles de las variables ensayadas fueron:

- Temperatura del aire de secado, T : 50°C, 60°C, 70°C, 80°C y 90°C.
- Velocidad del aire de secado, v_{∞} : 1 m/s a 2.8 m/s.
- Porcentaje de humedad relativa del aire que ingresa al secadero, $\mathcal{H}_R$: 55 ± 7.60 %

Las distintas muestras vegetales se colocaron en el interior del secadero. La velocidad de secado se siguió por medición de la pérdida de peso que experimentaba la muestra vegetal, en función del tiempo de procesamiento. Para ello, la muestra se retiró a tiempos predeterminados y se pesó rápidamente en una balanza, hasta alcanzar valores de peso constante. Una vez alcanzado este tiempo, se la retiró del secadero y se determinó el contenido de sólido seco, según lo indicado previamente en ítem 2.1.

Los ensayos se repitieron al menos seis veces para cada condición operativa de secado y tamaño de las muestras, expresándose los valores promedios obtenidos como humedad en base seca, M , variable intensiva que es tradicionalmente utilizada en la literatura y expresada en contenido de masa de agua por unidad de masa de sólido seco de la muestra vegetal.

2.3. CAMBIOS ESTRUCTURALES QUE EXPERIMENTA LA MUESTRA

2.3.1 Cambios macroestructurales

Simultáneamente con el estudio de la velocidad secado, se estudiaron los cambios de las dimensiones características de la muestra vegetal: espesor y diámetro; o bien espesor, eje mayor y eje menor, según el tipo de muestra que corresponda. Las mediciones de las mismas se realizaron en cuatro puntos opuestos de la muestra, utilizando un Vernier Caliper (0-150mm) con una precisión de 0.05 mm. Las muestras utilizadas corresponden a las descritas en el ítem 2.2.1. El espesor se midió hasta que se mantuvo constante y el diámetro o los ejes hasta el momento previo en el que se inicia el alabeo de las muestras vegetales; continuándose con las mediciones secuenciales de la variación de masa de la muestra.

En las Figs. 2.3 y 2.4, pueden verse esquemas relativos a las mediciones realizadas en las muestras vegetales tipo rodaja y tipo lonja, respectivamente.

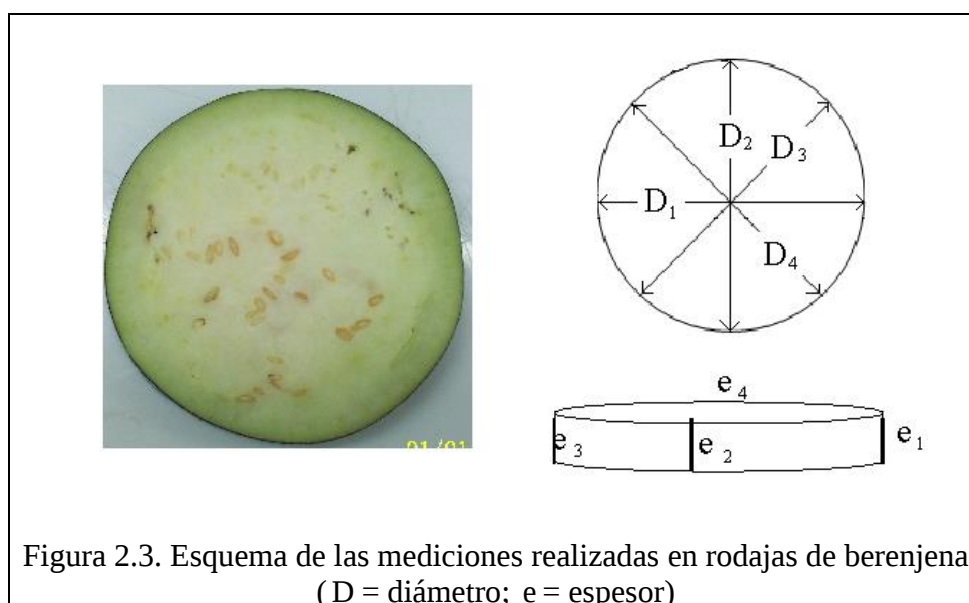


Figura 2.3. Esquema de las mediciones realizadas en rodajas de berenjena (D = diámetro; e = espesor)

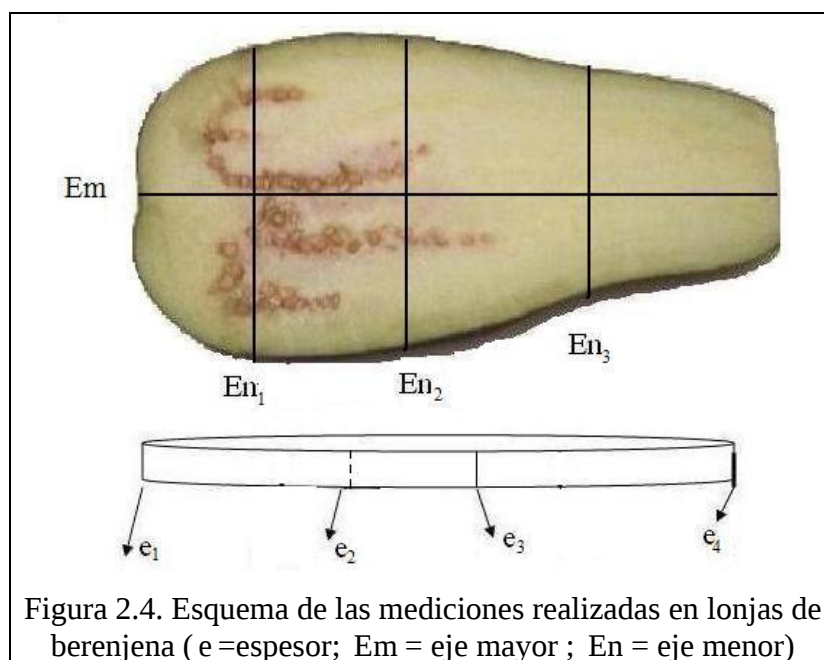


Figura 2.4. Esquema de las mediciones realizadas en lonjas de berenjena (e = espesor; Em = eje mayor ; En = eje menor)

2.3.2 Cambios estructurales microscópicos

Los cambios estructurales microscópicos fueron estudiados mediante la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido. Para ello se utilizó un microscopio electrónico de barrido (MEB) marca JEOL 5800 LV, perteneciente al Servicio de Microscopía de la UNNE. (Corrientes, Argentina).

Durante el estudio se procesaron las siguientes muestras:

- a) Rodajas de fruto fresco.
- b) Rodajas de berenjena secadas a tiempo final, según lo descrito en el ítem 2.2, con muestras de diámetro inicial: $D^0 = 6.637 (1 \pm 0.036)$ cm; y espesor inicial: $e^0 = 0.684 (1 \pm 0.064)$ cm.
- c) Lonjas de berenjena secadas a tiempo final, según lo descrito en el ítem 2.2 sin pretratamiento.
- d) Rodajas de berenjena secadas por liofilización.

Una vez obtenidas las muestras, se realizaron cortes con un bisturí de la zona del borde y del centro (ver Fig. 2.5), antes de acondicionarlos para su examen microscópico.

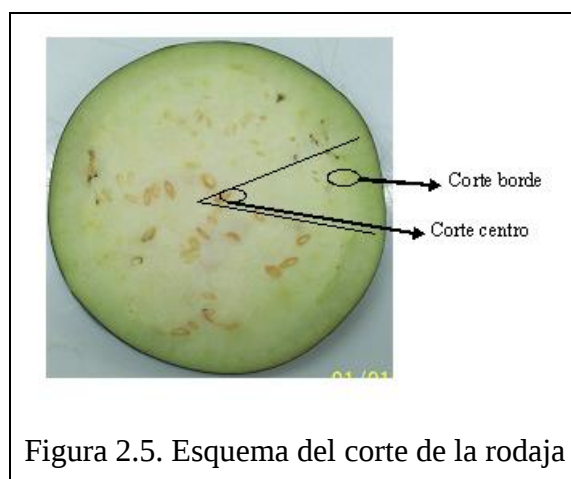


Figura 2.5. Esquema del corte de la rodaja

2.4. CAMBIOS QUIMICOS

Para estudiar los cambios químicos que experimentaban las muestras durante el secado, se utilizaron rodajas de berenjena de diámetro inicial: $D^0 = 6.637 (1 \pm 0.036)$ cm; y espesor inicial: $e^0 = 0.682 (1 \pm 0.064)$ cm, por corresponder el primero al diámetro convencional de los frutos analizados y el segundo por el tiempo de secado que demanda. Se secaron según lo descrito en el ítem 2.2. Luego se tomaron 4 rodajas a tiempos prefijados según el ensayo a realizar y se trozaron con la ayuda de un bisturí en trozos cuadrados de 0.3 a 0.4 cm de lado, el cual fue cuarteado utilizándose los extremos opuestos como muestras. Las mismas fueron procesadas en una procesadora doméstica para el caso del producto fresco y en un molinillo de laboratorio para el producto ya seco. Se realizaron tres repeticiones para cada determinación realizada por triplicado.

Se realizaron los siguientes análisis sobre muestras vegetales:

- 1) Contenido nutricional del producto fresco y seco.
- 2) Contenido de humedad (AOAC, 1990).
- 3) Nitrógeno total. Para ello se utilizó el micrométodo de Kjeldhal. Método 960.52 (AOAC, 1990)
- 4) Cenizas, mediante el método 7.009 de la AOAC (1990).
- 5) Grasa bruta. Esta determinación se lleva a cabo en una muestra previamente deshidratada en estufa a 100°C para eliminar el contenido en agua (Hart y Fisher, 1971).
- 6) Fibra bruta: Hart y Fisher (1971).

7) Carbohidratos totales: por diferencia.

Durante el proceso de secado, se realizaron los siguientes análisis:

a) **Azúcares reductores totales.** Se utilizó el método de la antrona (Southgate, 1976). Durante la aplicación de este método, la extracción fue realizada utilizando muestras preparadas según lo indicado previamente, se pesaron y molieron en una procesadora doméstica durante 2 minutos a máxima velocidad con alcohol etílico 96°, en una relación producto: alcohol (1:2) p/v. Se dejó reposar durante 1 hora, agitando periódicamente y luego se filtró en vacío. El extracto obtenido fue llevado a volumen en matraz aforado con alcohol etílico 96°. (Rodríguez, 2000). Luego, a 2 ml del extracto etanólico, se le adicionaron 4 ml del reactivo de antrona (0.2% de antrona en H₂SO₄ cc 95-98%). Se homogeneizó y se llevó a baño maría durante 10 minutos, luego se enfrió rápidamente y se leyó la absorbancia a 620 nm. La curva de calibrado fue preparada utilizando soluciones de glucosa patrón de concentraciones entre 5.26 y 54.46 mg/1000 ml. El contenido de azúcares reductores totales fue expresado como masa de glucosa/masa de materia seca.

b) **pH.** Para la medición de pH, se empleó la técnica descrita en Hart y Fisher (1971)

c) **Acidez titulable,** se empleó la técnica descrita en Hart y Fisher (1971)

d) **Pardeamiento:**

i. **Preparación de las muestras.** Para estudiar el pardeamiento, se prepararon muestras vegetales mediante una técnica sugerida por el Dr. Avanza de manera de sortear el inconveniente de no disponer de un colorímetro en las cercanías. Para ello, se utilizó la deshidratación por liofilización como un paso preparativo y de acondicionamiento de las muestras vegetales para su posterior transporte y análisis. Se utilizaron rodajas de berenjena de diámetro inicial: $D^o = 6.637 (1 \pm 0.036)$ cm; y espesor inicial: $e^o = 0.682 (1 \pm 0.064)$ cm. Se secaron según lo indicado en el ítem 2.2. A un tiempo predeterminado se las retiró, se las pesó, se enfriaron rápidamente y se guardaron (envueltas en film de manera de evitar el contacto directo con el medio) en freezer a -24°C durante 12 hs, luego de lo cual fueron liofilizadas en un liofilizador ALPHA 2-4 LD-2 hasta un tiempo máximo de 9-10 horas, dependiendo del contenido de agua de la muestra. Una

vez finalizado el proceso de liofilización, se determinó el peso de la muestra y se la envolvió con film. Las muestras así obtenidas fueron luego almacenadas al resguardo de la luz, calor y humedad, en frascos herméticamente cerrados durante una semana, hasta el momento de su análisis, en el caso de la medición superficial de color. Dado que no se disponía de un colorímetro en el lugar de trabajo, se llevaron las muestras a ciudad de La Plata (Buenos Aires, Argentina), para realizar las mediciones de color superficial.

ii. **Medición superficial de color.** Se realizaron en laboratorios del CIDCA, La Plata, empleando un colorímetro triestímulo Chroma Meter CR-300C, (MINOLTA, Osaka, Japan). Mediante este equipo se obtuvieron las coordenadas de Hunter: L, luminosidad; a y b, cromaticidades rojo-verde y azul-amarillo respectivamente. Se realizaron mediciones por triplicado en ambas caras de la muestra sobre un total de 4 rodajas para cada tiempo y temperatura, tomándose luego un promedio de los valores de las determinaciones efectuadas. A partir de estos parámetros se calcularon los atributos de color (Hue, H*) e intensidad del color (Chroma, C*), y se evaluó la diferencia total de color (ΔE) utilizando la ecuación de Hunter Scotfield y el índice de pardeamiento (BI) (Buera y col., 1986) utilizado por Maskan (2001b) de la siguiente manera:

$$H^* = \arctg(b/a) \quad \text{para } a > 0 \quad (2.1)$$

$$H^* = 180 + \arctg(b/a) \quad \text{para } a < 0 \text{ y } b \geq 0 \quad (2.2)$$

$$C^* = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (2.3)$$

$$\Delta E = \sqrt{(L - L^{\circ})^2 + (a - a^{\circ})^2 + (b - b^{\circ})^2} \quad (2.4)$$

$$BI = \frac{100(X - 0.31)}{0.17} \quad (2.5)$$

$$\text{con: } X = \frac{a + 1.75L}{5.645L + a - 3.012b} \quad (2.6)$$

el supraíndice $^{\circ}$ indica que son los valores obtenidos a partir de la rodaja fresca liofilizada.

iii. **Absorbancia.** (Özoglu & Bayındırlı, 2002). Para medir la absorbancia a 420nm y 550nm, se prepararon extractos metanolicos en baño de hielo a partir de dos rodajas previamente liofilizadas, para cada tiempo y temperatura de trabajo en una relación masa/volumen de 1:50 con una procesadora doméstica (Minipimer, 800W, Braun). Se filtró al vacío, se centrifugó a 4500 r.p.m. durante 15 minutos, se leyó la absorbancia a 420 nm y 550nm en un espectrofotómetro Metrolab 1700, contra blanco de metanol. Esta operación se realizó por triplicado. Se usaron rodajas liofilizadas debido a que se observó que al utilizar muestras vegetales recién retiradas del secadero, al molerlas generaban una sobreestima de los valores de absorbancia, debido al remanente de agua que aún contenían.

e) **Antipardeamiento.** Previo al secado se trataron las muestra mediante los siguientes métodos:

i.Escaldado: se ensayó el escaldado por inmersión de la muestra en agua destilada a 100°C durante distintos tiempos: 30 segundos, 1, 2, y 3 minutos.

ii.Inmersión en 100 ml de una solución acuosa de antipardeante al 0.5% p/v a 25°C durante 3 minutos. Como sustancias antipardeantes (calidad p.a.) se utilizaron: cloruro de sodio, cloruro de calcio; ácido láctico; ácido cítrico; y metabisulfito de sodio. La muestra de control fue sumergida en agua destilada. Transcurridos los 3 minutos, las muestras fueron escurridas con papel tissue y pesadas antes de ser introducidas en el secadero. En experimentos previos se comprobó que la concentración de 0.5% p/v era adecuada para disminuir o evitar el pardeamiento.

iii.El cambio de color se determinó según el procedimiento descrito previamente en el ítem “d”.ii.

iv.Se realizaron ensayos de deshidratación de rodajas de berenjena tratadas por inmersión en una solución de metabisulfito de sodio 0.5% p/v durante 3 minutos a 25°C previo al secado de las mismas a 60°C, 70°C, 80°C y 90°C.

2.5. ENSAYOS DE REHIDRATACION

Sobre las muestras deshidratadas, siguiendo los distintos procedimientos indicados previamente, se realizaron estudios de rehidratación a: temperatura ambiente y a 100 °C.

Se utilizaron rodajas de berenjena con las siguientes dimensiones: espesor inicial 0.684 (1 ± 0.064) cm y 1.275 (1 ± 0.094); diámetro inicial de 6.637 (1 ± 0.040) cm. Se ensayaron rodajas sin tratamiento previo al secado y rodajas tratadas por inmersión en una solución al 0.5% p/v de metabisulfito de sodio durante 3 minutos (únicamente para rodajas de espesor menor) secadas a tiempo final según el ítem 2.2. Las rodajas una vez deshidratadas fueron envueltas con film y almacenadas a temperatura ambiente (25°C) en un frasco hermético durante 24hs hasta el momento del ensayo. Se realizó una serie de tres repeticiones, con muestras por duplicado.

2.5.1 Método empleado

Se colocaron las rodajas deshidratadas en vasos de precipitados de 1000 ml de capacidad con agua destilada a las temperaturas a ensayar: 25°C, utilizando un criostato tipo Haake F3; y a 100°C. Estas temperaturas fueron elegidas debido a que la primera representaría la rehidratación mas difundida de los productos deshidratados y la segunda por ser la temperatura habitual de cocción de los preparados alimenticios donde podría eventualmente ser utilizado. A tiempos prefijados las muestras se retiraron y escurrieron, eliminándose el exceso de agua con papel tissue, y luego se pesaron en una balanza (1000 ± 0.01 g) hasta valores de pesada constante.

2.5.2 Medidas de textura

Se procedió medir la textura de rodajas rehidratadas, efectuándose al menos 6 mediciones en diferentes zonas de las rodajas, utilizando un texturómetro “Stable Micro Systems Texture Analyzer”, modelo TAXT2 facilitado por la empresa citrícola “FRUTICOR”, situada en la ciudad de Bella Vista (provincia de Corrientes), por medio de la gestión de la Dra. S. Sgroppo . La sonda utilizada, fue P/2N needle probe de 2 mm de diámetro. Condiciones de trabajo: Medida de fuerza en compresión, sonda: P/2N NEEDLE PROBE, Distancia: 1.5 mm, Velocidad pre-ensayo= Velocidad post-ensayo: 10 mm/seg,

Velocidad de ensayo: 1 mm/seg , Test distancia de ruptura: 1 mm, Fuerza:5g, Tiempo:1seg,Triggerfuerza1g, Contador 5.

2.6 ALMACENAMIENTO

2.6.1 Preparación y almacenado de las muestras deshidratadas

Se realizaron estudios de almacenamiento de rodajas de berenjena deshidratadas de $e^{\circ}=0.684 (1 \pm 0.064)$ cm y $D^{\circ}=6.637 (1 \pm 0.040)$ cm; secadas a tiempo final a 90°C según lo descrito en el ítem 2.2; tratadas por inmersión en una solución de metabisulfito de sodio 0.5 % p/v durante 3 minutos. Las muestras deshidratadas fueron almacenadas a la Humedad de equilibrio a 25°C , y protegidas de la luz, hasta el momento del envasado.

Para el envasado de las muestras se utilizó una envasadora de vacío Rapi-vac 5-750 con termoselladora a presión de 68-70 cm Hg (27.5 pulgadas de Hg), utilizando bolsas de polietileno-poliéster, de dimensión 15x25 cm y 90 micrones de espesor, facilitada por la Facultad de Agroindustrias de la UNNE sito en la Ciudad de Saenz Peña, Chaco. (Figs. 2.6 y 2.7)

Se realizó el almacenamiento en una caja de madera, protegido de la luz y a temperatura ambiente de $22.15 \pm 2.96^{\circ}\text{C}$ con un porcentaje de humedad de 52.39 ± 10.18 % y en un freezer (Bosch) a $-22 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$. El tiempo total de almacenamiento ensayado fue de 6 meses.



Figura 2.6. Envasadora de vacío Rapi-vac 5-750 con termoselladora



Figura 2.7. Muestras envasadas y listas para almacenar

2.6.2 Análisis microbiológico

Se realizaron muestreos indicados en la Tabla 2.3. La preparación y dilución de los homogeneizados de la muestra se realizó de acuerdo con lo descrito en el Método 2 de ICMSF (1982). El recuento de microorganismos aerobios mesófilas se realizó por métodos de recuento en placa (Método 1 propuesto por el ICMSF, 1982) y el de Coliformes totales por el método del número más probable. El recuento de mohos y levaduras fue realizado mediante el método por siembra en placa en todo el medio recomendado por ICMSF (1982), en el laboratorio de Bromatología de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura de la UNNE. (Dra. Olga Vasek- Bioq. Marina Cardozo)

Tabla 2.2: Fechas de muestreo			
Tiempo de almacenamiento		N°muestra	
días	semanas	T (ambiente) (°C)	-22°C
0	0	8	15
8	1	25	
13	2	13	
56	8	3	
125	18	28	20
202	29	17	

2.6.3 Isotermas de adsorción

Estudios referentes a las isotermas de adsorción, se realizaron mediante el método del equilibrio isopiéstico (a presión constante), para lo cual se siguieron las recomendaciones dadas por Labuza (1984)

Para estimar la actividad del agua, a_w , de soluciones saturadas de distintas sales, se empleó lo recopilado por Greenspan (1977). Valores de a_w para cada sal y cada temperatura, se presentan en la Tabla 2.3.

Se utilizaron como muestras vegetales, rodajas de berenjena con las dimensiones iniciales siguientes: $D^0 = 6.637 (1 \pm 0.040)$ cm y $e^0 = 0.684 (1 \pm 0.064)$ cm, secadas hasta pesada constante a distintas temperaturas según lo indicado en el ítem 2.2. Luego fueron colocadas en los desecadores preparados para tal fin. Cada ensayo se realizó por triplicado.

Se utilizaron los siguientes niveles de temperatura T: 5°C; 10°C; 20°C; 30°C.

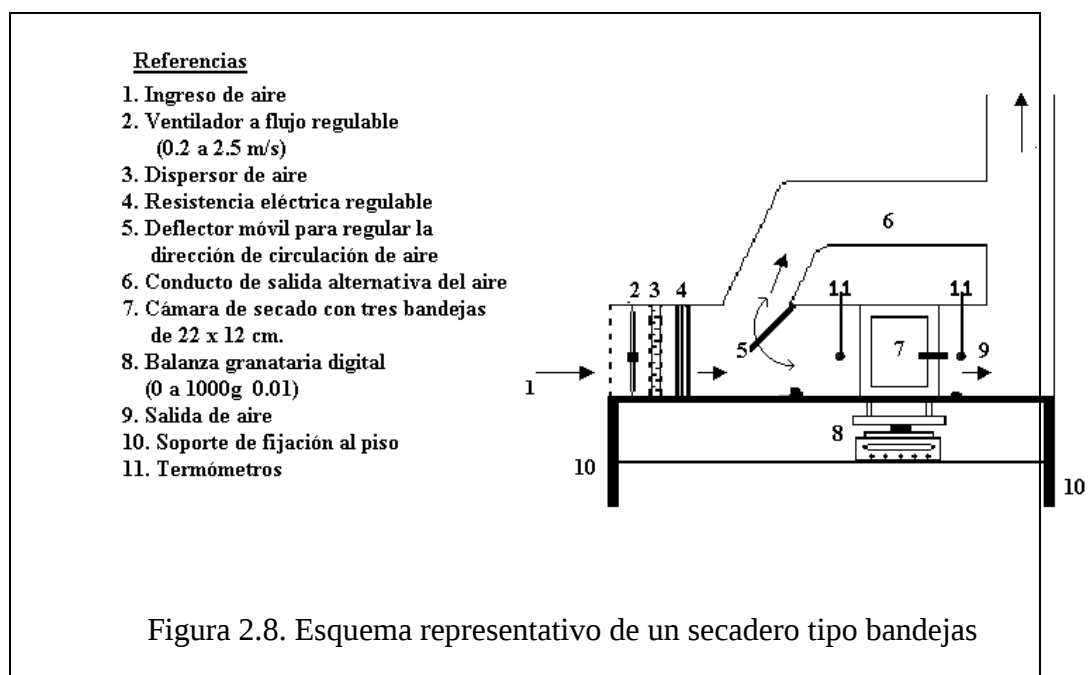
El tiempo de equilibrio fue 21 días, tras lo cual las muestras fueron pesadas individualmente en una balanza analítica (100 ± 0.001 g); luego de lo cual se realizó la determinación del contenido de humedad por el método de desecación en estufa a 105°C (AOAC, 1990)

Tabla 2.3: Valores de a_w de las soluciones saturadas utilizadas

Sal	T(°C)			
	5	10	20	30
LiCl	0.1126±0.0054	0.1129±0.0041	0.1131±0.0031	0.1128±0.0024
MgCl ₂	0.3360±0.0028	0.3347±0.0024	0.3307±0.0018	0.3244±0.0013
Mg(NO ₃) ₂	0.5886±0.0043	0.5736±0.0033	0.5438±0.0023	0.5140±0.0024
NaNO ₂	0.7342±0.0030	0.7160±0.0035	0.6756±0.0036	0.6433±0.0029
KNO ₃	0.9627±0.0210	0.9596±0.0140	0.9462±0.0066	0.9231±0.0066
KBr	0.8509±0.0026	0.8375±0.0024	0.8167±0.0021	0.8027±0.0021
KCl	0.8767±0.0045	0.8677±0.0039	0.8511±0.0029	0.8362±0.0025

2.7 DESHIDRATACION EN BANDEJAS

También se realizaron estudios de deshidratación de muestras vegetales en un secadero tipo bandeja, cuyo esquema se muestra en la Fig. 2.8, perteneciente al Centro De Investigaciones y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA), La Plata, pcia. Bs. As.



El equipo experimental a escala laboratorio utilizado estaba conectado a una balanza digital tipo granataria (0-1000 $\pm$ 0.01g.), mediante la cual se seguía la pérdida de peso de las rodajas durante el secado (Fig. 2.8)

La humedad relativa del aire que alimenta al secadero fue estimada mediante lecturas de la temperatura de bulbo seco y de bulbo húmedo. Los valores de las mismas, se utilizaron en una carta psicrométrica para obtener datos referentes a la humedad absoluta y la humedad relativa del aire a la temperatura de secado. Se realizaron determinaciones por triplicado para cada condición ensayada a distintas temperaturas y velocidades de aire (v_{∞}). (Ver Tabla 2.4). La humedad relativa ambiente estimada del aire que ingresa al secadero, fue del orden: 54.36 ± 5.19 %.

El procedimiento empleado consistió en tomar tres frutos al azar, cortarlos en rodajas de espesor 0.661 (1 ± 0.015) cm, sumergirlos durante 3 minutos en una solución de

metabisulfito de sodio 0.5 % p/v a 25°C. Luego se las secó rápidamente con papel tissue y fueron colocadas en bandejas metálicas (22 cm x 12 cm) formando una sola capa de espesor uniforme. En todos los experimentos se colocaron nueve rodajas por bandeja. La dirección del aire de secado es tangencial a la superficie por la cual se produce la pérdida de agua, produciéndose la misma por una sola cara por lo que el camino que deberá recorrer el agua o vapor hacia la superficie es igual al espesor del trozo (distinto del secado individual).

Tabla 2.4: Condiciones de trabajo experimental en el secadero tipo bandejas		
T (°C)	v_{∞} (m/s)	$\mathcal{H}_R$ (%)
50	2.0 ± 0.01	9.66 ± 1.30
60	2.0 ± 0.01	6.99 ± 1.14
70	1.5 ± 0.01	3.70 ± 0.36
	2.0 ± 0.01	4.22 ± 0.42
	2.5 ± 0.01	3.78 ± 0.81
80	2.0 ± 0.01	2.65 ± 0.50

Se siguió la pérdida de peso de las rodajas a tiempos prefijados, hasta valores de pesada constante, es decir cuando se ha llegado al equilibrio con la humedad del aire de secado. La medición superficial de color se realizó mediante medida colorimétrica realizadas de manera prácticamente instantánea, ya que el equipo de secado y el colorímetro estaban disponibles en el mismo edificio. (ítem d.i.i)

Capítulo 3

RESULTADOS Y DISCUSION

PARTE 1: Deshidratación

3.1. INTRODUCCIÓN

La operación de deshidratación que se utiliza con mayor frecuencia en la industria de alimentos, es la de secado con aire. Al respecto, de acuerdo con la bibliografía consultada, hemos podido observar que el proceso de secado se expresa frecuentemente como la variación del contenido de humedad que experimenta un vegetal en función del tiempo de secado, t . El contenido en humedad del vegetal se define como la relación entre la masa actual de agua que contiene con respecto de la masa de sólido seco, y se expresa como:

$$M = \frac{m_W^L}{m_s^S} \quad (3.1)$$

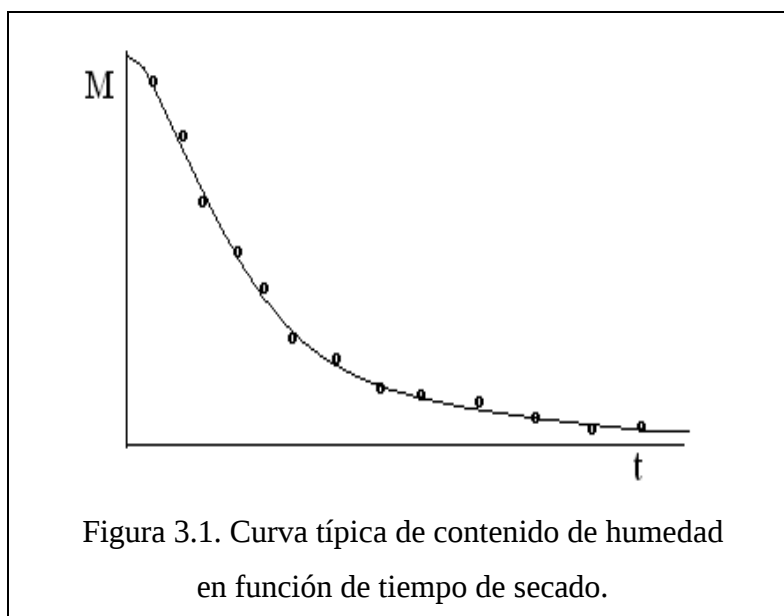
donde: M , es el contenido de humedad en base seca del vegetal (masa de agua/masa de sólido seco); m_W^L , es la masa de agua que contiene la muestra vegetal; m_s^S , es la masa de sólido seco de la muestra vegetal.

El diseño de la mayoría de equipos que se utilizan en el proceso de secado, tradicionalmente se basa sobre información experimental que se obtiene en laboratorio, seguida de un apropiado tratamiento de los datos experimentales.

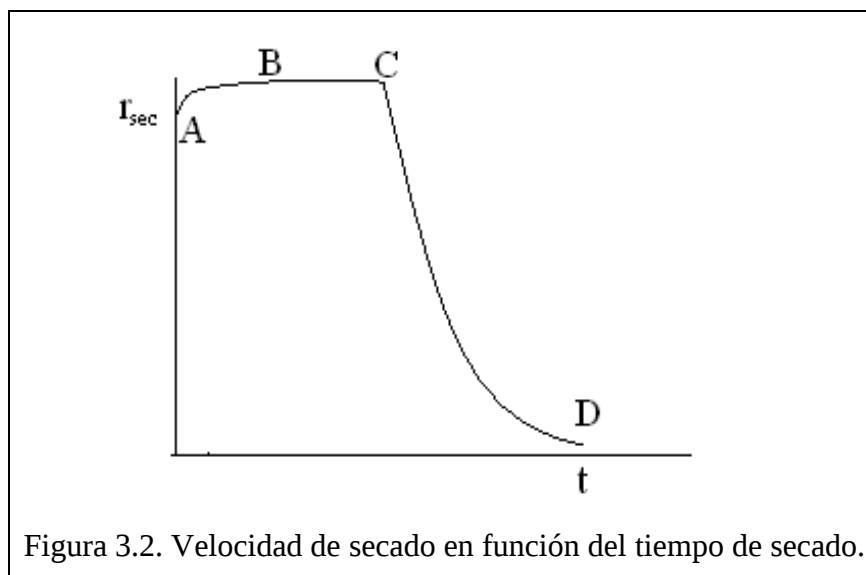
Esta metodología se viene empleando desde el inicio del desarrollo industrial (alrededor de 1750) hasta nuestros días. Con el correr del tiempo, pudo observarse que el concepto elemental de diseño basado sobre la experimentación, no ha cambiado desde entonces. Pero sí se produjeron grandes cambios evolutivos en lo que se refiere al tratamiento de datos experimentales. Así por ejemplo, puede observarse que hasta mediados del siglo XX se utilizaba el método gráfico para el diseño de equipos de secado discontinuo. Este método requería la ejecución secuencial de dos etapas. La primera, consistía en la construcción de un gráfico, a partir de datos experimentales, de M en función del tiempo de secado, t , tal como se muestra en la Fig. 3.1

Luego, se proseguía con la construcción de un segundo gráfico de tipo velocidad de secado, r_{sec} , en función del tiempo, t , tomando en cuenta para ello la definición de la velocidad de secado:

$$r_{\text{sec}} = -\frac{m_s^S}{\Omega} \frac{dM}{dt} \quad (3.2)$$



donde: r_{sec} , es la velocidad de secado de la muestra, (masa de agua/unidad de superficie $\times$ unidad de tiempo); Ω es el área de la superficie expuesta de la muestra.



Luego, con el correr del tiempo, las investigaciones se centralizaron en el estudio de los mecanismos involucrados en la velocidad de secado, r_{sec} , en función del tiempo.

En la Fig. 3.2, puede observarse la presencia de tres periodos cinéticos. Un periodo inicial (A – B), donde la velocidad de secado experimenta una ligera aceleración; un periodo intermedio (B – C), en el que se observa que la velocidad se mantiene constante; y

un periodo final (C – D), en el que se observa que la velocidad de secado experimenta una desaceleración. (Ver por ej. Brown, 1955; Badger & Banchero, 1965; Ocón-García & Tojo Barreiro, 1968; Mc Cabe-Smith, 1968; Chen y Johnson, 1969; Hawlader y col. 1991; Okos y col., 1992; Mujumdar y Menon, 1995; Geankoplis, 1998).

3.2. DATOS EXPERIMENTALES CORRESPONDIENTES AL SECADO DE MUESTRAS VEGETALES

A continuación se analizarán los resultados experimentales correspondientes a la velocidad de secado de rodajas y lonjas de berenjena procesados según lo detallado en el ítem 2.2 del Capítulo 2. Se estudió la influencia que ejercen los factores intrínsecos de la muestra vegetal (tipo de corte, dimensiones iniciales), y externos a la misma (velocidad de aire de secado, temperatura de secado), sobre la velocidad y tiempo total de secado. De esta manera se pretende obtener información respecto de la facilidad de preparación de la muestra, velocidad de secado de la misma y tiempo total empleado para su correspondiente deshidratación.

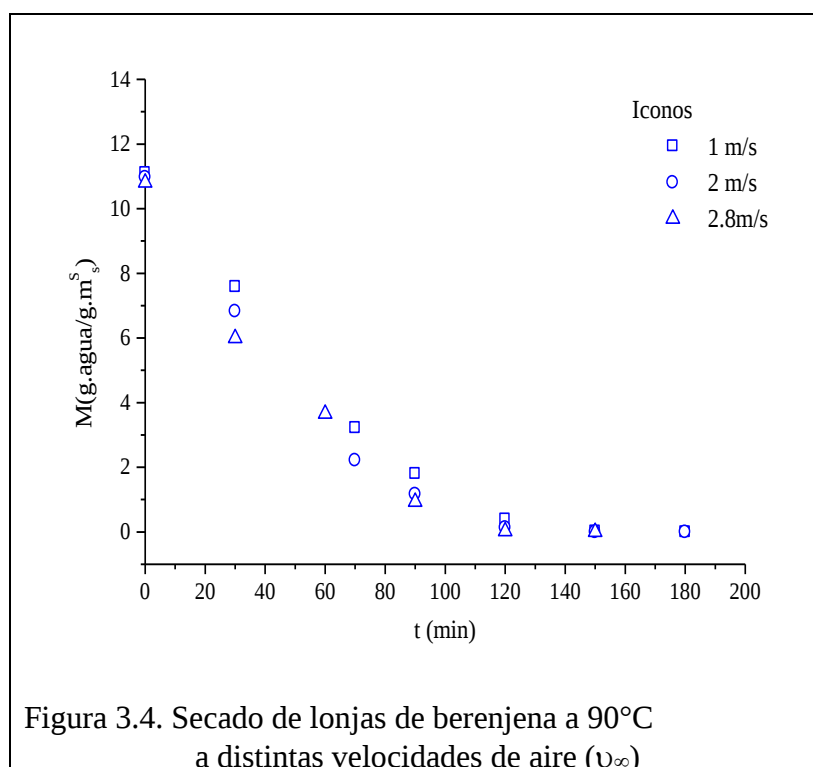
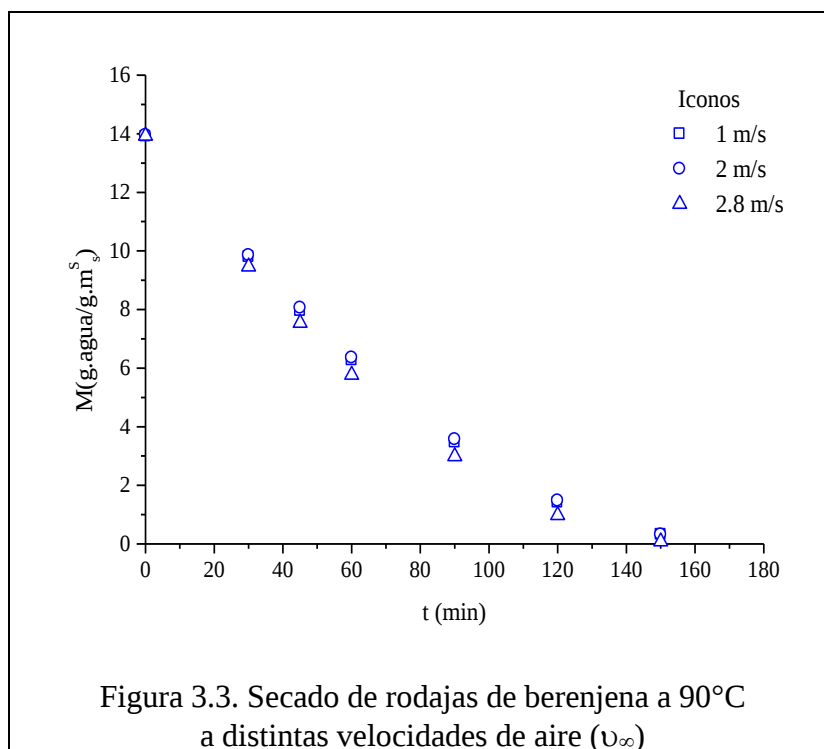
A los efectos de facilitar la comprensión y discusión de los resultados obtenidos, se agruparan los mismos en base a un valor medio de las dimensiones iniciales de las muestras vegetales (e° , D° , Em° , En°) calculados a partir los datos experimentales obtenidos a tiempo inicial.

3.2.1 Influencia de la velocidad de aire de secado

El contenido de humedad del fruto de berenjena, sobre base húmeda, fue del orden de $92.60 \% \pm 1.40$ (g. agua/g. $m_{\text{tot}^{\circ}}^S$).

En la Fig. 3.3 se presentan los datos experimentales correspondientes al secado de rodajas de berenjena a 90°C , de diámetro inicial, $D^{\circ} = 6.637 (1 \pm 0.040)$ cm y espesor inicial, $e^{\circ} = 0.684 (1 \pm 0.064)$ cm, tratadas a distintas velocidades de aire: $v_{\infty} = 1; 2; \text{ y } 2.8$ m/s. En la Fig. 3.4, los datos correspondientes al secado de lonjas de berenjenas de espesor inicial, $e^{\circ} = 0.664 (1 \pm 0.086)$ cm tratadas a 90°C y a distintas velocidades de aire de secado. En ambas figuras se observa que la alineación de los puntos muestran que podrían interpolarse mediante familias de líneas curvas. Por otra parte, puede observarse que la

velocidad de aire de secado no presenta una gran influencia sobre la velocidad de secado de las muestras vegetales. Un comportamiento similar se observó durante el secado de rodajas 50°C, 60°C, 70°C y 80°C; y lonjas secadas a 50°C, 70°C y 80°C.



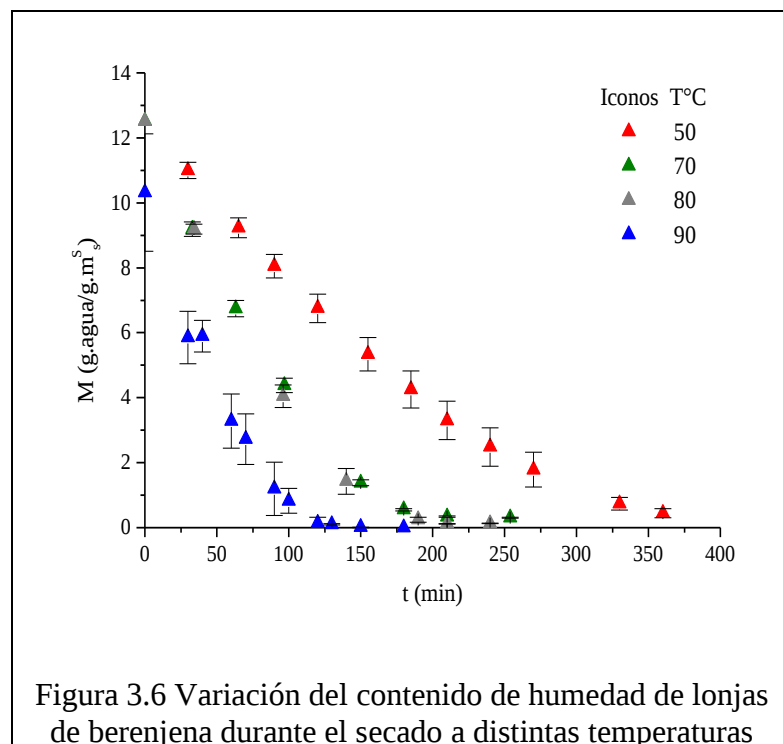
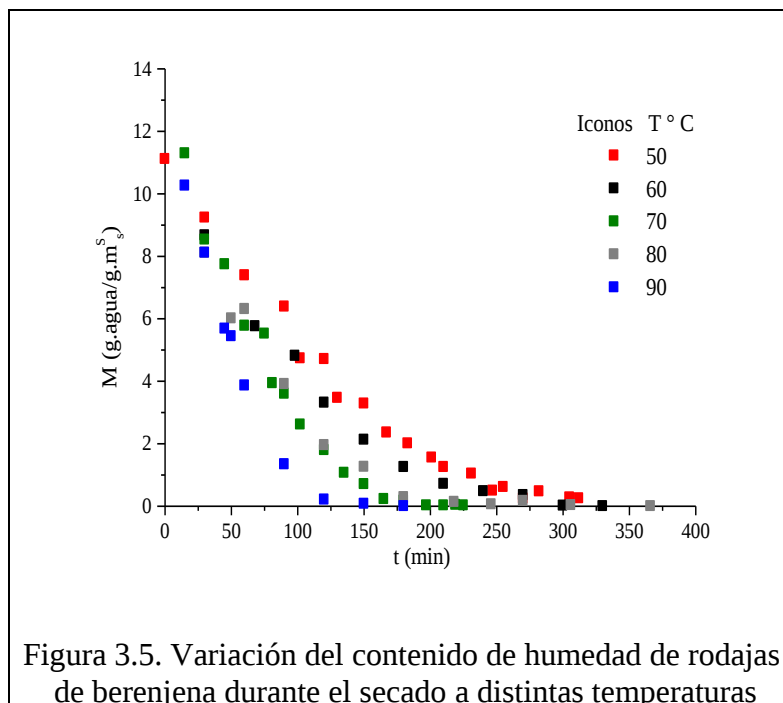
Sgroppo y col (1990), también observaron que la velocidad del aire de secado no presentaba una gran influencia sobre la velocidad de secado de chips de mandioca. Akpinar & Bicer (2005) estudiaron el secado de rebanadas de berenjena de 5 mm de espesor y 35 mm de diámetro a 55°C, 65°C y 75°C, dispuestas sobre bandejas perforadas, a velocidades de aire de 1 y 1.5 m/s; y encontraron que el tiempo total de secado disminuía con el aumento de la temperatura de trabajo, mientras que la velocidad del aire de secado no presentó un gran impacto sobre el mismo. Krokida y colaboradores (2003a), estudiaron el secado de productos frutihortícolas a temperaturas comprendidas entre 65°C y 85°C, a velocidades de aire de 1.5 a 2.6 m/s, y observaron que la velocidad del aire de secado tenía una influencia relativamente baja en comparación a la temperatura, sobre la velocidad del proceso de deshidratación. Concluyeron que podría deberse a que la velocidad mas baja experimentada (1.5 m/s), era en realidad relativamente alta comparada con un proceso de secado por deshidratación natural, es decir procesos de secado por convección libre.

3.2.2 Influencia de la temperatura de secado

En base a los resultados anteriormente expuestos, se optó por trabajar a una velocidad de aire de secado de aproximadamente 2 m/s, uniformándose la metodología del trabajo experimental.

En la Fig. 3.5 se presentan los datos experimentales de la variación del contenido de humedad obtenidos durante el secado de rodajas de berenjena con $D^0=6.637 (1 \pm 0.04)$ cm y $e^0=0.684 (1 \pm 0.064)$ cm, tratadas a las siguientes temperaturas: 50°C, 60°C, 70°C, 80°C y 90°C. En la Fig. 3.6 se presentan los datos experimentales correspondientes al secado de lonjas de berenjena a las siguientes temperaturas: 50°C, 70°C, 80°C y 90°C. Cada una de estas curvas es el resultado promedio de los datos experimentales obtenidos para cada condición ensayada. En ambas figuras, puede observarse la influencia de la temperatura del aire, ya que a mayor temperatura menor es el tiempo total de secado, tanto para el corte tipo rodajas o tipo lonjas. Sgroppo y Avanza (2002) realizaron observaciones análogas durante el secado de rodajas de berenjena. Akpinar y Bicer (2005), observaron un comportamiento similar durante el secado rodajas de berenjena en bandejas perforadas. La misma observación reportaron otros autores que estudiaron el secado de distintos productos frutihortícolas, como por ejemplo rodajas de tomate (Hawlder y col., 1991); ajo (Madamba y col., 1996); productos frutihortícolas usados para preparados de sopas

deshidratadas (Krokida y col., 2003a); pimientos (Akpinar y col., 2003a); rodajas de berenjena (Ertekin y Yaldiz, 2004); zanahorias (Doymaz, 2004) y calabaza (Doymaz, 2007).



En la Tabla 3.1 se detallan los valores del tiempo total de secado de rodajas de berenjena a cada condición ensayada. El mismo se incrementa a medida que disminuye la temperatura de secado y aumenta el espesor de la muestra inicial.

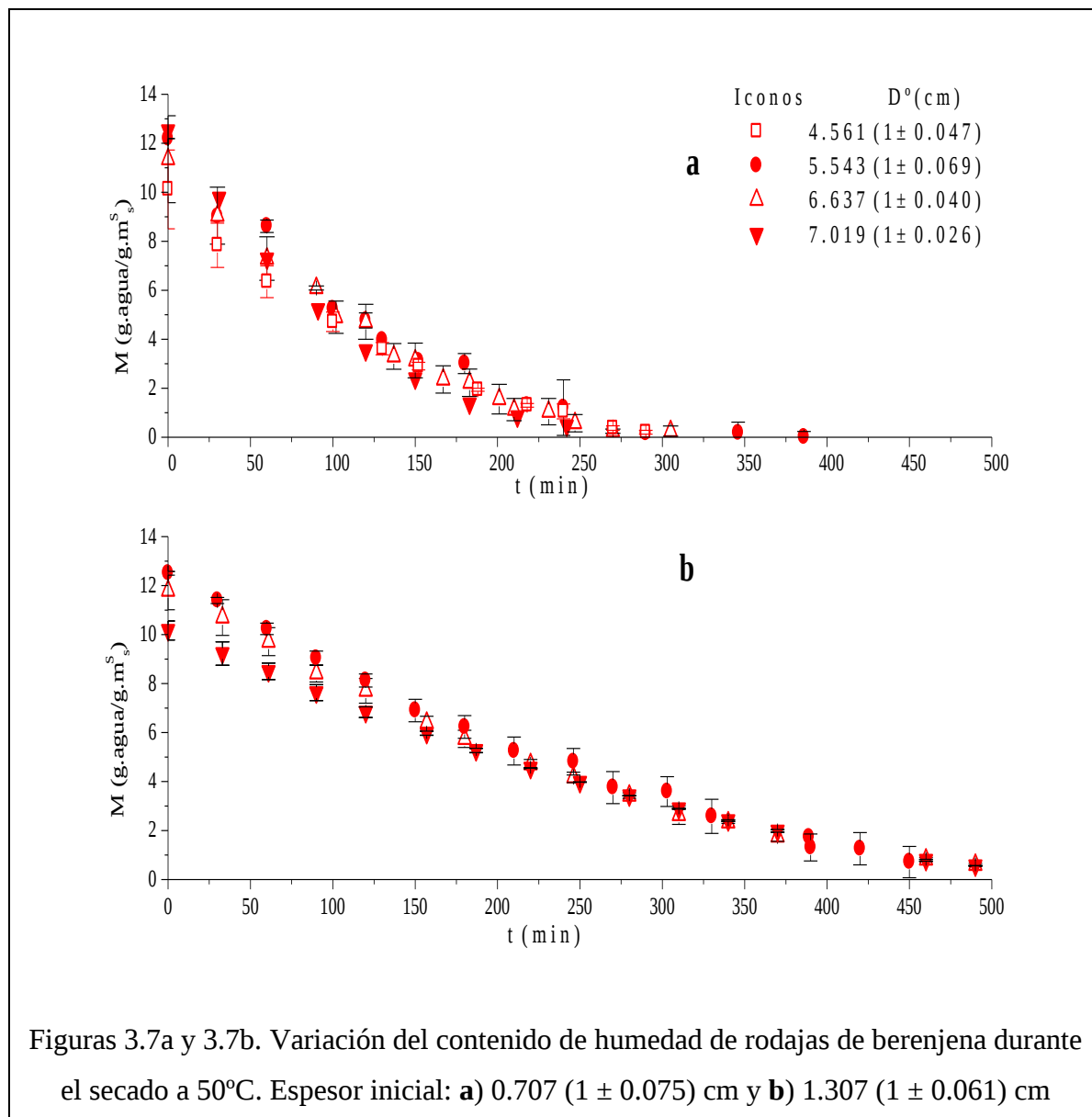
Tabla 3.1: Tiempo total de secado de rodajas de berenjena de diferentes tamaños			
D° (cm)	e° (cm)	T (°C)	t (min.)
4.561 (1 ± 0.047)	0.739 (1 ± 0.070)	50	290 ± 15
		70	252 ± 20
5.543 (1 ± 0.069)	0.727 (1 ± 0.108)	50	386 ± 15
		70	252 ± 20
	1.259 (1 ± 0.068)	50	420 ± 15
6.637 (1 ± 0.040)	0.684 (1 ± 0.064)	50	294 ± 10
		60	300 ± 31
		70	230 ± 10
		80	210 ± 20
		90	150 ± 15
		50	490 ± 15
		70	334 ± 49
		80	306 ± 20
7.019 (1 ± 0.026)	1.275 (1 ± 0.094)	90	270 ± 10
		50	268 ± 52
		70	213 ± 12
	0.676 (1 ± 0.058)	90	150 ± 10
		50	460 ± 25
		70	300 ± 23
	1.388 (1 ± 0.021)	90	270 ± 11

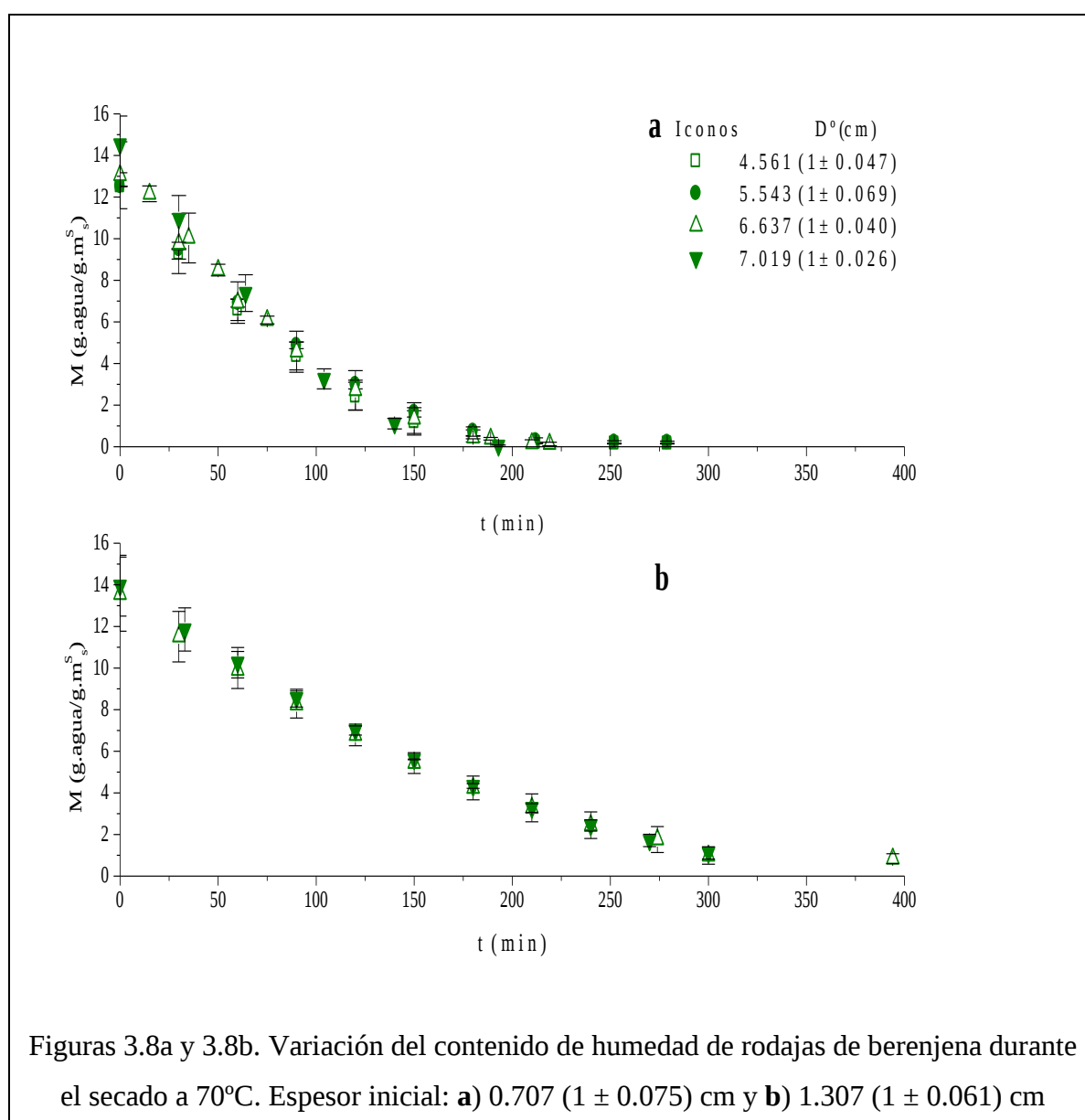
El tiempo total de secado de lonjas de berenjena a 90°C fue de 150 minutos, a 80°C de 200 minutos, a 70°C de 230 minutos, mientras que a 50°C fue de 360 minutos. Aquí también el tiempo total de secado se incrementa a medida que disminuye la temperatura de secado. Los valores obtenidos son similares a los correspondientes a rodajas de berenjena de espesor semejante, excepto a 50°C que es bastante superior.

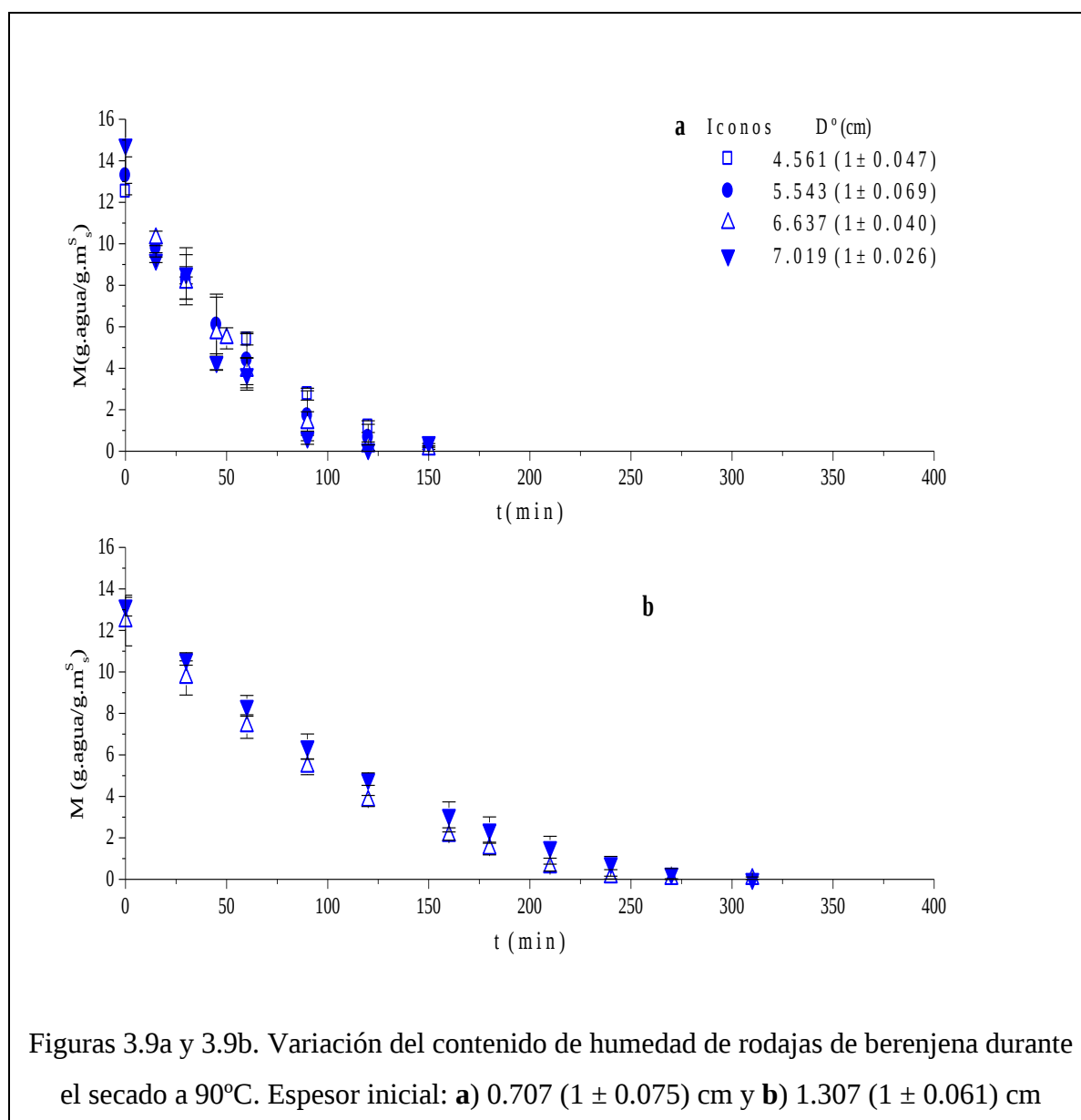
3.2.3 Efecto de las dimensiones iniciales de las rodajas

En las Figs. 3.7, 3.8 y 3.9, se presentan los datos experimentales de la variación del contenido de humedad durante el secado a 50°C, 70°C y 90°C de rodajas de berenjena de

espesor inicial: $e^0 = 0.707 (1 \pm 0.075)$ cm y $1.307 (1 \pm 0.061)$ cm (Figs. a y b, respectivamente) variando el diámetro inicial (D^0) de las mismas.

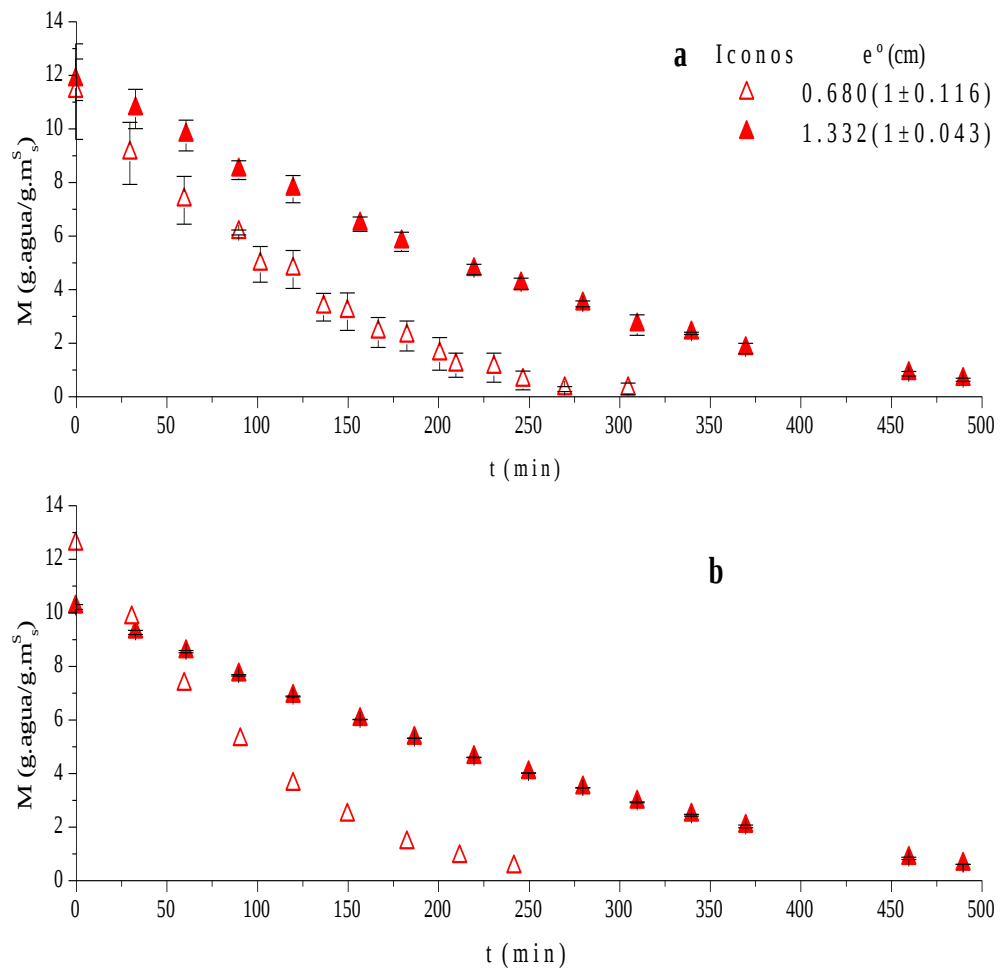




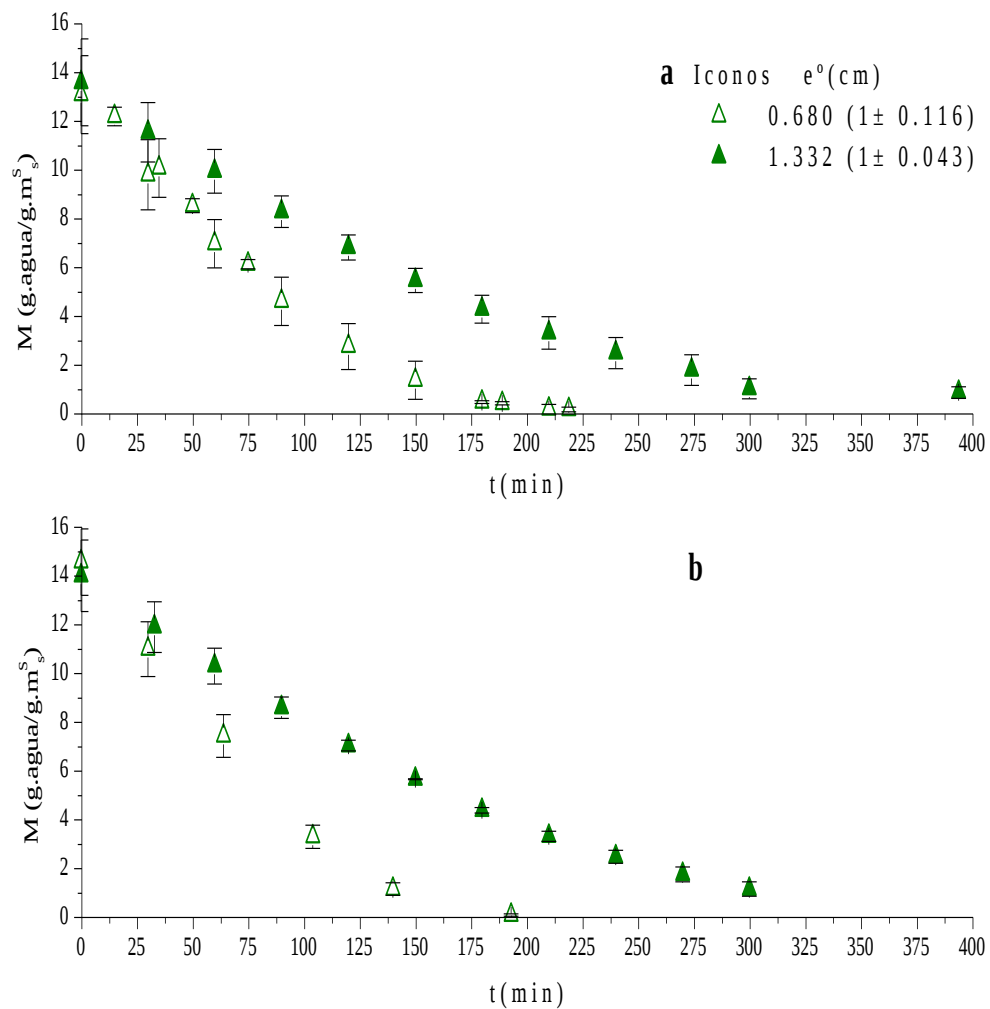


A igual temperatura de secado y espesor inicial, e° , de las rodajas, se observa que el tiempo total de secado es semejante, independientemente del diámetro inicial, D° . A medida que incrementa e° , se observa un aumento en el tiempo total de secado de las rodajas de berenjena.

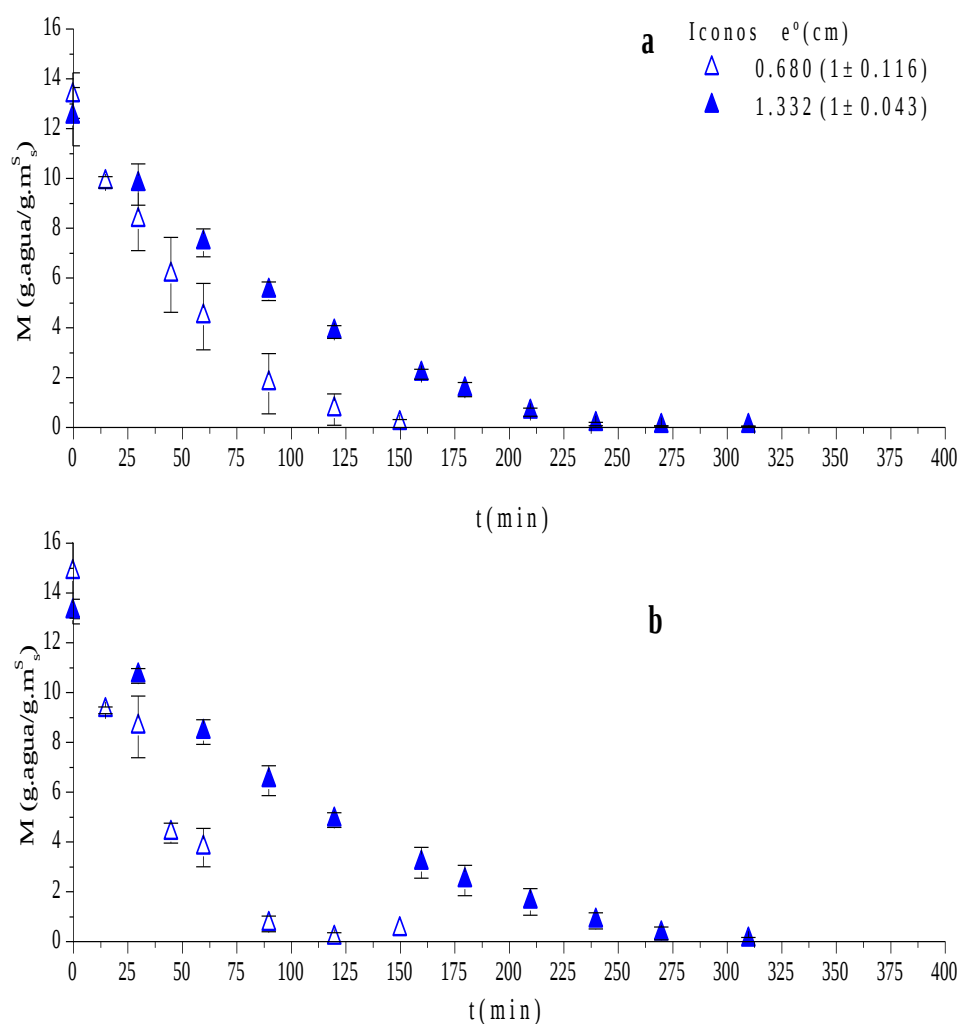
En las Figs. 3.10, 3.11 y 3.12 se presentan los datos experimentales obtenidos durante el secado de rodajas de berenjena a 50 °C, 70 °C y 90 °C, de diámetro inicial 6.637 (1 ± 0.040) cm y 7.019 (1 ± 0.026) cm (Figs. a y b, respectivamente) variando el factor e° .



Figuras 3.10a y 3.10b. Variación del contenido de humedad de rodajas de berenjena durante el secado a 50°C. Diámetro inicial: **a)** 6.637 (1 ± 0.040) cm y **b)** 7.019 (1 ± 0.026) cm



Figuras 3.11a y 3.11b. Variación del contenido de humedad de rodajas de berenjena durante el secado a 70°C. Diámetro inicial: **a)** 6.637 (1 ± 0.040) cm y **b)** 7.019 (1 ± 0.026) cm



Figuras 3.12a y 3.12b. Variación del contenido de humedad de rodajas de berenjena durante el secado a 90°C. Diámetro inicial: **a)** 6.637 (1 ± 0.040) cm y **b)** 7.019 (1 ± 0.026) cm

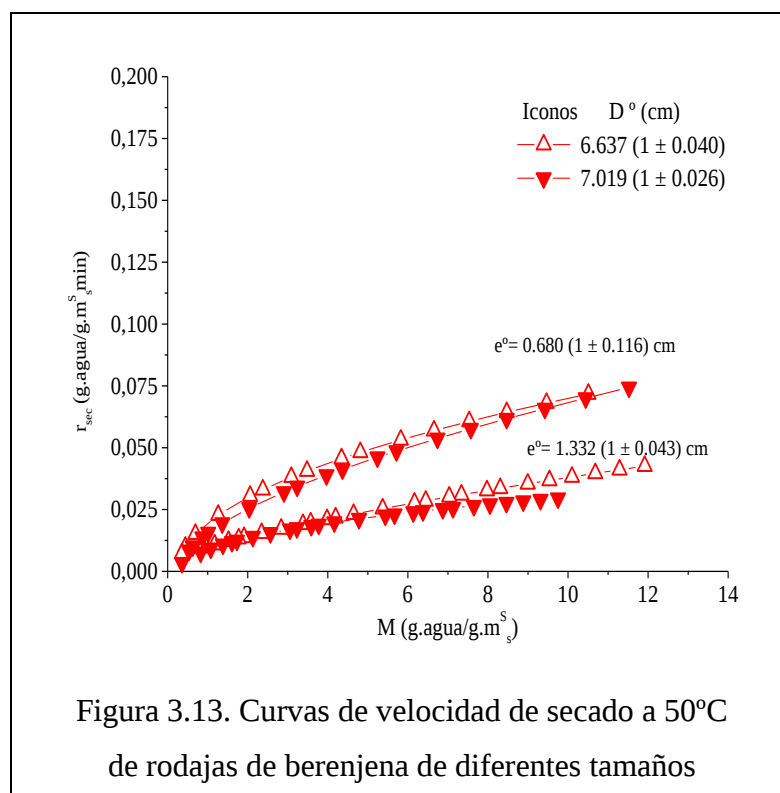
Se observa hasta el momento, que durante el proceso de secado, a las condiciones ensayadas, que los factores significativos a considerar son la temperatura de secado y el espesor inicial, e^0 , de las rodajas, ya que ha quedado demostrado claramente que el diámetro inicial de las mismas no afecta el proceso de manera significativa. Ruiz-López y colaboradores (2004) observaron que durante el secado de láminas de zanahorias, la utilización de rodajas de espesor menor determinaba una disminución en el tiempo necesario para alcanzar un contenido de humedad determinado. Lo mismo fue observado

por Ertekin y Yaldiz (2004) durante el secado de rodajas de berenjenas en bandejas así como Doymaz (2008) durante el secado de rodajas de puerro de diferente espesor.

3.2.4 Velocidad de secado en función del contenido de humedad

Algunos investigadores han analizado datos de velocidad de secado en función del contenido de humedad, con el propósito de poder comparar resultados que obtuvieron otros investigadores. A tal propósito se empleará aquí este lineamiento.

En las Fig. 3.13, 3.14 y 3.15 se presentan las curvas de velocidad de secado (r_{sec}) de rodajas de berenjena a 50°C, 70°C y 90°C, en función del contenido en humedad, M. Para ello se calcularon los polinomios correspondientes para cada curva de secado obtenida experimentalmente, M vs. (t); y representándose luego r_{sec} , en función del contenido de humedad, M.



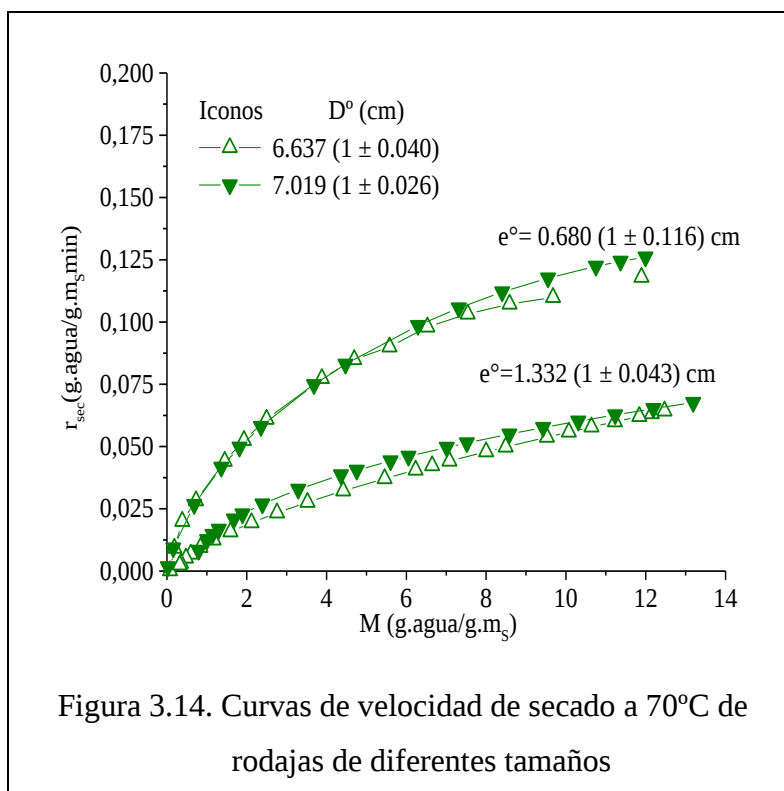


Figura 3.14. Curvas de velocidad de secado a 70°C de rodajas de diferentes tamaños

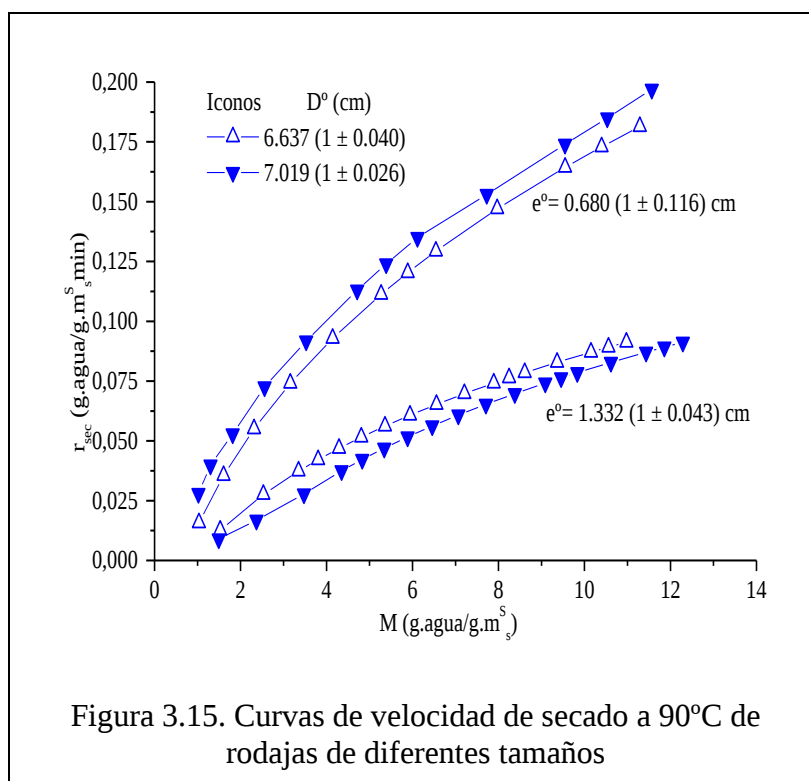
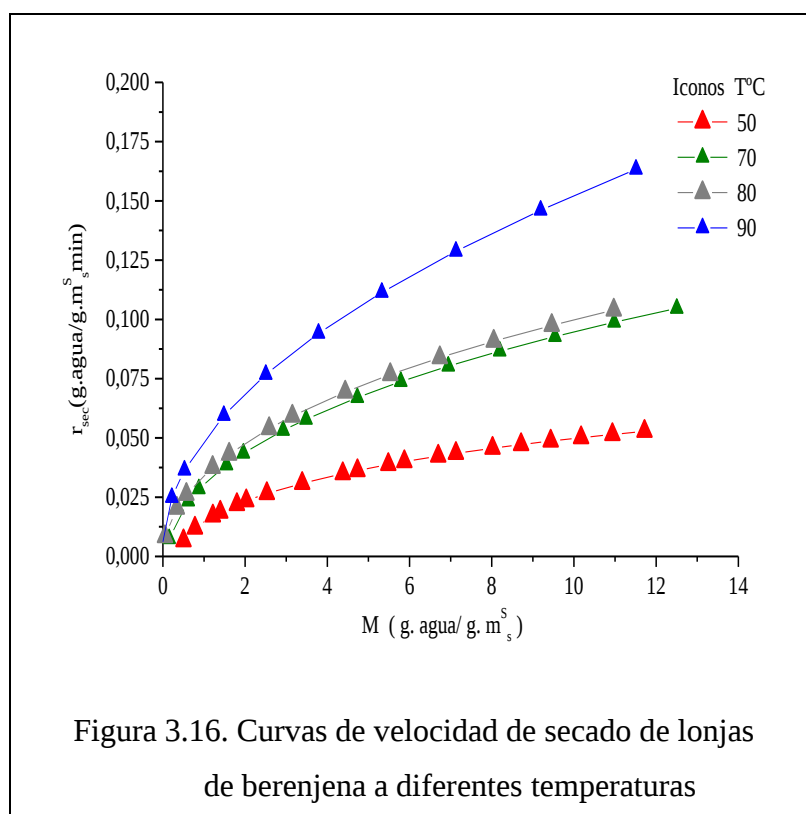


Figura 3.15. Curvas de velocidad de secado a 90°C de rodajas de diferentes tamaños

En la Fig. 3.16 se presentan las curvas de velocidad de secado, r_{sec} , de lonjas de berenjena a 50°C, 70°C, 80°C y 90°C, en función del contenido en humedad residual, M . Para ello se procedió de la misma forma que la mencionada previamente para rodajas.

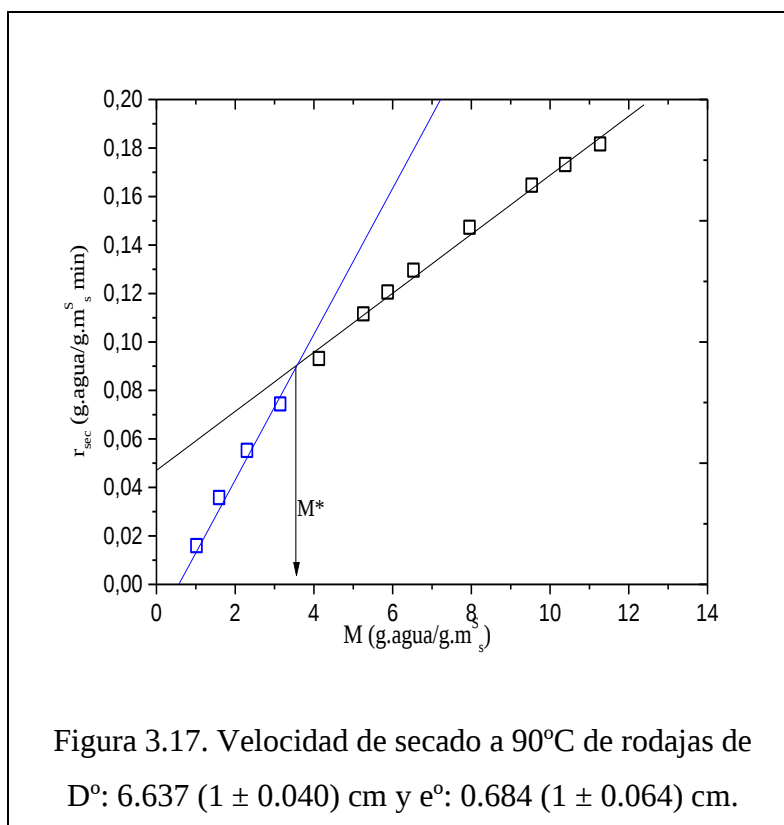


A todas las condiciones ensayadas se observa que el proceso de secado no presenta periodo de velocidad constante, al igual que lo observado por diversos investigadores, entre ellos: Trogul y Phelivan (2003) durante el secado de frutos enteros de damasco, Akanbi y col (2006) durante el secado de rodajas de tomate.

En cambio, Pabis (1999) propuso que durante el secado de hongos, ajo, rodajas de zanahorias y remolacha se presenta un primer período de velocidad constante de secado, cuando se ajustan los datos experimentales al modelo matemático que postula, teniendo en cuenta el encogimiento generado durante el proceso.

El proceso de secado de rodajas y lonjas de berenjena transcurre en el período de velocidad decreciente, encontrándose en casi todos los casos dos sub-períodos. El primero denominado zona de alta humedad, y el segundo zona de baja humedad. El valor de humedad crítica, M^* , corresponde al punto de intersección de las dos zonas. El mismo fue

determinado por regresión lineal de los datos experimentales correspondientes a cada sub-período, como se muestra en la Fig. 3.17.



Los valores de la humedad crítica (es decir cuando la velocidad de secado del material vegetal cambia de valor) se detallan en la Tabla 3.2 y 3.3. Se observa que los mismos, para el corte tipo rodaja, se incrementan con la temperatura de secado, independientemente de las dimensiones iniciales de las rodajas. En cambio los valores obtenidos para las muestras tipo lonjas disminuyen con la temperatura de secado.

Tabla 3.2: Valores de la humedad crítica de secado de corte tipo rodajas			
D° (cm)	e° (cm)	T (°C)	M* (g. agua/ g. m _s ^S)
6.637 (1 ± 0.040)	0.684 (1 ± 0.064)	50	1.94
		60	1.84
		70	2.99
		80	3.26
		90	3.58
	1.291 (1 ± 0.087)	50	-
		60	-
		70	2.12
		80	1.32
		90	3.70
7.019 (1 ± 0.026)	0.676 (1 ± 0.058)	50	1.91
		70	3.07
		90	3.36
	1.388 (1 ± 0.021)	50	2.69
		70	2.78
		90	5.74

Tabla 3.3: Valores de humedad crítica de secado de corte tipo lonjas	
T(°C)	M* (g. agua/g. m _s ^S)
50	2.73
70	2.47
80	2.09
90	0.89

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos respecto de la influencia de la temperatura del aire de secado, dimensiones iniciales de las rodajas y lonjas de berenjena y las curvas de velocidad de secado, se puede inferir que el proceso de secado de rodajas y lonjas de berenjena se desarrolla totalmente dentro del período de velocidad decreciente.

Es importante destacar que estas observaciones finales fueron hechas en base a las variables analizadas (M vs t o r_{sec} vs M).

Capítulo 4

RESULTADOS Y DISCUSION

PARTE 2: Cambios físicos durante el secado

4.1. INTRODUCCIÓN

Uno de los cambios físicos exhibidos por los alimentos durante el secado es la reducción de su volumen provocado por la pérdida de agua y el calentamiento durante el desarrollo del mismo. En general, el encogimiento tiene consecuencias negativas en la calidad del producto deshidratado (cambios de forma, pérdida de volumen e incremento de la dureza), causando en la mayoría de los casos una impresión negativa en el consumidor. Sin embargo, ciertos productos deshidratados presentan estas características como un atributo más de los mismos, siendo requeridos por el consumidor como es el caso de tomates, pasas de uva, ciruelas, durazno y dátiles desecadas (Mayor y Sereno, 2004)

Durante el secado de alimentos, el encogimiento de los mismos es raramente despreciable, siendo recomendable su consideración cuando se realizan predicciones de perfiles de humedad. En este sentido, han sido propuestos diferentes expresiones matemáticas que predicen el cambio de volumen del material vegetal durante el proceso y que deberían tenerse en consideración. (ver por ejemplo: Mayor & Sereno, 2004)

Tanto Suzuki y col. (1976) como Mulet (1994) reportaron que el grado de encogimiento podía ser función del contenido en humedad del alimento. Este último y Lang y col. (1994) propusieron funciones lineales para relacionar el grado de encogimiento con el contenido de humedad del material, mientras que Hernandez y col. (2000) plantearon otro tipo de ecuaciones para relacionar estos dos fenómenos.

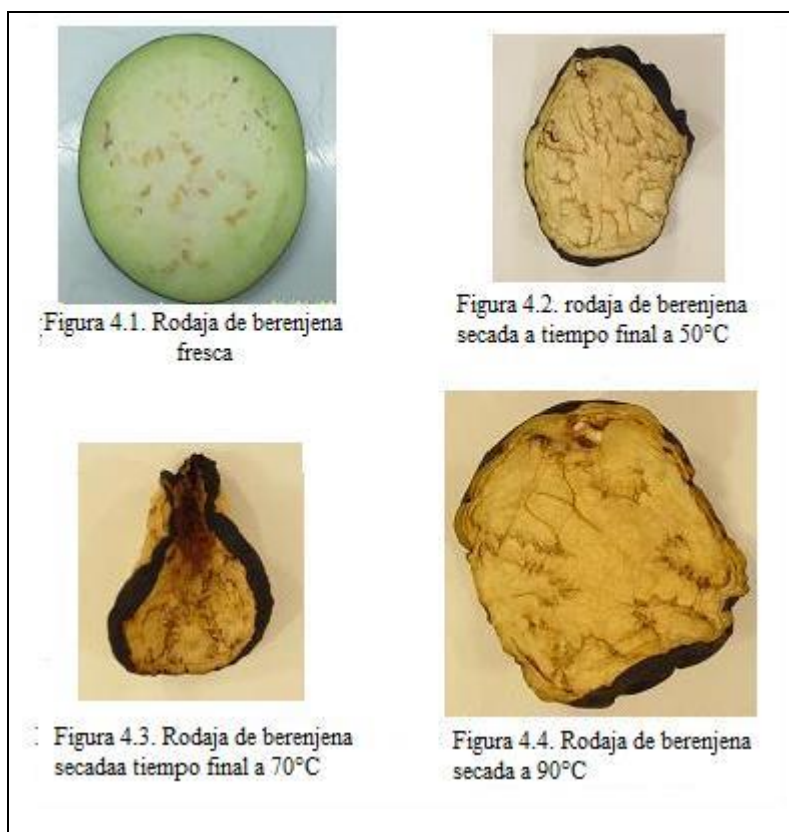
Este fenómeno se presenta frecuentemente en las operaciones de deshidratación de alimentos y en el caso del secado de berenjena, no es despreciable. Para estudiarlo se procedió según lo detallado en el ítem 2.3 del Capítulo 2, con el propósito de obtener información sistemática para los dos tipos de corte ensayados (rodaja y lonja). Se procesaron datos experimentales obtenidos durante el mismo, correspondientes a los dos tipos de corte. En el caso de muestras tipo rodajas, se utilizaron muestras vegetales con diámetro inicial $D^{\circ} = 6.637 (1 \pm 0.040)$ cm y $7.019 (1 \pm 0.026)$ cm; y espesores iniciales, e° detallados en la Tabla 2.1, del Capítulo 2. En el segundo caso, se utilizaron muestras vegetales, tipo lonjas cuyas dimensiones ya fueron detalladas en el Capítulo 2. Las mediciones del diámetro, eje mayor y menor, se realizaron hasta el momento previo en que comenzaba el alabeo de las muestras vegetales, ya que una vez alabeada la muestra no era factible medir fehacientemente dichas dimensiones con el vernier; en cambio las medidas del espesor se realizaron hasta que el valor del mismo se mantuvo constante.

Al igual que en el Capítulo anterior, se agruparan los resultados obtenidos en base a un valor medio de espesor y diámetro a tiempo inicial, calculados a partir de todos los datos experimentales (independientemente de la temperatura de secado al cual hayan sido sometidos).

4.2. CAMBIOS ESTRUCTURALES QUE EXPERIMENTA LA MUESTRA VEGETAL

4.2.1 Contracción de las longitudes características

En las Figs. 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 se presentan fotografías de muestras de rodajas de berenjena a tiempo inicial y secada a 50°C, 70°C y 90°C a tiempo final, es decir cuando la masa de la misma permanece constante. Se observa claramente como se ha modificado entre otras cosas, la forma original debido a la contracción producida durante el secado.



A todas las condiciones ensayadas, se observó la disminución de las dimensiones características a medida que transcurre el secado de las muestras vegetales, donde el inicio

de la deformación o alabeo, que se observa a simple vista, se produce a un cierto contenido de humedad, que lo simbolizaremos: M' (g. agua/g. m_s^S). En la Tabla 4.1 y 4.2 se detallan los valores de M' junto con los porcentajes de contracción de las longitudes características para cada tipo de corte, calculados mediante la ec. 4.1, que se detalla a continuación:

$$\%C_\ell = 100 \frac{(\ell^\circ - \ell)}{\ell^\circ} \quad (4.1)$$

donde: ℓ , es la longitud característica de la muestra vegetal (espesor, diámetro, longitud del eje mayor o del eje menor medido); $\%C_\ell$, contracción porcentual de la longitud característica, ℓ .

Cabe aclarar que el valor del porcentaje de contracción del espesor corresponde al momento en que se observa el alabeo de la muestra vegetal así como el valor de M' ; pero no así los valores de porcentaje de contracción del diámetro, eje mayor y menor, que corresponden a un momento previo a la observación del alabeo.

Tabla 4.1: Valores de contenido de humedad y de contracción de las dimensiones características de rodajas de berenjena cuando se inicia el alabeo

D° (cm)	e° (cm)	T (°C)	M' (g./g. m_s^S)	$\%C_D$	$\%C_e$
6.637 (1 ± 0.040)	0.684 (1 ± 0.064)	50	5.29 ± 1.01a	13.01 ± 1.91a	30.53 ± 4.70a
		70	5.78 ± 1.61a	16.49 ± 5.12bb	26.26 ± 3.81b
		80	4.44 ± 0.49b	6.99 ± 1.28c	29.32 ± 1.84ab
		90	4.42 ± 0.69b	14.29 ± 1.50ab	29.33 ± 4.01a
	1.275 (1 ± 0.094)	50	3.94 ± 0.96a	12.66 ± 2.59a	35.05 ± 6.44 a
		70	3.03 ± 0.96b	21.18 ± 2.66b	37.32 ± 1.69 a
		80	2.51 ± 0.24b	6.28 ± 0.66c	37.05 ± 2.50 a
		90	1.62 ± 0.44c	18.47 ± 2.3d	50.02 ± 2.98b
7.019 (1 ± 0.026)	0.676 (1 ± 0.058)	50	5.84 ± 1.08a	16.69 ± 2.24a	29.52 ± 4.42 a
		70	5.40 ± 1.16a	19.58 ± 3.01a	29.72 ± 3.74 a
		90	4.09 ± 0.37b	15.82 ± 1.34a	26.05 ± 0.78 a
	1.388 (1 ± 0.021)	50	2.41 ± 0.03a	21.31 ± 0.11ab	32.64 ± 4.00 a
		70	4.67 ± 0.66b	15.85 ± 2.33c	40.05 ± 1.69 b
		90	3.11 ± 0.32c	18.74 ± 0.53ab	49.20 ± 2.50 c

*letras distintas indican diferencias significativas (Test LSD de Fisher $p \leq 0.05$). En este caso se analizaron los valores para cada dimensión ensayada comparando en base a la temperatura de secado.

Tabla 4.2: Valores de contenido de humedad y de contracción de las dimensiones características de lonjas de berenjena cuando se inicia el alabeo

T (°C)	M' (g. agua/g. m_s^S)	%C _{Em}	%C _{En}	%C _e
50	4.70 ± 0.58a	16.06 ± 4.00a	12.66 ± 1.30a	39.39 ± 5.03a
70	4.21 ± 0.89a	12.10 ± 1.50b	6.10 ± 0.90 a	53.34 ± 2.90bb
80	4.03 ± 0.78ab	13.65 ± 4.58b	6.01 ± 1.30 a	50.28 ± 5.70cbd
90	3.22 ± 0.92bb	6.52 ± 1.77c	2.65 ± 0.88b	43.47 ± 9.02ad

* letras distintas indican diferencias significativas (Test LSD de Fisher $p \leq 0.05$).

En el caso de muestras vegetales tipo rodajas de espesor inicial menor ($e^\circ \cong 0.6$ cm), el contenido de humedad al cual se produjo el alabeo varió entre 4 a 5.8 g. agua /g. m_s^S y el espesor disminuyó en un término medio de 28.68 (1 ± 0.062) %. En cambio, las rodajas de espesor inicial mayor ($e^\circ \cong 1.2$ cm) se alabearon a contenidos de humedad inferiores, que fluctuaron entre valores de 1.6 a 3.9 g. agua /g. m_s^S , observándose una mayor contracción del espesor que osciló en un rango de 32 a 50 %. A su vez, el diámetro ha disminuido aproximadamente en un valor medio de 15.52 (1 ± 0.29) % en ambos casos, no presentando diferencias significativas (test LSD Fisher $p \geq 0.05$) entre los valores obtenidos a 50°C, 70°C y 80°C, independientemente del espesor inicial de las mismas. Por otra parte, pudo observarse que el valor de M', no presenta diferencias significativas entre los dos diámetros estudiados, sin embargo si se observaron diferencias significativas, a todas las temperaturas ensayadas, entre rodajas de diferente espesor inicial. (test LSD Fisher : $p \leq 0.05$)

En el caso de muestras vegetales tipo lonjas, el alabeo se inicia a un cierto contenido de humedad, M', no presentando diferencias significativas entre las temperaturas 50°C, 70°C y 80°C, encontrándose su valor dentro del rango hallado para el corte tipo rodajas de espesor semejante. A su vez, el porcentaje de disminución del espesor es superior en todos los casos, respecto de las demás dimensiones analizadas, al igual que en el caso de las muestras tipo rodajas.

Simal y colaboradores (1998) observaron que durante el secado de tallos de brócoli, la longitud del cilindro permanecía prácticamente constante. Queiroz y Nebra, (2001), encontraron que las bananas se encogen entre 43-47% de su diámetro original durante el secado a temperaturas entre 30°C a 70 °C.

Todo lo anteriormente expresado, sugiere la importancia de estudiar éste fenómeno durante el proceso de secado, ya que el camino recorrido por el agua al secarse el producto no es el mismo mientras dura todo el proceso.

En las Figs. 4.5 y 4.6 se presentan los datos correspondientes a la variación del espesor, (e/e°), y del diámetro, (D/D°), de rodajas de berenjena durante el secado a 50°C, 70°C, 80°C y 90°C, en función de la fracción humedad remanente, (M/M°). No se encontraron diferencias significativas entre rodajas de espesor similar y diferente diámetro inicial, por lo que se presentan los datos agrupados únicamente por el espesor inicial, e° : 0.680 (1 ± 0.116); 1.332 (1 ± 0.043).

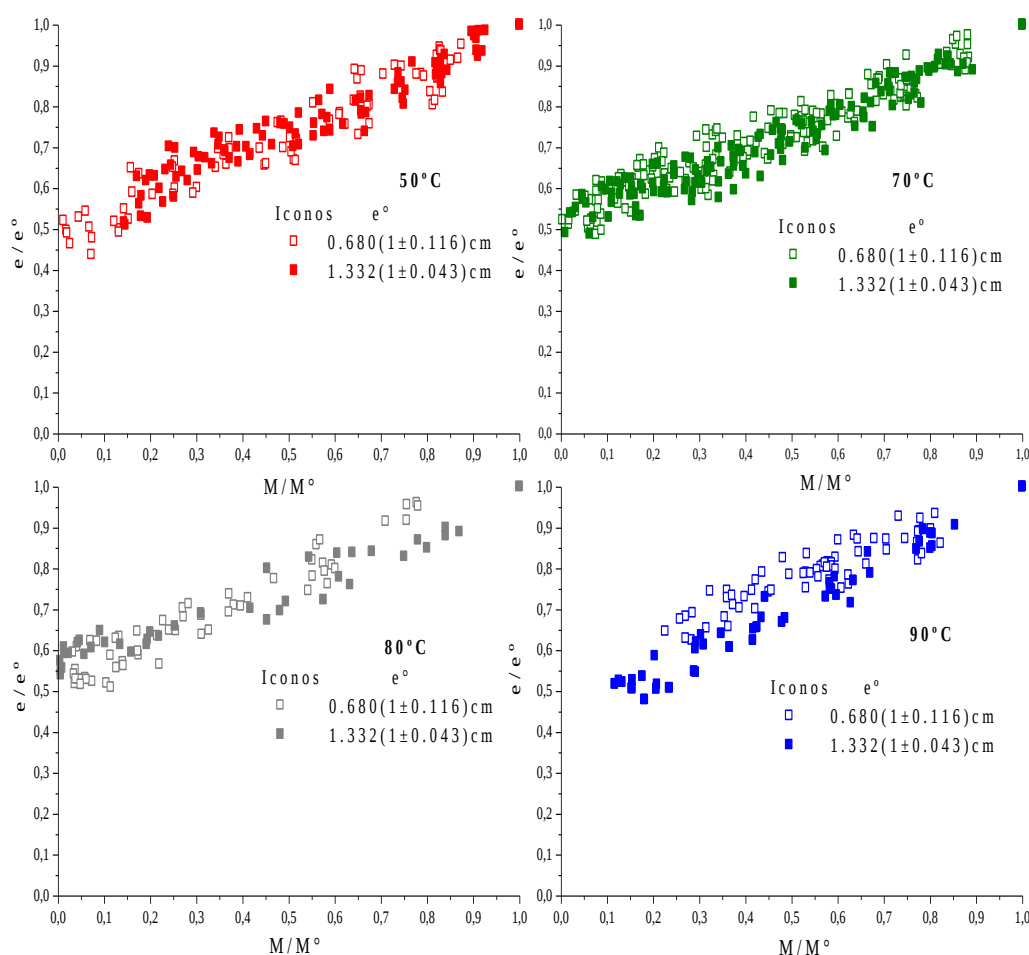


Figura 4.5. Variación del espesor adimensional (e/e°) en función (M/M°) durante el secado de rodajas de berenjena

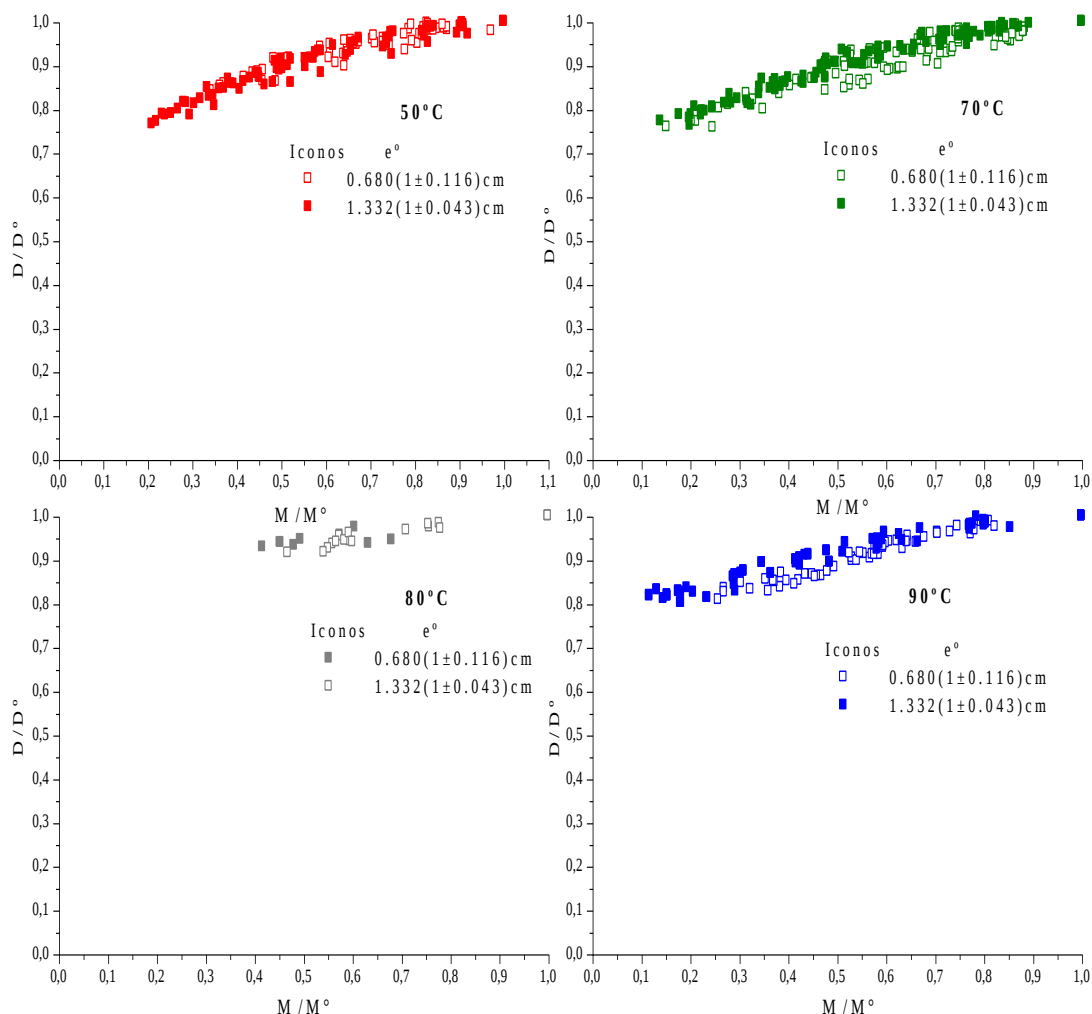


Figura 4.6. Variación del diámetro adimensional (D/D°) en función (M/M°) durante el secado de rodajas de berenjena

En la Fig. 4.7 se presentan los datos de la variación de las dimensiones características de lonjas de berenjena durante el secado a 50°C en función de (M/M°). (Em: longitud del eje mayor; En: longitud del eje menor)

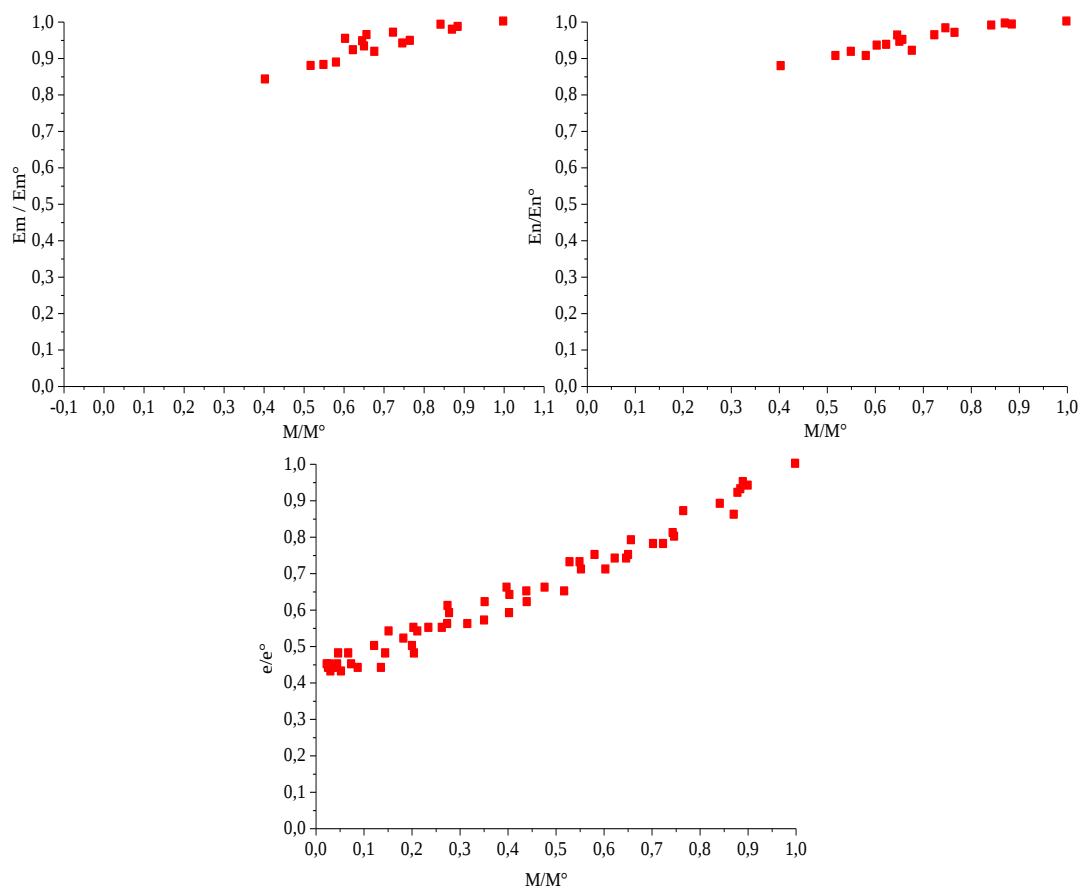


Figura 4.7. Variación de las longitudes características de lonjas de berenjena en función de (M/M°) durante el secado a 50°C

La variación de la longitud característica de cada una de las muestras vegetales con su correspondiente fracción de humedad residual adjunta, M/M° , puede expresarse como una relación lineal del tipo:

$$\frac{\ell}{\ell^{\circ}} = A + \frac{B M}{M^{\circ}} \quad (4.2)$$

debiendo los coeficientes A y B estimarse de datos experimentales.

En las Tablas 4.3 y 4.4 se detallan estimas de los coeficientes A y B que se obtuvieron por regresión lineal de los datos experimentales de muestras tipo rodajas, obtenidos utilizando la ec. (4.2) (Software: Origin 5.0).

Tabla 4.3: Estimaciones de los coeficientes **A** y **B** correspondientes a la contracción de “e” de rodajas.

T (°C)	e° (cm)	A	B	R ²
50	0.680 (1 ± 0.116)	0.453	0.532	0.939
	1.332 (1 ± 0.043)	0.498	0.486	0.923
60	0.680 (1 ± 0.116)	0.527	0.481	0.956
70	0.680 (1 ± 0.116)	0.530	0.455	0.895
	1.332 (1 ± 0.043)	0.512	0.467	0.937
80	0.680 (1 ± 0.116)	0.535	0.477	0.918
	1.332 (1 ± 0.043)	0.547	0.435	0.879
90	0.680 (1 ± 0.116)	0.544	0.453	0.900
	1.332 (1 ± 0.043)	0.416	0.576	0.958

Tabla 4.4: Estimaciones de los coeficientes **A** y **B** correspondientes a la contracción de “D” de rodajas.

T (°C)	e° (cm)	A	B	R ²
50	0.680 (1 ± 0.116)	0.792	0.216	0.907
	1.332 (1 ± 0.043)	0.742	0.281	0.944
60	0.680 (1 ± 0.116)	0.874	0.123	0.925
70	0.680 (1 ± 0.116)	0.736	0.270	0.933
	1.332 (1 ± 0.043)	0.743	0.284	0.940
80	0.680 (1 ± 0.116)	0.855	0.146	0.947
	1.332 (1 ± 0.043)	0.824	0.165	0.937
90	0.680 (1 ± 0.116)	0.775	0.232	0.936
	1.332 (1 ± 0.043)	0.795	0.224	0.936

A todas condiciones ensayadas la contracción del espesor de las rodajas es mayor a la experimentada por el diámetro, presentando valores similares a las distintas temperaturas de secado ensayadas.

En la Tabla 4.5 y 4.6 se detallan las estimas de los parámetros obtenidos por regresión lineal de datos experimentales de la variación de las dimensiones características de las muestras vegetales tipo lonjas durante el secado, en función de (M/M^0) utilizando la ec. (4.2). (Software: Origin 5.0)

Tabla 4.5: Estimaciones de los coeficientes **A** y **B** correspondientes a la contracción de “e” de lonjas

T(°C)	A	B	R ²
50	0.409	0.566	0.977
70	0.392	0.586	0.976
80	0.411	0.561	0.957
90	0.394	0.592	0.936

Tabla 4.6: Estimaciones de los coeficientes **A** y **B** correspondientes a la contracción de “Em” y “En” de muestras tipo lonjas

T(°C)		A	B	R ²
50	Em	0.771	0.236	0.854
	En	0.819	0.195	0.895
70	Em	0.829	0.172	0.854
	En	0.910	0.087	0.889
80	Em	0.841	0.162	0.882
	En	0.932	0.070	0.891
90	Em	0.832	0.167	0.906
	En	0.915	0.085	0.937

Las pendientes obtenidas de la contracción del espesor de las lonjas son mayores a las encontradas para el secado de rodajas, lo que indicaría que el espesor de las lonjas se contrae en mayor medida que las primeras, a las mismas condiciones experimentales de secado. En todos los casos el grado de contracción de las longitudes del eje mayor y menor son inferiores a las observadas para el espesor de las muestras tipo lonjas.

Uddin y col. (1990) y Hawlader y col. (1991) relacionaron la variación del espesor adimensional con el cambio del contenido en humedad durante el secado de ananá y tomate respectivamente, con el objeto de luego incluir esta relación en el modelado tradicional de dicho proceso (utilizando la segunda ley de Fick). Un trabajo similar hizo Giovanelli y colaboradores (2002) con productos derivados del tomate. Queiroz y Nebra, (2001) hicieron lo propio para el secado de bananas. En todos los casos plantearon una relación de tipo lineal de la variación de la longitud característica con la humedad residual.

4.2.2 Variación del volumen en función del contenido de humedad

Para calcular el volumen de muestras vegetales tipo rodajas, se las asoció a una geometría cilíndrica calculándose luego la relación entre el volumen actual respecto del inicial (V_{tot}^S/V_{tot}^S), mediante la siguiente expresión:

$$\frac{V_{tot}^S}{V_{tot}^S} = \left(\frac{D}{D^0} \right)^2 \times \frac{e}{e^0} \quad (4.3)$$

donde: V_{tot}^S , es el volumen total de la muestra vegetal.

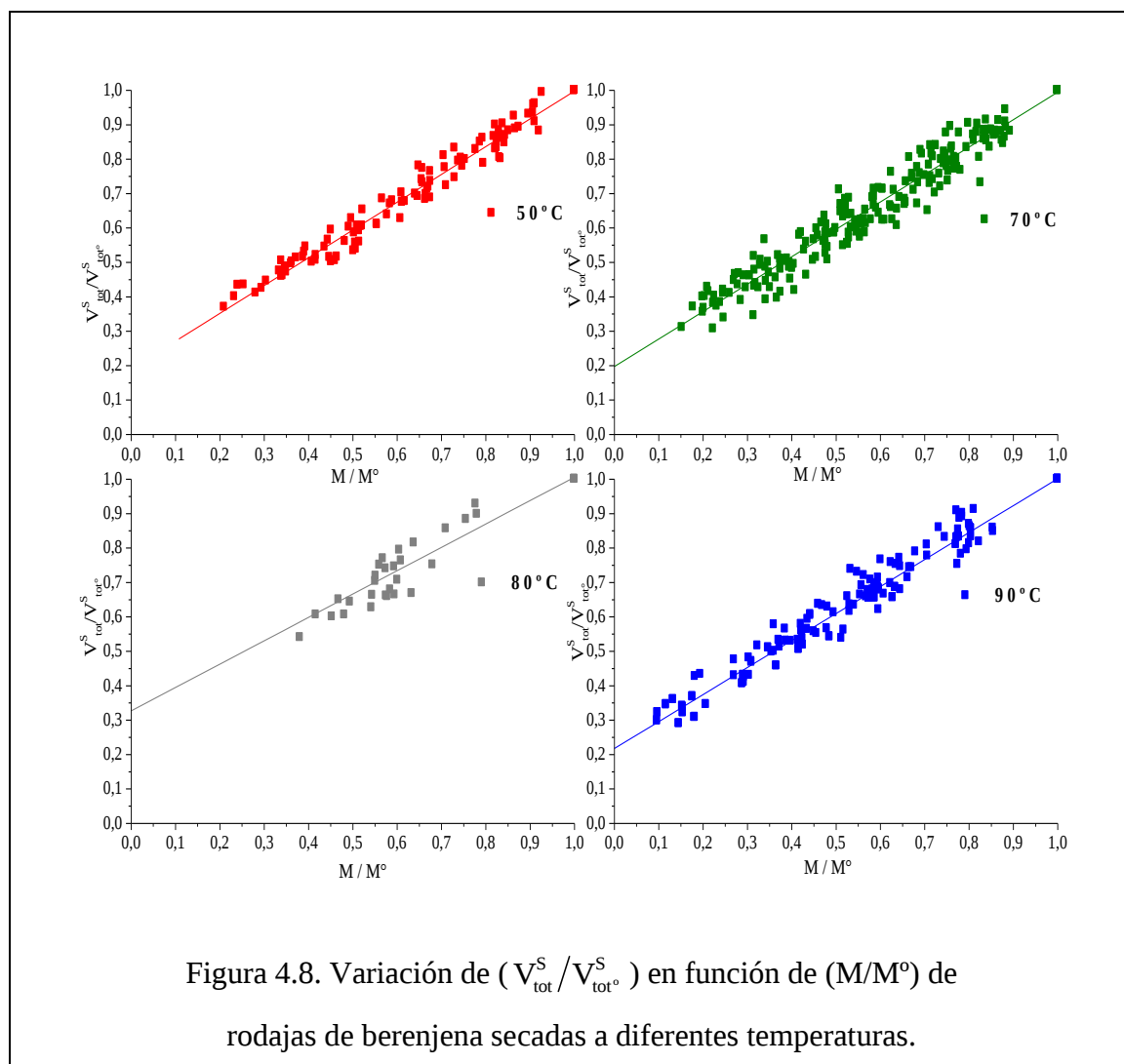
En el caso de lonjas de berenjena, la relación V_{tot}^S/V_{tot}^S se calculó mediante la siguiente ecuación:

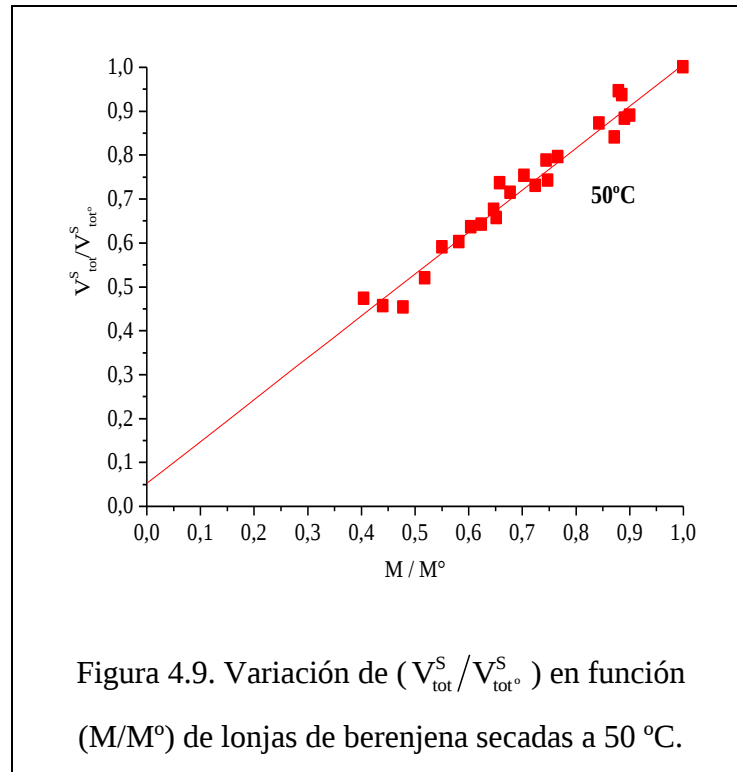
$$\frac{V_{tot}^S}{V_{tot}^S} = \frac{Em}{Em^0} \times \frac{En}{En^0} \times \frac{e}{e^0} \quad (4.4)$$

Las ecuaciones (4.3) y (4.4) se aplicaron para calcular la relación (V_{tot}^S/V_{tot}^S) de las muestras vegetales previo al momento en que inicia el alabeo.

En la Fig. 4.8 se presenta la variación de (V_{tot}^S/V_{tot}^S) de rodajas de berenjena durante el secado a 50°C, 70°C, 80°C y 90°C, en función de (M/M^0), hasta en instante previo en que se inicia el alabeo, ya que el diámetro sólo pudo medirse hasta ese momento. En la Fig.

4.9 se presenta la variación de $(V_{\text{tot}}^S/V_{\text{tot}}^S)$ de lonjas de berenjena en función (M/M^0) , secadas a 50° C.





En ambas figuras, puede observarse que la relación entre las variables utilizadas puede expresarse como una función de tipo lineal, como la señalada mediante la ec.(4.2), hasta el inicio del alabeo, independientemente de las dimensiones iniciales de las muestras vegetales. Esta variación lineal puede expresarse mediante una ecuación similar a la ec.(4.2):

$$\frac{V_{tot}^S}{V_{tot}^0} = A + \frac{B M}{M^0} \quad (4.5)$$

En la Tabla 4.7 se detallan los valores de los coeficientes **A** y **B**, obtenidos por regresión lineal de los datos de la variación de volumen adimensional de rodajas y lonjas de berenjena con el contenido de humedad adimensional a cada temperatura de secado, utilizando la ec. (4.5) (software: Origin 5.0).

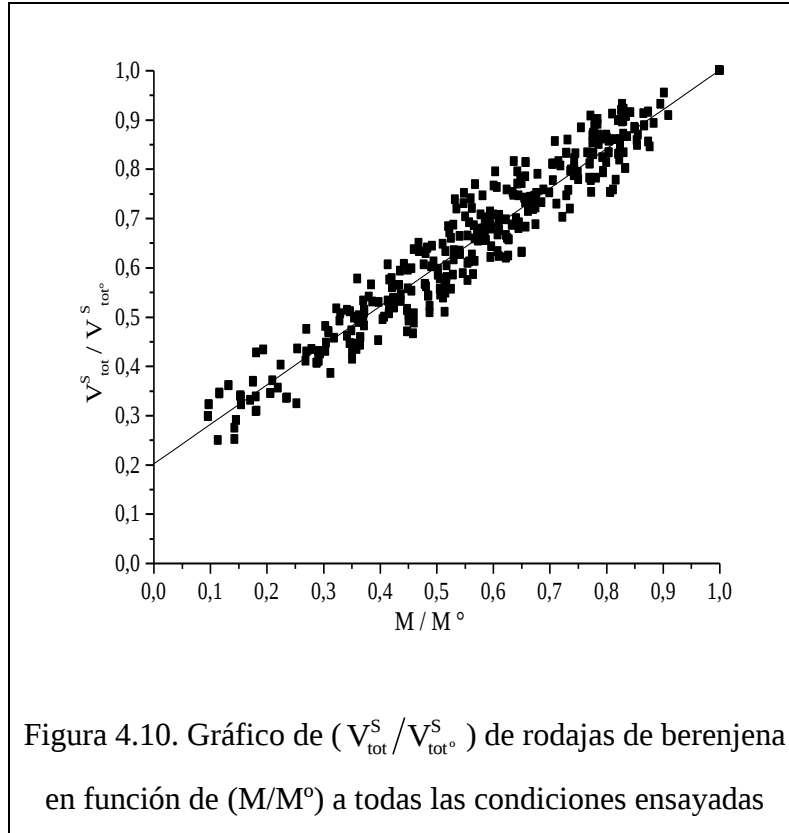
Tabla 4.7: Estima de los coeficientes **A** y **B** correspondientes a la contracción del volumen de los dos tipos de corte.

Tipo de corte	T(°C)	A	B	R ²
rodajas	50	0.165	0.839	0.970
	60	0.200	0.825	0.982
	70	0.181	0.811	0.965
	80	0.314	0.691	0.958
	90	0.218	0.785	0.980
lonjas	50	0.052	0.955	0.978
	70	0.129	0.859	0.986
	80	0.166	0.836	0.989
	90	0.176	0.825	0.967

En la misma, se observa que el grado de contracción del volumen de los dos tipos de corte se incrementa levemente con el decrecimiento de la temperatura. Este comportamiento podría explicarse, teniendo en cuenta que las muestras secadas a elevadas temperaturas, tienen una velocidad de secado inicial elevada, produciéndose rápidamente el endurecimiento de la capa externa de la muestra, agregando mayor resistencia a la contracción, además de la influencia propia de la naturaleza de cada tejido vegetal.

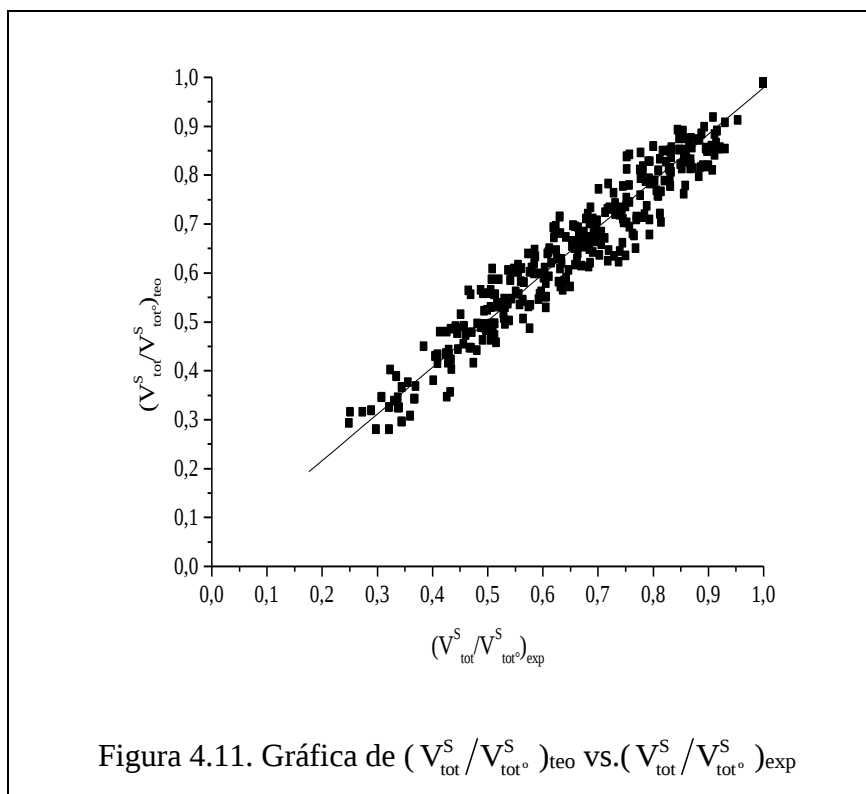
Un comportamiento similar fue observado por: Bai y colaboradores (2002) durante el secado de rodajas de manzana a temperaturas entre 20 y 65 °C y Wang y Brennan (1995a) durante el secado de papas. Valores similares de los coeficientes **A** y **B** hallados en este trabajo de tesis para el secado de rodajas fueron encontrados Mc Minn & Magee (1997a,b) para papas.

Sin embargo, graficando todos los datos de la variación ($V_{\text{tot}}^S / V_{\text{tot}}^S$) de rodajas en función de (M/M^0) a todas las condiciones ensayadas (Fig. 4.10), puede observarse que dicho comportamiento podría expresarse mediante un única expresión de tipo lineal. Los valores de los parámetros que se obtuvieron por regresión lineal de todos los datos experimentales utilizando la ec. (4.5), fueron: **A** = 0.203; **B**= 0.799 ($R^2=0.969$). El error de correlación estimado fue: $E = 5.81\% \pm 1.05$. El mismo fue calculado como:

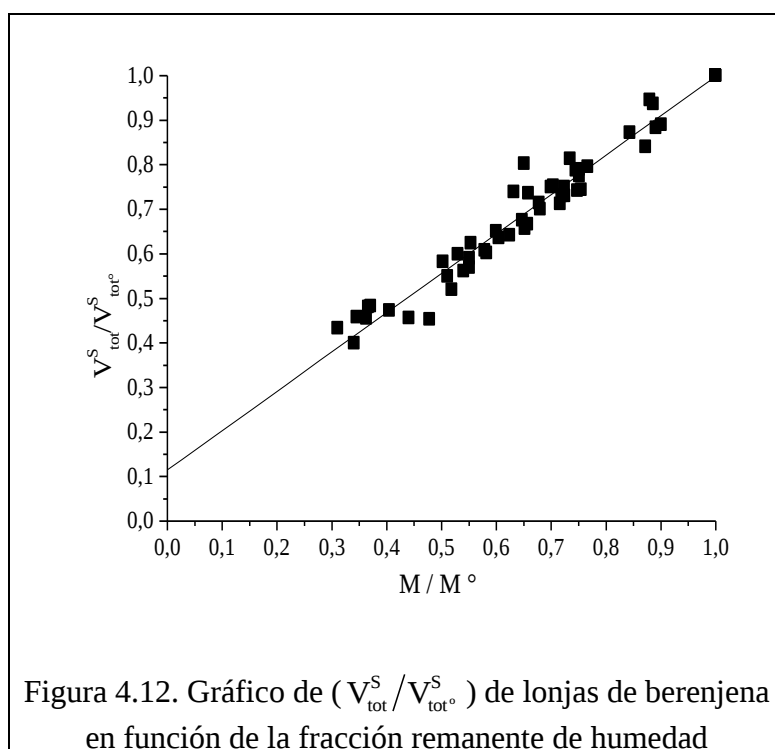


$$E = \frac{100}{N} \times \sum_{i=1}^N \frac{(V_{exp,i} - V_{teo,i})}{V_{exp,i}} \quad (4.6)$$

En la Fig. 4.11 se presenta una gráfica de $(V_{tot}^S / V_{tot}^S_0)_{teo}$ de rodajas de berenjena vs. $(V_{tot}^S / V_{tot}^S_0)_{exp}$. En la misma, se observa la correlación entre los datos experimentales y predichos por aplicación de la ec. (4.5).



En la Fig. 4.12 se presentan la totalidad de datos de la variación del volumen adimensional $(V_{tot}^S / V_{tot^0}^S)$ de lonjas de berenjena en función de la fracción de humedad residual (M/M^0) durante el secado a todas las temperaturas ensayadas.



Al realizar la regresión lineal de dichos datos utilizando la ec. (4.5) se obtuvieron los siguientes valores de los coeficientes: $A=0.114$, $B=0.884$ ($R^2=0.978$) y un error de 3.06 ± 0.08 %. El error fue calculado como lo indicado en la ec. (4.6). El valor de B obtenido es superior al obtenido para muestras tipo rodajas, indicando esto que las muestras tipo lonjas se contraen mas que las rodajas.

Una funcionalidad de este tipo (ec. 4.5) implica considerar que las paredes del material se contraen elásticamente ocupando espacios abandonados por el agua. Esta hipótesis ha sido verificada para otros alimentos (Chirife, 1969; Salas & Labuza, 1968; Vaccarezza, 1974; Dissa y col. (2008). De todas maneras, no todos los vegetales se encogen en la misma medida en todas las direcciones, muchas veces ocurren deformaciones que generan concavidades y arrugas en la superficie del alimento. (Pabis & Jaros, 2002). Sgroppo y col. (1990) encontraron que la reducción del volumen de chips de mandioca en diferentes condiciones era función únicamente del contenido de humedad residual, presentándose entre éstas magnitudes una relación de tipo lineal. Simal y colaboradores (1998) encontraron que durante el secado de tallos de brócoli, estos se contraían y que el cambio de volumen aparente presentaba una relación lineal con el contenido de humedad. Karathanos y col. (1992) encontraron el mismo tipo de relación durante el secado de apio, al igual que Sjöholm & Gemas (1995) durante el secado de manzanas a 60°C. Dissa y col. (2008) encontraron que la contracción de rodajas de mango durante el secado a 50°C, 60°C y 70°C no estaba influenciada por la temperatura.

4.3 OBSERVACIONES SOBRE VARIACIONES EN LA MICRO-ESTRUCTURA

Una de las metodologías utilizadas para estudiar el efecto de la deshidratación sobre el tejido vegetal es la microscopia electrónica de barrido (MEB).

En las Fig. 4.13 (a, b y c) se muestran micrografías electrónicas de diferentes zonas de rodajas de berenjenas frescas, observándose la diferente compactación celular de las mismas. Se observa claramente que las paredes celulares están intactas y adheridas unas a otras, así como algunas células dañadas durante la preparación de la muestra siendo un compartimiento celular altamente organizado en formas de tres dimensiones.

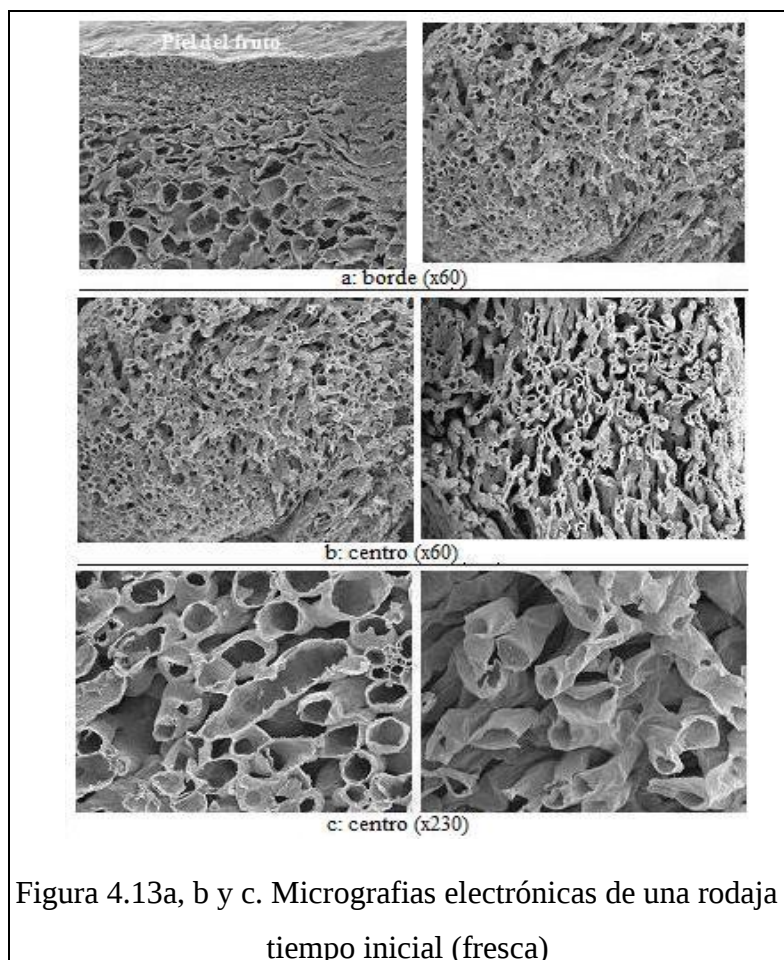


Figura 4.13a, b y c. Micrografías electrónicas de una rodaja a tiempo inicial (fresca)

En las Figs. 4.14, 4.15 y 4.16 se muestran micrografías electrónicas de berenjenas deshidratadas a tiempo final a 50 °C, 70 °C y 90 °C, a las condiciones detalladas en el ítem 2.2 del Capítulo 2. En las mismas se observa el colapso de la microestructura del fruto debido al proceso de deshidratación, igual a lo observado para manzanas por Bai y col (2002). Mientras transcurre el secado, los tejidos se rompen formando una estructura más abierta que se agrieta y colapsa sobre si misma. Wang & Brennan (1995) estudiaron mediante la microscopía los cambios estructurales durante el secado de papas a 40 y 70°C y encontraron que el encogimiento o contracción ocurre primero en la superficie y luego se produce gradualmente en el interior, con el incremento del tiempo de secado. A mayores rangos de secado las capas mas superficiales del sólido se vuelven rígidas y el volumen final que alcanzaría es ya fijado al inicio del secado. En el caso de manzanas deshidratadas, no encontraron grietas en la superficie como en el caso de las papas, lo que induce a pensar que la estructura particular de cada material es un factor significativo en cuanto a la contracción que sufre durante el secado.

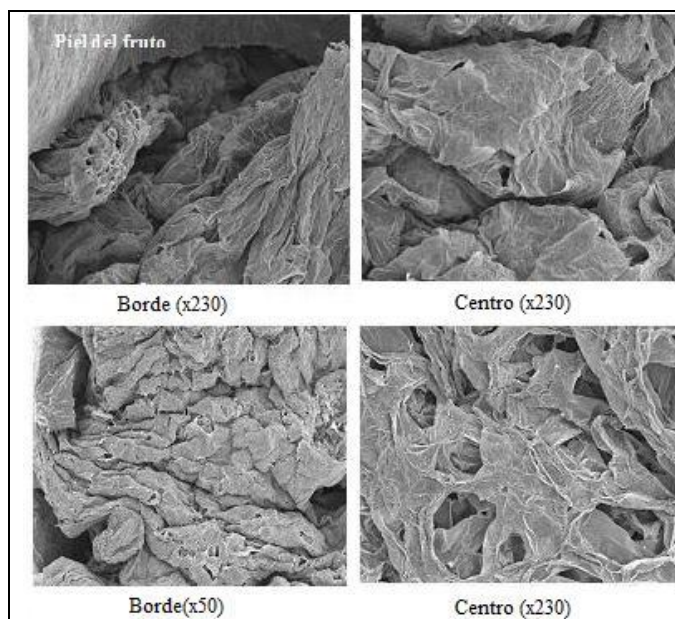


Figura 4.14. Micrografías electrónicas de diferentes zonas de una rodajas secada a 50°C

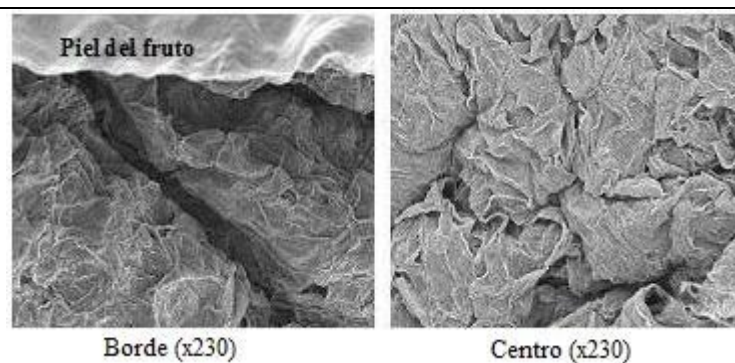


Figura 4.15. Micrografías electrónicas de diferentes zonas de una rodaja secada a 70°C

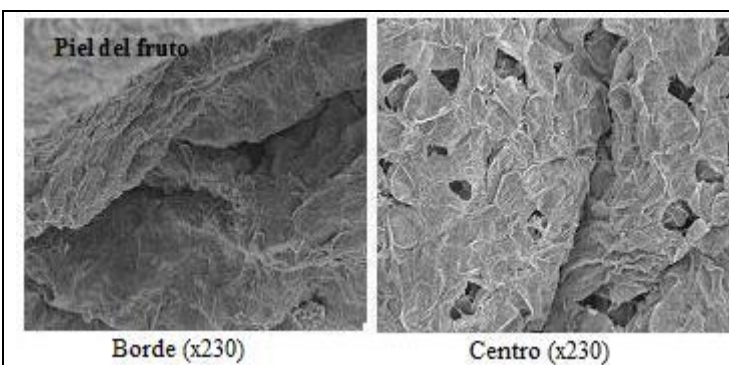
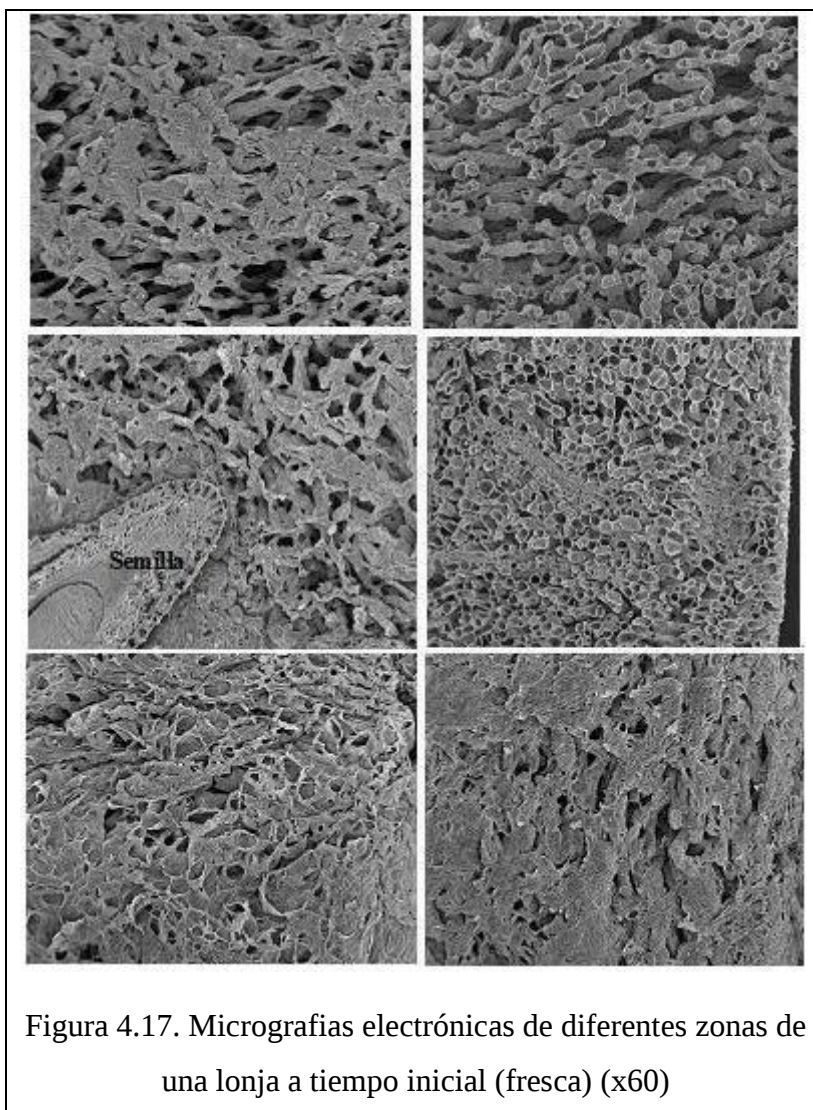
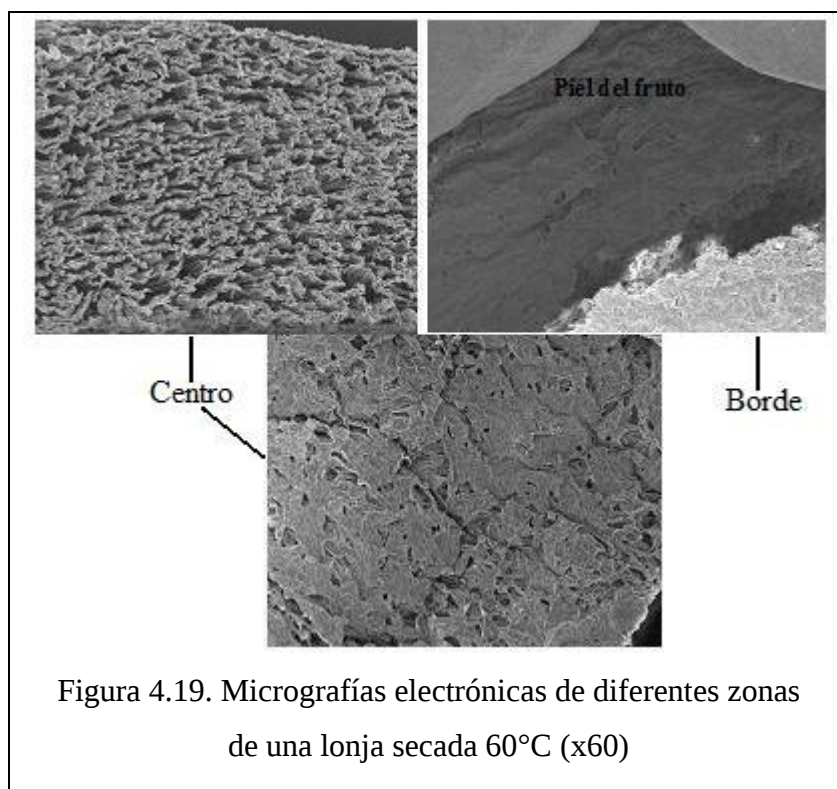
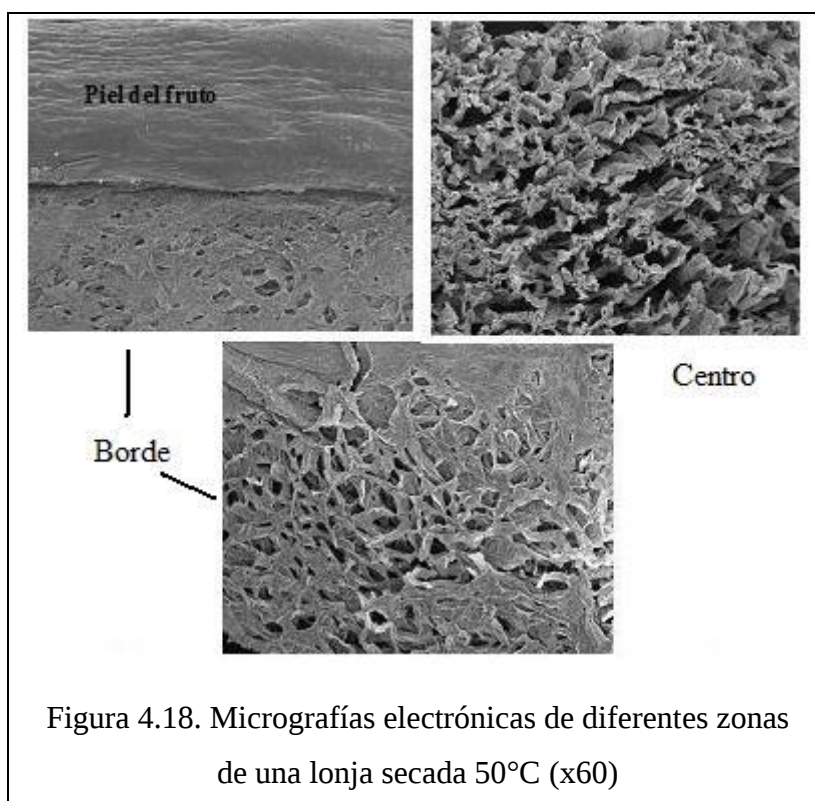


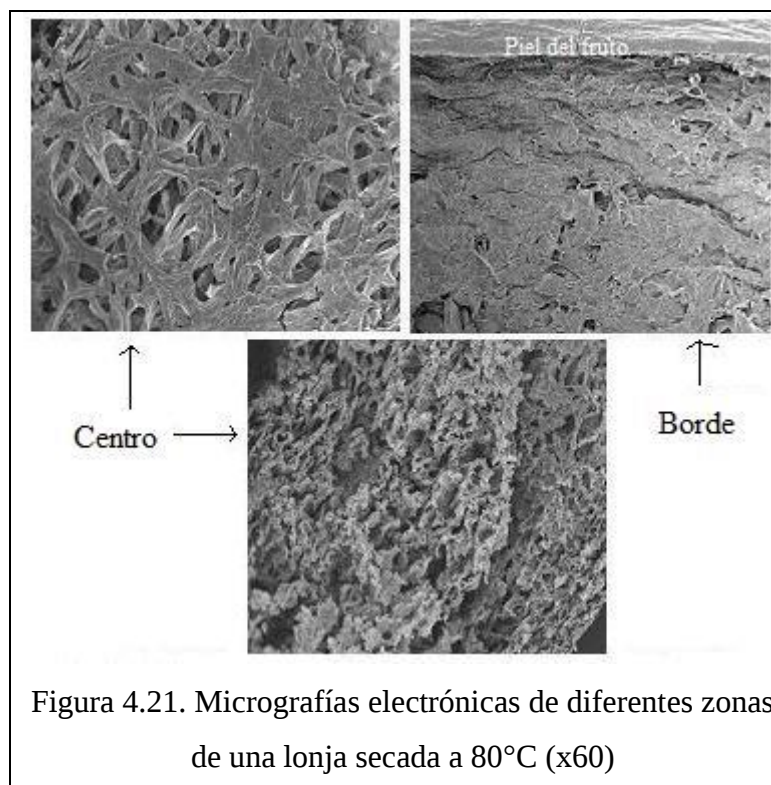
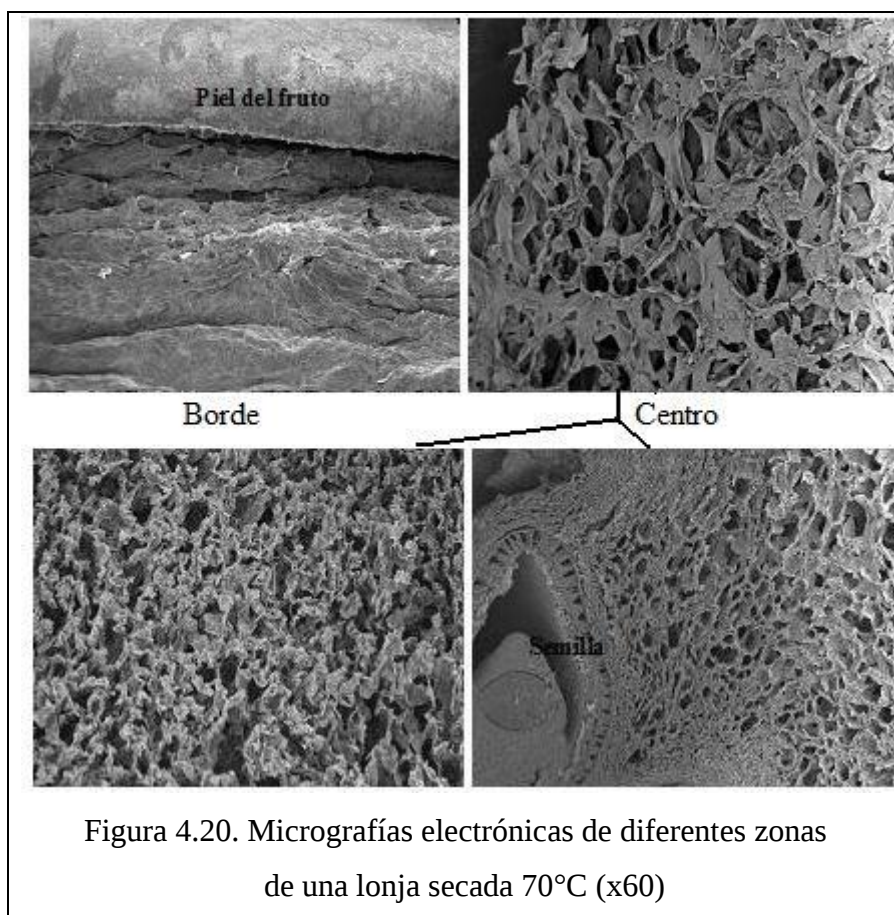
Figura 4.16. Micrografías electrónicas de diferentes zonas de una rodaja secada a 90°C

En la Fig. 4.17 se muestran micrografías electrónicas de diferentes zonas de lonjas de berenjenas frescas, observándose la diferente compactación celular de las mismas.



En las Figs. 4.18, 4.19, 4.20, 4.21 y 4.22, se presentan micrografías correspondientes a lonjas de berenjena secadas a diferentes temperaturas. Se observa claramente el colapso de la estructura celular, producido por la temperatura de secado y la pérdida de agua.





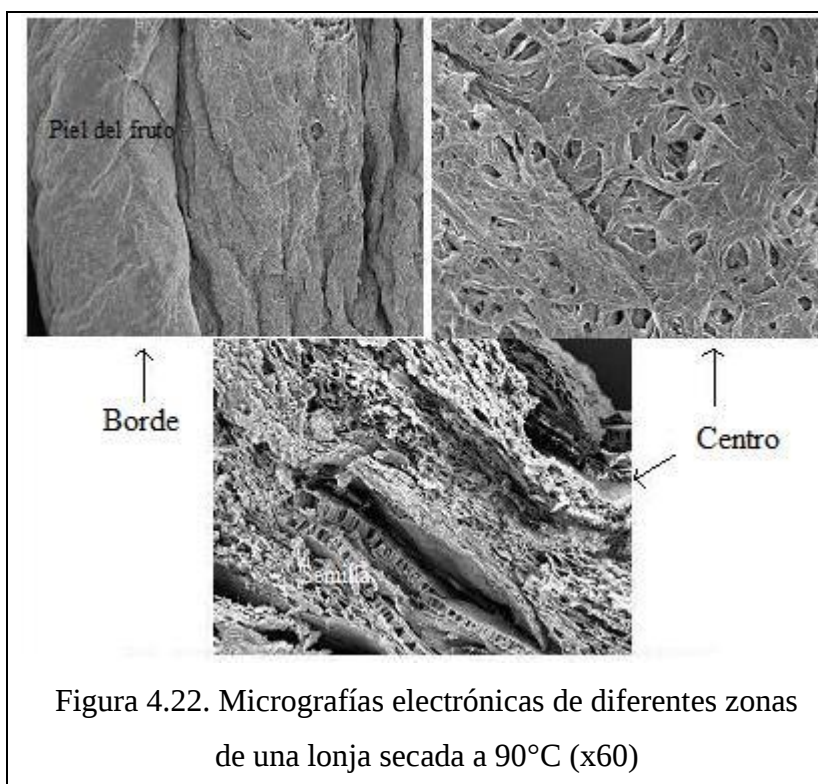


Figura 4.22. Micrografías electrónicas de diferentes zonas de una lonja secada a 90°C (x60)

En la figura siguiente se presentan micrografías electrónicas de muestras de rodajas de berenjena deshidratada por liofilización, se observa que las paredes celulares permanecen prácticamente intactas, a diferencia de los casos anteriormente expuestos.

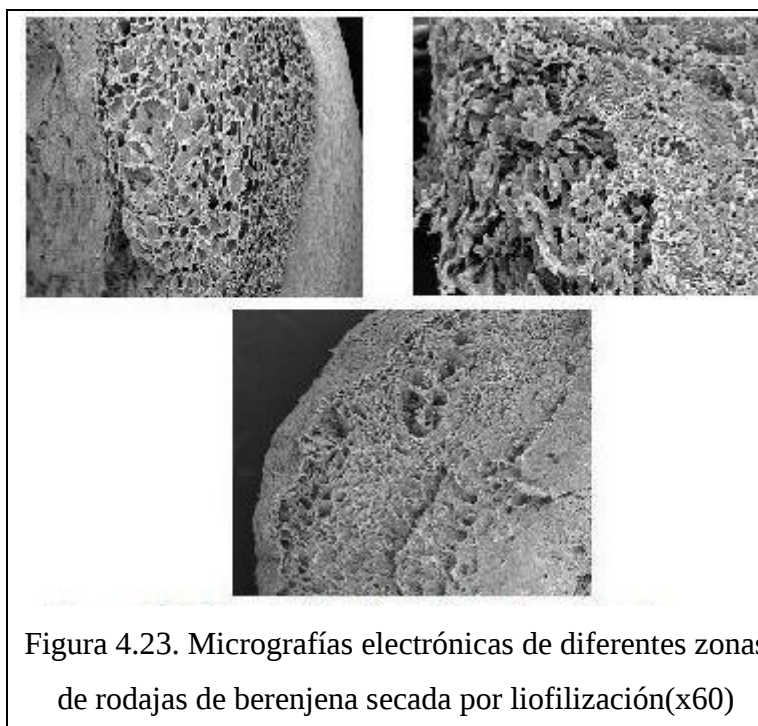


Figura 4.23. Micrografías electrónicas de diferentes zonas de rodajas de berenjena secada por liofilización(x60)

4.4 COMENTARIOS FINALES

La contracción de volumen de rodajas y lonjas de berenjena responde a un modelo lineal, ec. (4.5), respecto de la fracción de humedad remanente. Este modelo lineal es válido hasta el tiempo en el que comienza el alabeado.

Desde el punto de vista práctico, pudo observarse que, luego de deshidratadas, las muestras de berenjena tipo rodaja presentaban una ventaja notable con respecto de las muestras tipo lonja. En efecto, las primeras resultaban más fáciles de preparar, se aprovechaba mucho más el fruto, daban productos menos frágiles y quebradizos, y, por consiguiente, serían mas fáciles de manipular durante los procesos de empaquetado y de almacenamiento.

Tomando en cuenta estas características importantes, que le dan a las muestras deshidratadas tipo rodaja ciertas ventajas, se estimó conveniente que en lo sucesivo sólo se continuaría trabajando experimentalmente con muestras de berenjena tipo rodaja de diámetro inicial $6.637 (1 \pm 0.040)$ cm y espesor inicial $0.684 (1 \pm 0.064)$ cm.

Capítulo 5

RESULTADOS Y DISCUSION

PARTE 3: Cambios químicos durante el secado

5.1. INTRODUCCIÓN

Thompson (1982) clasificó seis diferentes tipos de objetivos perseguidos por los investigadores respecto de la evaluación del impacto del procesamiento sobre el contenido nutricional de los alimentos. Los mismos se enumeran a continuación: 1) Identificar el contenido de uno o mas nutrientes en el alimento procesado; 2) Identificar cambios en el nivel de uno o mas nutrientes durante el proceso; 3) Identificar el mecanismo específico responsable de los cambios nutricionales; 4) Comparar los cambios en los valores nutricionales en base a las condiciones de procesamiento, como ser en presencia de vapor de agua, gas caliente, blanqueo por microondas, etc.; 5) Determinar el modelo o parámetros cinéticos de los cambios nutricionales en un alimento sometido a determinadas condiciones de procesamiento y por último; 6) Desarrollar un modelo matemático (incluyendo la cinética) que tome en cuenta los cambios nutricionales durante un proceso definido para un determinado sistema alimenticio representado como una mezcla.

El estudio de la variación del contenido de nutrientes durante el procesamiento de alimentos constituye una herramienta indispensable para la mejora y optimización de los procesos involucrados, así como del desarrollo de sistemas de control para dichos procesos. Si bien, no es el objetivo del presente Trabajo de Tesis, se consideró importante el aporte de información vinculada, considerando el mismo como un estudio de tipo preliminar.

En primera instancia se realizó el análisis del contenido nutricional del material vegetal fresco y del secado a tiempo final a 90°C, según lo detallado en el ítem 2.4 (ver Capítulo 2), estudiándose además los cambios a lo largo del proceso de secado, en cuanto contenido de azúcares reductores extraíbles, acidez titulable, pH; evaluándose además el pardeamiento durante el secado así como la aplicación de procedimientos sencillos para evitar o disminuir dicho fenómeno, que en este caso resultaba en detrimento de la apariencia del producto.

La diversidad de métodos existentes aplicables a muestras vegetales que luego son sometidas al secado, es bastante amplia; como así también las finalidades que se persiguen con dichos tratamientos, ya sea para incrementar la velocidad de secado, mantener o mejorar la firmeza o apariencia del producto y para combatir efectos indeseables que se presentan durante el procesamiento de los mismos.

Es así que la finalidad buscada con el pretratamiento de rodajas de berenjenas, en esta parte del trabajo de tesis, fue en primera instancia la disminución del pardeamiento superficial de las mismas, preferentemente mediante la utilización de sustancias de bajo costo y alta disponibilidad.

Las muestras vegetales utilizadas corresponden a rodajas con las siguientes dimensiones: diámetro inicial $6.637 (1 \pm 0.040)$ cm y espesor inicial de $0.684 (1 \pm 0.064)$ cm.

5.2. CONTENIDO NUTRICIONAL DEL PRODUCTO FRESCO Y SECO

En la Tabla 5.1 se detalla contenido nutricional del producto fresco y del obtenido luego de secarse a 90°C , a tiempo final. En ella se observa que el fruto de berenjena contiene una elevada cantidad de agua, mientras su porcentaje de hidratos de carbono, proteínas y grasas es muy bajo; carece de fibra, excepto una pequeña cantidad en la piel y las semillas.

Tabla 5.1: Contenido nutricional de berenjenas		
	Fruto fresco	Producto seco a 90°C
	100 x g./ g de fruto fresco	100 x g./ g. sólido seco
Agua	92.60 ± 1.40	11.11 ± 0.08
Cenizas	0.54 ± 0.02	6.49 ± 0.87
Proteínas	0.91 ± 0.03	10.88 ± 1.15
Lípidos	0.09 ± 0.01	1.09 ± 0.06
Fibra	0.95 ± 0.04	11.43 ± 1.75
Hidratos de carbono	4.63 ± 0.30	55.61 ± 1.20

Estos valores se encuentran dentro de los informados por otros autores para pulpa de berenjenas frescas, como por ejemplo Flick, y col. (1978), Belitz y Grosh (1988), Souci-Fachmann-Krant (1987); Kashiap y col. (2003).

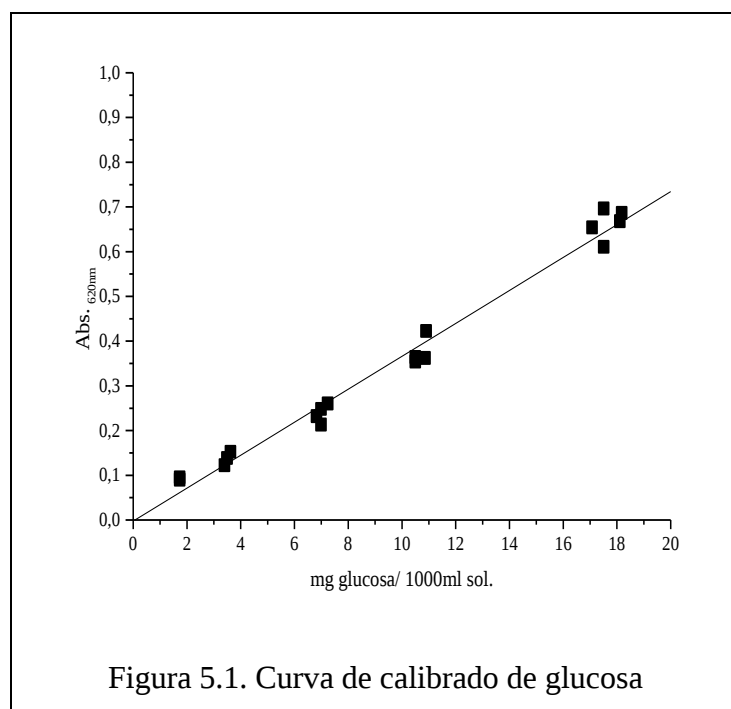
5.3 VARIACIONES DE ALGUNOS COMPONENTES DURANTE EL SECADO

5.3.1 Azúcares reductores extraíbles

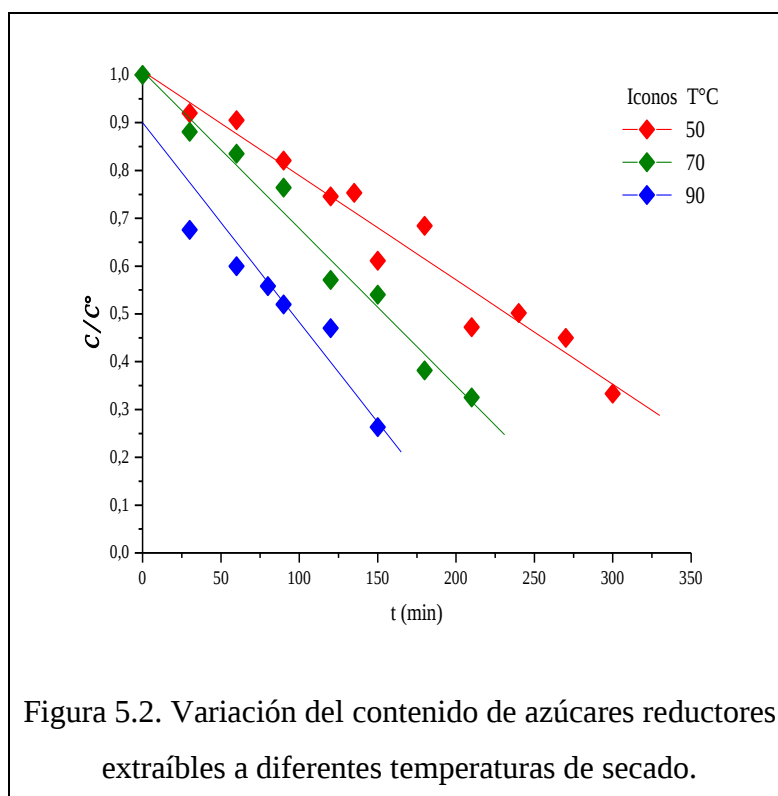
Las muestras fueron preparadas y analizadas según lo detallado en el ítem 2.4 del Capítulo 2, utilizando el método de la Antrona (Southgate, 1976). En la Fig. 5.1 se presenta la curva de calibrado glucosa patrón-Antrona, donde los coeficientes de la misma se obtuvieron regresión lineal de los datos experimentales obteniéndose la siguiente expresión (Origin 5.0):

$$\text{Abs}_{620\text{nm}} = 3.68 \times 10^{-2} \times \frac{\text{mg glucosa}}{1000\text{ml}} - 2.39 \times 10^{-3} \quad (5.1)$$

con: $R^2=0.984$



En la Fig. 5.2 se presentan las curvas de degradación del contenido de glucosa durante el secado de rodajas de berenjena a 50°C, 70°C y 90°C, expresado como la fracción de contenido de glucosa remanente respecto del contenido inicial, C/C° , en función del tiempo de secado (minutos).



La variación de C/C° presenta una relación de tipo lineal con el tiempo de secado, obteniéndose, por regresión lineal de los datos experimentales utilizando la ec. (5.2), las estimas de los coeficientes A y B (ver Tabla 5.2).

$$\frac{C}{C^\circ} = A + B t \quad (5.2)$$

Tabla 5.2: Estimas de los coeficientes A y B correspondientes a la variación, C/C° , en función del tiempo.

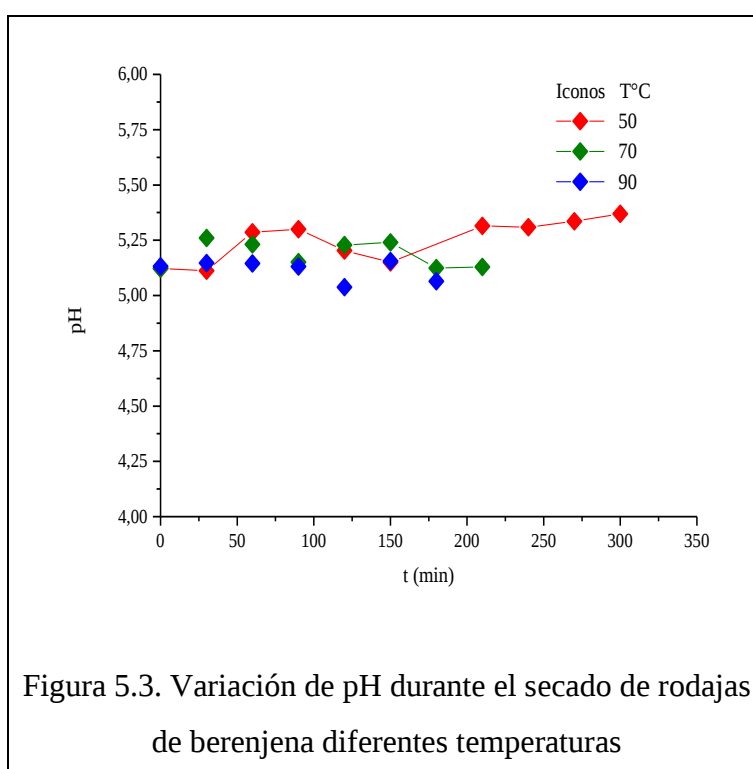
T (°C)	A	$B \cdot 10^3$	R^2
50	1.008	-2.18	0.96
70	1.008	-3.29	0.98
90	0.900	-4.18	0.91

La velocidad de disminución del contenido de azúcares reductores extraíbles se incrementa con el aumento de la temperatura de secado, siendo el porcentaje total de disminución es superior al 60% en todos los casos.

5.3.2 Estudios de pH

Para ello se procedió según lo detallado en el Capítulo 2, midiendo el pH del extracto acuoso obtenido a partir de rodajas de berenjena secadas a cada tiempo y temperatura.

La variación del pH de rodajas de berenjena durante el secado a 50°C, 70°C y 90°C no presentó un comportamiento definido a lo largo del mismo, como puede observarse en la Fig. 5.3, sin embargo el pH a tiempo final de secado a 70°C y 90°C fue menor al alcanzado por las rodajas secadas a 50°C.

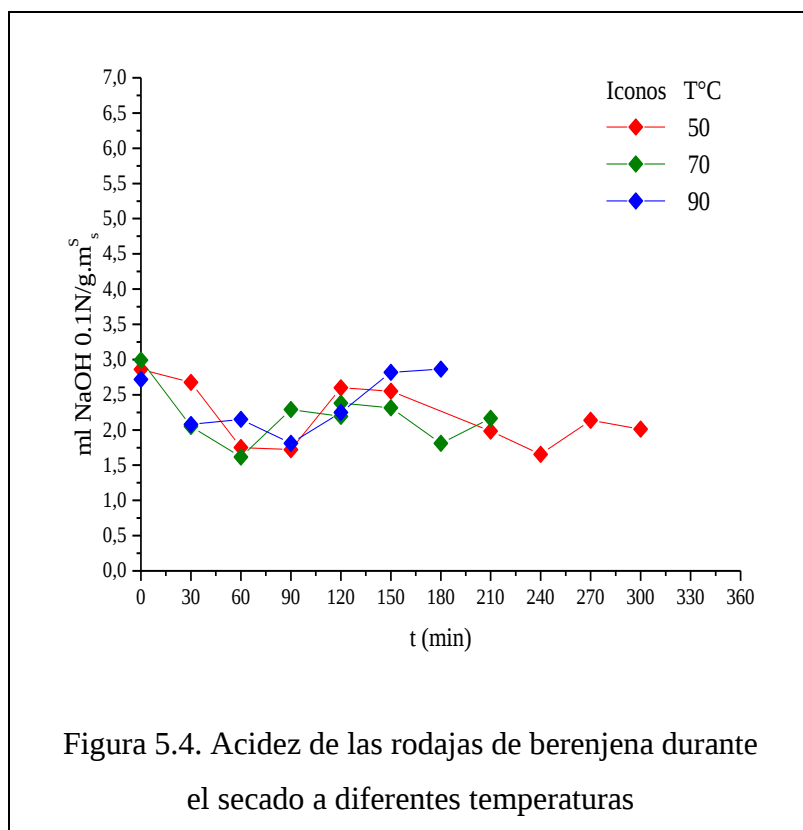


5.3.3 Acidez titulable

En la Fig. 5.4 se presentan los resultados obtenidos de la variación de la acidez titulable (expresados como ml NaOH 0.1 N/g. m_s^s) de rodajas de berenjena durante el secado a 50°C, 70°C y 90°C. En la misma, se observa una disminución de la acidez hasta los primeros 90 minutos de secado a las tres temperaturas ensayadas, luego de lo cual ésta comienza a aumentar siendo mayor la acidez alcanzada por las rodajas secadas a 90°C que a 70°C y 50°C.

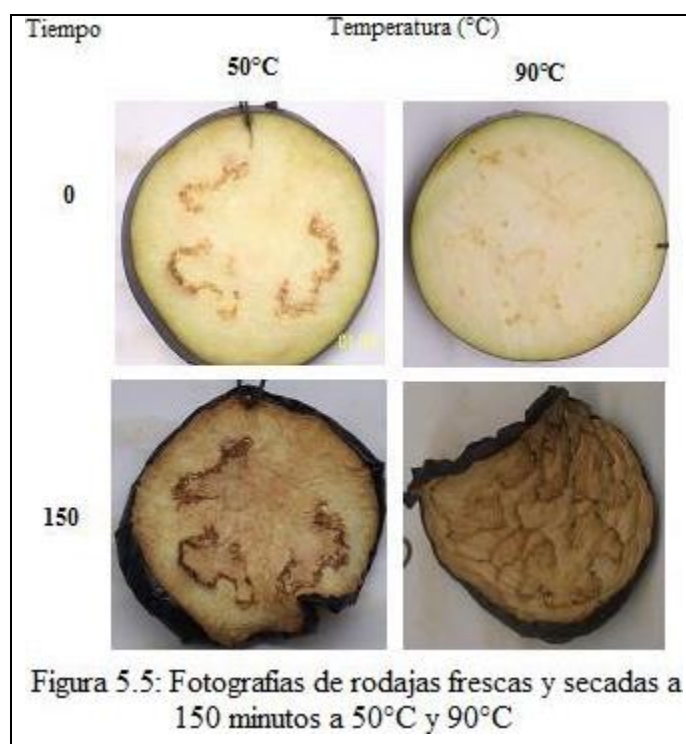
El comportamiento no uniforme de los resultados que se muestra en la Fig. 5.4, probablemente se deba al hecho de que cada punto corresponda muestras diferentes, si bien

se trabajó con un homogeneizado de muestras, preparadas a partir de diferentes frutos y procesadas en las mismas condiciones (ver Capítulo 2).

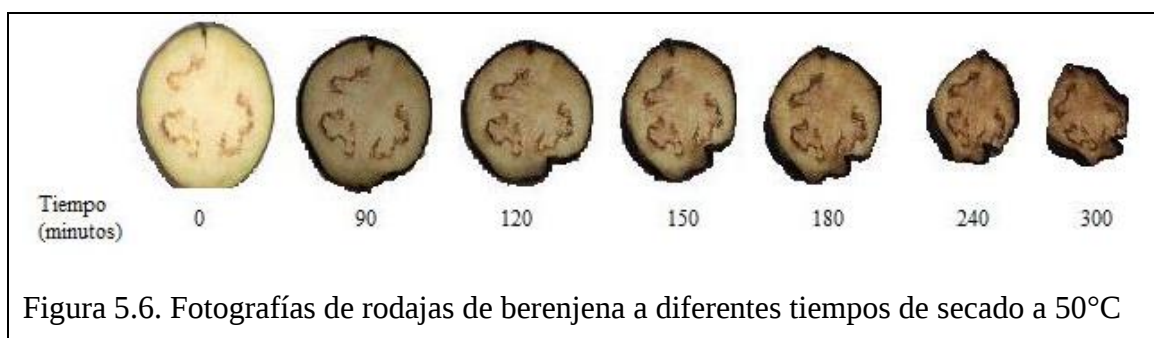


5.4 PARDEAMIENTO

En la fotografías de la Fig. 5.5 se presentan fotografías de rodajas de berenjena durante el secado a 50°C y 90°C. Puede observarse el pardeamiento progresivo de las mismas, presentándose con mayor intensidad en la zona de las semillas; por otra parte es evidente la deformación de las muestras vegetales (ver Capítulo 4). Ambos factores deben ser considerados, sobretodo en cuanto a la medida superficial de color, ya que las muestras no son totalmente planas.



En la Fig. 5.6, puede observarse la apariencia de las rodajas de berenjena a lo largo del secado a 50°C.

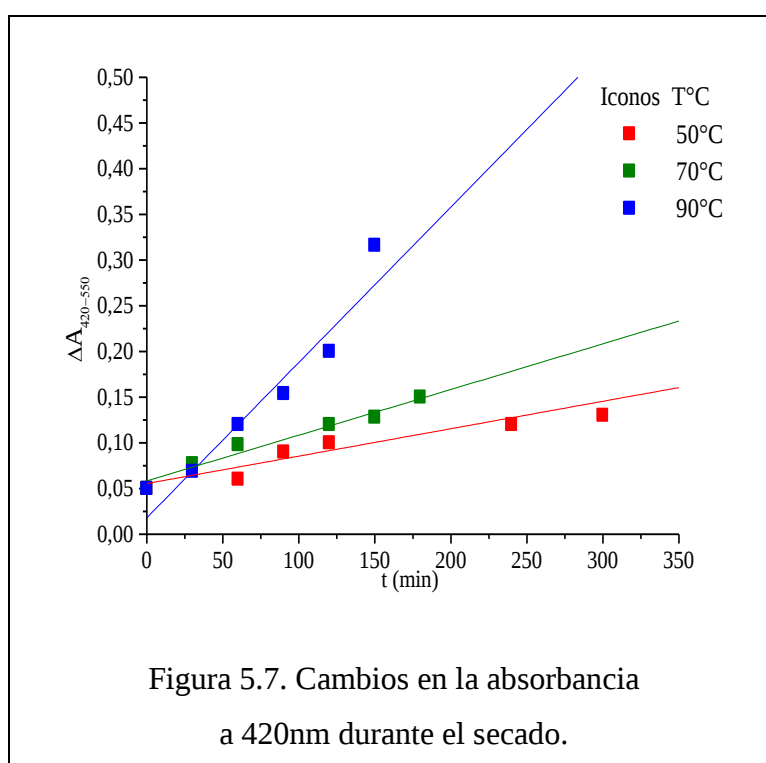


Durante el secado de las muestras vegetales se observó el pardeamiento de las mismas. Para cuantificarlo se eligieron dos metodologías como ser el espectrofotométrico y el colorimétrico. (ver Capítulo 2)

Para el primero, se determinó el contenido de pigmentos producidos durante el secado mediante la metodología detallada en el ítem 2.4.e, del Capítulo 2. En el segundo caso se presentaba el inconveniente de no disponer de un colorímetro en la ciudad de Corrientes, ni en zonas aledañas por lo que se buscó un procedimiento que permitiera,

dentro de un cierto margen de error, el traslado de las muestras para luego realizar las mediciones respectivas en la ciudad de La Plata, donde sí se disponía de dicho equipo. En ambos casos, el acondicionamiento de las muestras fue el mismo,

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la evaluación del grado de pardeamiento de las rodajas mediante medidas espectrofotométricas. El pardeamiento fue expresado como la diferencia de absorbancia a 420 nm y 550 nm ($\Delta A_{420-550}$) en función del tiempo de secado. Los ensayos fueron realizados a 50°C, 70°C y 90°C, presentándose los resultados en la Fig. 5.7.



A todas las temperaturas ensayadas se observa un incremento lineal de $\Delta A_{420-550}$ con el tiempo de secado, presentándose en la Tabla 5.3 las estimas de las constantes obtenidas por regresión lineal de los datos experimentales, en base a la siguiente ecuación:

$$\Delta A_{420-550} = \Delta A_{420-550}^{\circ} + k t \quad (5.7)$$

donde : k, es un coeficiente cinético.

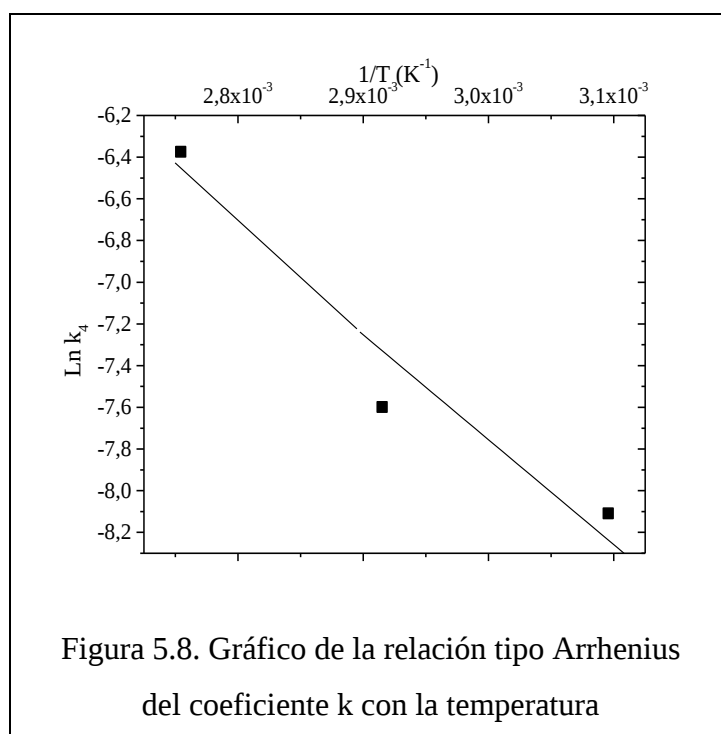
Tabla 5.3: Estimaciones de los coeficientes

$\Delta A_{420-550}^{\circ}$ y k			
T (°C)	$\Delta A_{420-550}^{\circ}$	k x 10 ⁴	R ²
50	0.0555	3	0.91
70	0.0584	5	0.97
90	0.0180	17	0.93

En la Fig. 5.8 se presenta una gráfica del coeficiente k con la temperatura, mediante una relación tipo Arrhenius dada por la ec. (5.8):

$$k = A^{\circ} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (5.8)$$

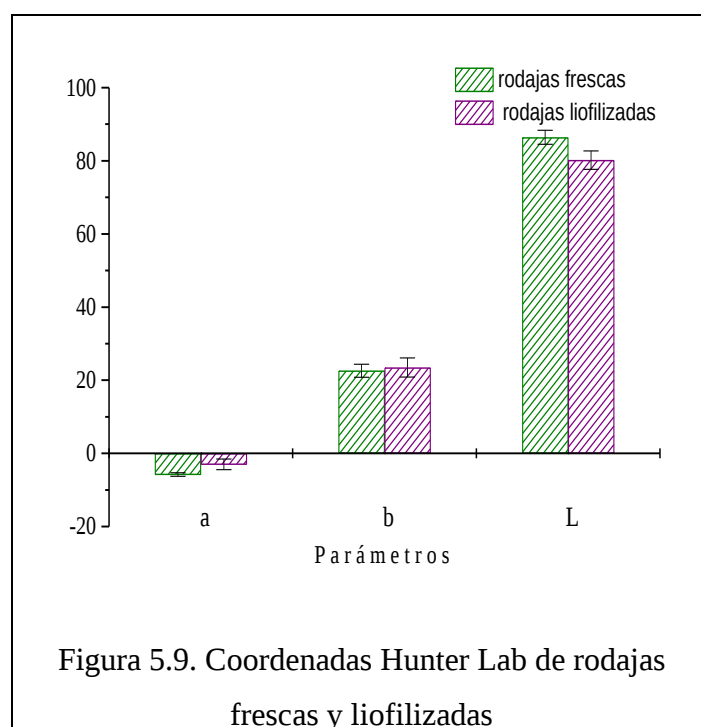
La energía de activación estimada fue: $E_a = 41.89 \text{ KJ/mol K}$ ($R^2=0.968$)



En cuanto a las medidas de color superficial, se compararon valores de color superficial de rodajas de berenjenas frescas y secadas por liofilización, de manera de cuantificar el efecto de la liofilización sobre el producto en cuanto a los parámetros de color superficial. Es así que se diseñó lo detallado en el ítem 2.4.d del Capítulo 2.

En la Fig. 5.9 se presentan los valores promedio de los parámetros Hunter Lab obtenidos de las mediciones realizadas en la pulpa de siete rodajas de berenjena fresca o recién cortada y de las realizadas sobre rodajas secadas por liofilización.

Las estimas de “L”, “a” y “b” de la pulpa de berenjenas frescas se encuentran dentro del orden que las dadas por otros autores. (Maestrelli y col., 2003; Concellón y col., 2004; Ertekin y Yaldiz, 2004; Long Wu y col., 2009).



Además, puede observarse en la Fig. 5.9, que la luminosidad, L, de las rodajas liofilizadas es menor que la de las rodajas frescas en un valor cercano al 7% y el parámetro “a” presenta diferencias significativas entre las rodajas liofilizadas y las frescas recién cortadas (test LSD Fisher: $p < 0.05$). En este último caso es conveniente tener en cuenta que este parámetro estaría vinculado al estado madurativo del fruto, ya que un valor más negativo indica un fruto menos maduro, es decir más verde. El parámetro “b” no presenta diferencias significativas entre las muestras de berenjenas frescas y liofilizadas ($p > 0.05$).

En la Tabla 5.4 se presentan los valores medios de H^* , BI y C^* calculados para rodajas frescas y rodajas secadas por liofilización, mediante las ecuaciones dadas previamente en el Capítulo 2: ecs. (2.1), (2.2), (2.3), (2.5) y (2.6).

Tabla 5.4: Valores promedio de H*, BI y C*			
	H*	BI	C*
Pulpa de rodajas frescas	$103^{\circ}31' \pm 1^{\circ}45a$	$23.89 \pm 3.07a$	$23.47 \pm 1.67a$
Pulpa de rodajas liofilizadas	$93^{\circ}31' \pm 2^{\circ}56b$	$29.13 \pm 4.03b$	$23.97 \pm 1.60a$

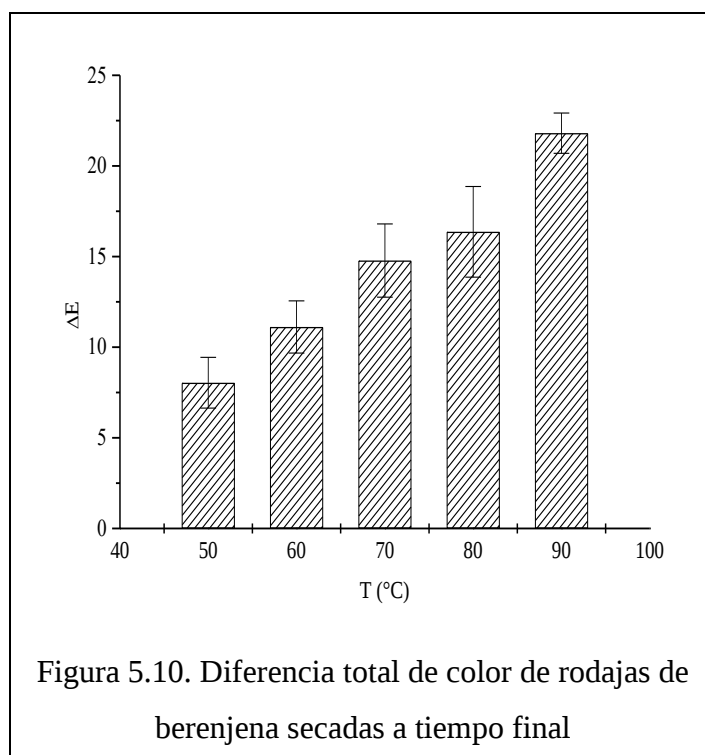
* letras distintas indican diferencias significativas (Test LSD de Fisher $p \leq 0.05$).

Los valores de H* y BI, de rodajas frescas y liofilizadas presentaron diferencias significativas entre si. Estos valores sugieren una evolución del color superficial hacia el amarillo, cuando las rodajas son secadas por liofilización. Este comportamiento es esperable, dado el proceso al cual son sometidas las rodajas.

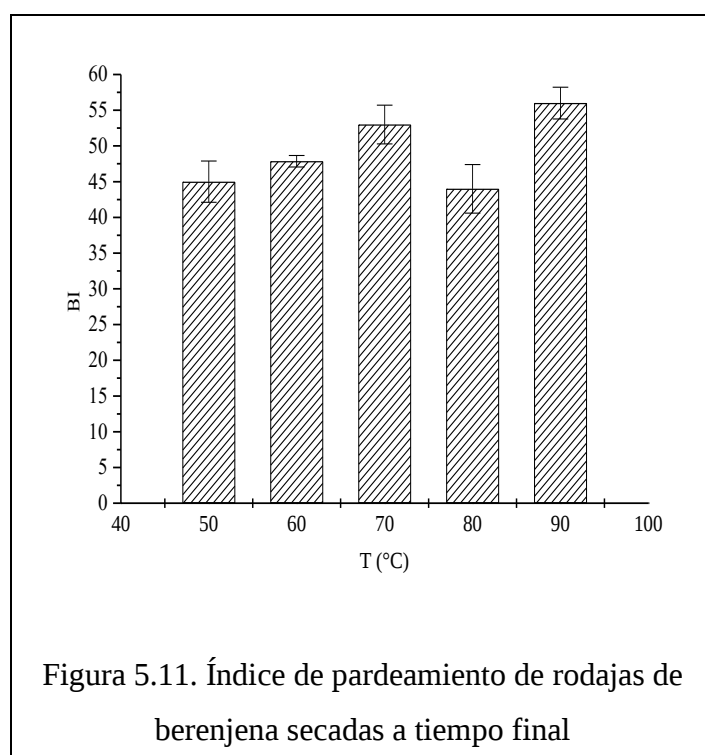
El valor del índice de pardeamiento, BI, de las rodajas liofilizadas es superior al obtenido para rodajas frescas. Esto puede deberse a que las rodajas son congeladas antes de ser liofilizadas y el congelamiento no es inmediato. Estos resultados no se condicen con lo encontrado por Concellón y col. (2004), debido a que estos últimos realizaban el almacenamiento refrigerado del fruto entero, para luego a tiempos determinados, realizar lecturas de color de la pulpa del fruto, utilizando de un corte tipo rodaja de 0.5 cm de espesor. La diferencia total de color, ΔE , para las rodajas liofilizadas calculado mediante la ec. (2.4) presenta un valor de 5.87 ± 0.70 , tomando como referencia los valores de Lab de rodajas frescas recién cortadas.

Los resultados obtenidos hasta el momento, indican que las rodajas liofilizadas presentan un cambio de color debido al procesamiento al que son sometidas.

En la Fig. 5.10, se presentan los resultados de la diferencia total de color, ΔE , (calculados a partir de la ec. 2.4), de rodajas de berenjena secadas a tiempo final a las temperaturas de 50°C, 60°C, 70°C, 80°C y 90°C. En este caso los valores tomados como referencia fueron los obtenidos para rodajas secadas por liofilización, de manera de poder distinguir el efecto de la temperatura de secado sobre el color superficial. Se observa en las misma que el valor de ΔE se incrementa con la temperatura.



En la Fig. 5.11, se presentan los resultados del índice de pardeamiento, BI, (calculados a partir de la ec. 2.5), de rodajas de berenjena secadas a tiempo final a las temperaturas de 50°C, 60°C, 70°C, 80°C y 90°C. Se observa un incremento del mismo a medida que aumenta la temperatura de secado, salvo el valor obtenido a 80°C.



5.4.1 Estudios de antipardeamiento

Primeramente, se realizaron pruebas exploratorias de escaldado de rodajas previo al secado (tal como se indica en el ítem 2.4.g del Capítulo 2), con resultados poco satisfactorios, obteniéndose un producto para secar con una textura difícil de manejar, y una rodaja deshidratada muy quebradiza y poco atractiva. Luego se ensayaron diferentes concentraciones de antipardeantes (cloruro de sodio, cloruro de calcio, ácido láctico, ácido cítrico y metabisulfito de sodio) y variados tiempos de inmersión, teniendo en cuenta la bibliografía consultada, encontrando que la concentración de 0.5 % p/v y tiempo de inmersión de 3 minutos podría ser el adecuado en una primera instancia, para inhibir el pardeamiento.

Para evaluar la efectividad de los distintos agentes antipardeantes ensayados, se eligió el índice de pardeamiento, BI, teniendo en cuenta que representa la pureza del color marrón, y ha sido reportado como un importante parámetro en procesos donde el pardeamiento enzimático y no enzimático tiene lugar. (Ver, por ejemplo; Buera y col., 1986; Palou y col., 1999; Guerrero y col., 1996; y Castañón y col., 1999). En esta instancia resulta conveniente su uso, ya que detecta el efecto de los tratamientos antipardeantes ensayados sobre el pardeamiento.

En la Fig. 5.12 se presentan los valores de BI (índice de pardeamiento) de rodajas pretratadas con distintos agentes, secadas a tiempo final a 50°C, 60°C, 70°C y 90°C.

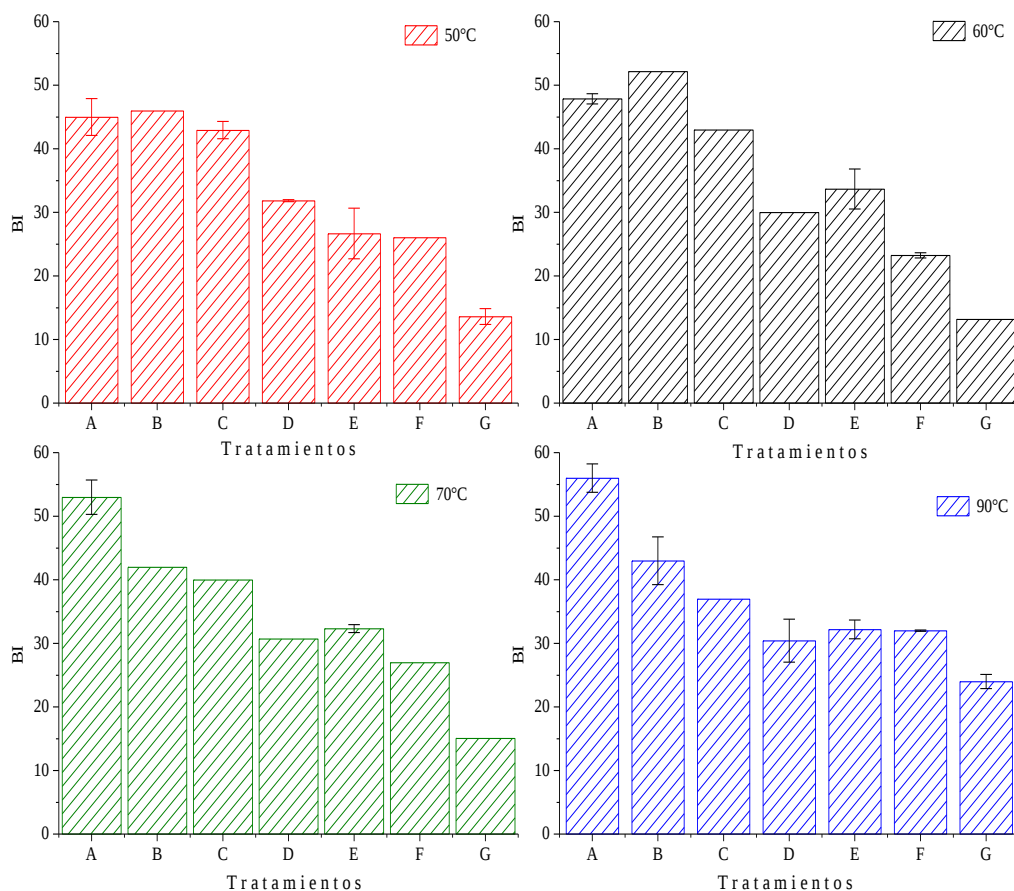


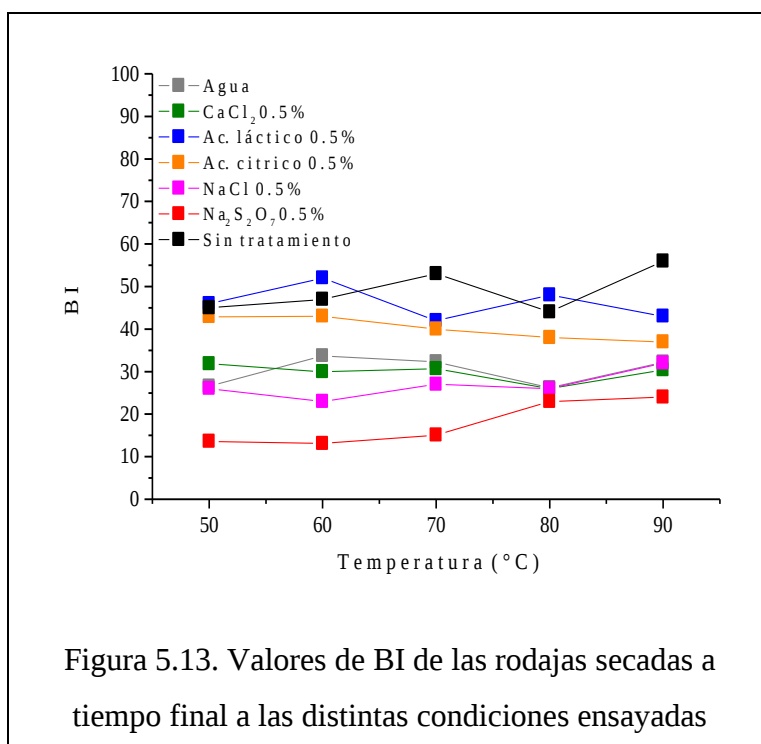
Figura 5.12. Valores de BI de rodajas secadas a tiempo final. (A= sin tratamiento; B = ácido láctico; C= ácido cítrico; D= CaCl_2 ; E=agua destilada; F= NaCl ; y G= metabisulfito de sodio)

En general las muestras pretratadas con ácido láctico (B) y ácido cítrico (C) presentan valores de BI similares al obtenido para rodajas sin tratamiento (A), secadas a 50°C y 60°C. Sin embargo presenta un efecto antipardeante en rodajas secadas a 70°C y 90°C.

Valores de BI cercanos entre si fueron obtenidos para aquellas muestras tratadas con agua destilada (E), cloruro de calcio (D) y cloruro de sodio (F) mostrando un efecto antipardeante positivo, ya que disminuye el pardeamiento en aproximadamente un 33 a 40% respecto de la rodaja secada sin tratamiento.

Las muestras tratadas con metabisulfito de sodio (G) presentaron los valores de BI mas bajos a las cuatro temperaturas ensayadas, presentando una efectividad muy marcada en comparación a los otros agentes antipardeantes utilizados, con un porcentaje de disminución del pardeamiento del orden de 70-75% a 50°C, 60°C y 70°C. A 90°C el porcentaje de disminución fue de aproximadamente del 60%.

En la Fig. 5.13 se presentan los valores del índice de pardeamiento (BI) obtenidos al final del proceso de secado para cada agente ensayado. Se observa que el Indice de pardeamiento (BI) obtenido para cada pretratamiento no es afectado sistemáticamente por la temperatura de secado.



Del análisis anterior surge claramente que el tratamiento por inmersión de las muestras en soluciones de metabisulfito de sodio 0.5% p/v durante tres minutos es el más efectivo para disminuir el pardeamiento de berenjenas durante el secado. Este último disminuye el pardeamiento entre 60-75 % a todas las temperaturas ensayadas respecto de la muestra sin pretratamiento. La concentración de la solución de metabisulfito de sodio empleado es inferior a la recomendada por Mousa y col., (2004) para rodajas de berenjena secadas a 58°C. Resultados similares obtuvieron Akanbi y col. (2006) para tomates enteros

y en rodajas, quienes observaron una buena retención de color de las muestras tratadas con soluciones de metabisulfito.

En la Fig. 5.14 se presentan los datos experimentales obtenidos durante el secado de rodajas de berenjena de espesor inicial $e^0=0.684$ (1 ± 0.064) cm secadas a 60°C, 70°C, 80°C y 90°C. Los mismos corresponden a rodajas tratadas y no tratadas por inmersión en soluciones de metabsulfito de sodio 0.5% p/v durante 3 minutos, previo al secado de las mismas. A 60°C y 70°C, se observa que el pretratamiento disminuye la velocidad de secado, mientras que a 80°C y 90°C no hay diferencias significativas entre las rodajas.

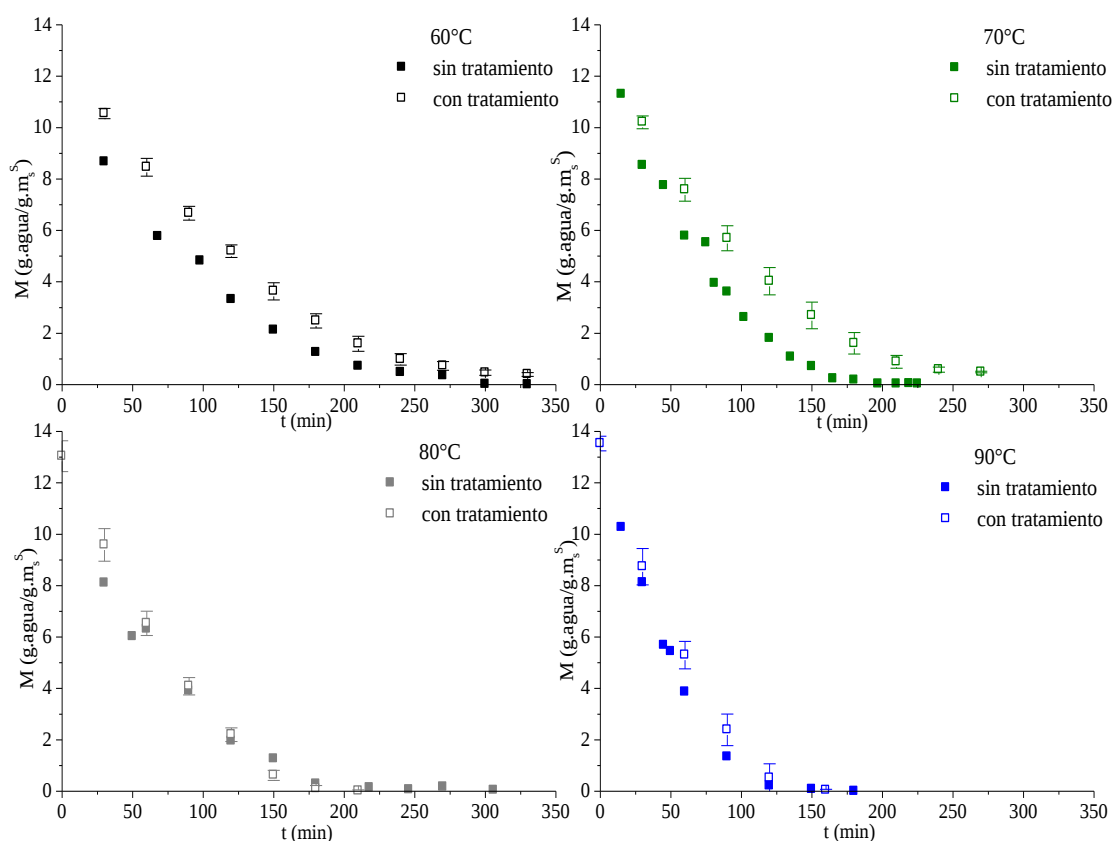


Figura 5.14: Variación del contenido de humedad de rodajas de berenjena durante el secado a 60°C, 70°C, 80°C y 90°C.

Capítulo 6

RESULTADOS Y DISCUSION

PARTE 4: Rehidratación

6.1. INTRODUCCIÓN

El grado de rehidratación, generalmente, es considerado como una medida del daño que ha experimentado la muestra durante el proceso de secado, y los tratamientos que le preceden. La rehidratación de tejidos vegetales deshidratados se realiza mediante tres procesos simultáneos: la imbibición de agua en el material seco, hinchamiento y lixiviación de los solubles (Lewicki, 1998a y b; McMinn y Magee, 1997a, b; San Juan y col., 1999). Además, el nivel de rehidratación que alcanzará un determinado producto deshidratado será una consecuencia directa del grado de encogimiento que éste presente, siendo que no alcanzará el contenido inicial de agua debido al colapso que experimenta su estructura original. (Mayor y Sereno, 2004).

Las condiciones, en las cuales se desarrolla el proceso de secado juegan un rol muy activo en la determinación de las propiedades texturales de los frutos deshidratados. Un secado lento, logrado por el uso de temperaturas y velocidades de aire de secado bajas, junto con valores de humedad relativa alta, conduce a productos densos y uniformes con una reducida capacidad de rehidratación (Karathanos, Kanellopoulos, y Belessiotis, 1996). Por otro lado un secado rápido resulta en productos menos densos pero de mayor dureza, con grietas en la superficie y un mayor grado de rehidratación y por lo tanto con una textura más suave. (Ramos y col., 2004).

Es importante destacar que no hay un acuerdo específico respecto del procedimiento ni de los cálculos de los índices para evaluar el grado de rehidratación de alimentos deshidratados. (Krokida y Philippopoulos, 2005).

El grado de rehidratación a las distintas temperaturas ensayadas puede expresarse utilizando diferentes coeficientes (ver por ej. Lewicki, 1998b), entre los que encontramos la capacidad de sorción de agua (RR), ec.(6.1), cuyo valor indica la cantidad de peso ganado durante el proceso. El mismo, ha sido utilizado por otros investigadores para evaluar la ganancia de peso de la muestra durante la rehidratación (ver por ej.: Prabhanajan y col., 1995; McMinn y Magee, 1997; Krokida & Marinos-Kouris, 2003b; Cunningham y col., 2008)

$$RR = \frac{m_{rh}}{m_{rh}^o} \quad (6.1)$$

Donde: RR, es el grado de rehidratación; m_{rh} , masa de la muestra rehidratada; m_{rh}^0 , masa del producto seco antes de rehidratar.

La capacidad máxima de rehidratación (RR_{max}), se alcanza cuando la muestra llega al equilibrio (es decir para: $t \rightarrow \infty$)

Por otra parte, el porcentaje de recuperación de agua con respecto al producto fresco, puede calcularse de la siguiente manera:

$$COR = 100 \frac{m_{rh}^{\infty}}{m_{tot}^S} \quad (6.2)$$

donde: COR, es el porcentaje de recuperación de agua con respecto al producto fresco; m_{rh}^{∞} , es la masa de la rodaja rehidratada a tiempo final; m_{tot}^S , es la masa total inicial de la muestra vegetal húmeda

El coeficiente COR ha sido utilizado por McMinn y Magee (1997), Lewicki (1998) para estudiar el grado de rehidratación de papas deshidratadas y manzanas, raíces de perejil, respectivamente.

La capacidad de retención de materia seca (CRS) refleja la habilidad de la muestra para retener el material soluble durante la rehidratación, además del daño sufrido por el tejido y su permeabilidad a los solutos, y se define como:

$$CRS = \frac{m_{sreh}}{m_s^S} \quad (6.3)$$

donde: CRS, es el coeficiente de retención de materia seca; m_{sreh} , es la masa de sólido seco del material rehidratado; m_s^S , es la masa de sólido seco de la muestra vegetal

El coeficiente CRR ha sido utilizado por Maldonado y col. (2007) para estudiar la rehidratación de láminas de mango deshidratado a 60°C.

Dado que el producto deshidratado debe ser reconstituido para su consumo, se estimó conveniente estudiar el proceso de rehidratación de las rodajas de berenjena deshidratadas a diferentes temperaturas, según lo descrito en el ítem 2.5 del Capítulo 2.

A continuación se presentan y analizan los resultados promedio del grado de rehidratación alcanzado por rodajas de berenjena a dos temperaturas de rehidratación: 25 y 100°C. La primera, es de uso frecuente en el tratamiento de productos deshidratados; y la segunda, es la temperatura habitual de cocción de preparados alimenticios. Se utilizaron

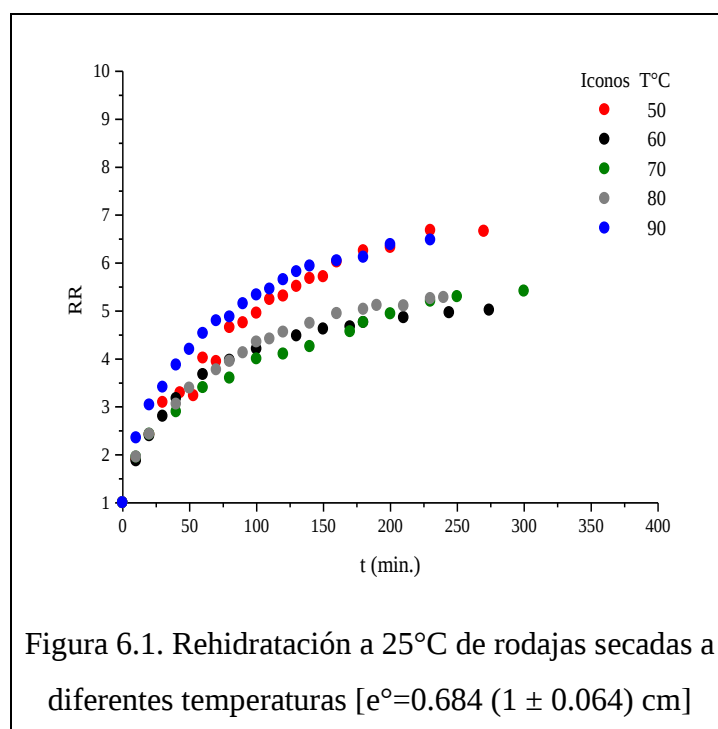
rodajas sin tratamiento previo al secado y tratadas por inmersión en una solución de metabisulfito de sodio 0.5% p/v durante tres minutos, ya que este procedimiento resultó ser el más adecuado para disminuir el pardeamiento de las mismas durante el secado.(ver Capítulo 5)

Los resultados obtenidos fueron agrupados nuevamente (al igual que en los Capítulos anteriores) en base al espesor inicial, e° , que presentaban las rodajas previo al secado: 1) rodajas de espesor 0.684 (1 ± 0.064) cm; 2) rodajas de espesor 1.275 (1 ± 0.094) cm. El diámetro de las rodajas es $D^{\circ}=6.637$ (1 ± 0.04) cm.

6.2. REHIDRATACIÓN DE RODAJAS NO TRATADAS

6.2.1 Influencia de la temperatura de secado

En las Figs. 6.1 y 6.2 se presentan los resultados obtenidos del grado de rehidratación (RR) a 25°C en función del tiempo, de rodajas de berenjena deshidratadas a 50°C, 60°C, 70°C, 80°C y 90°C.



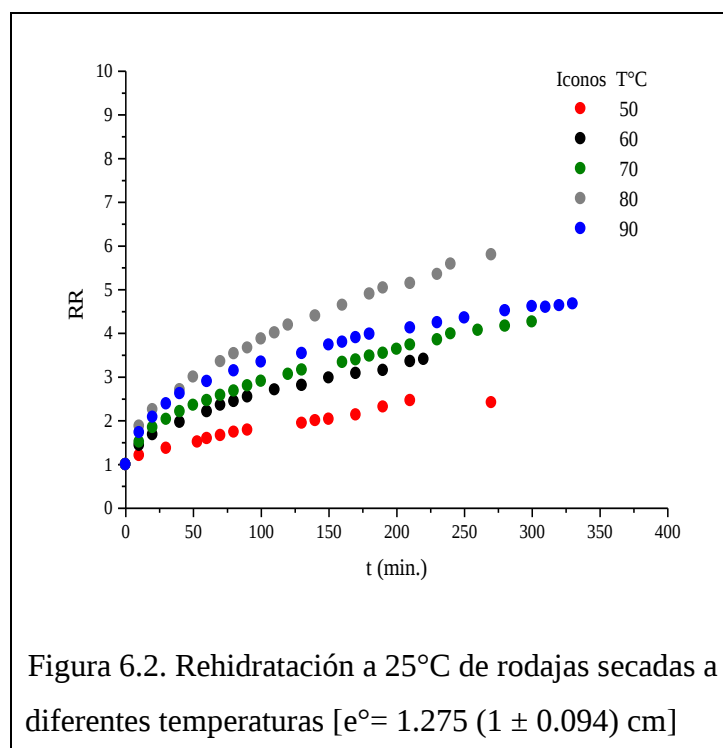
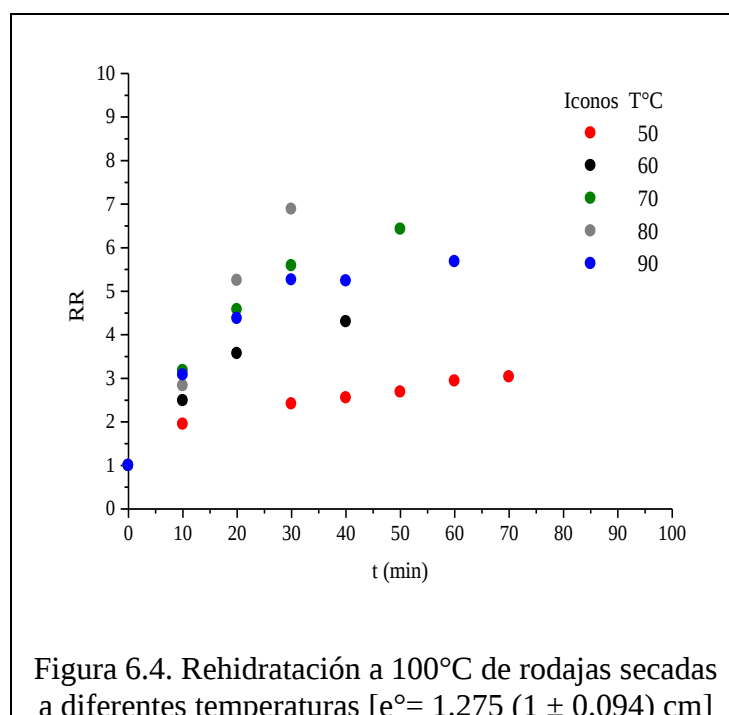
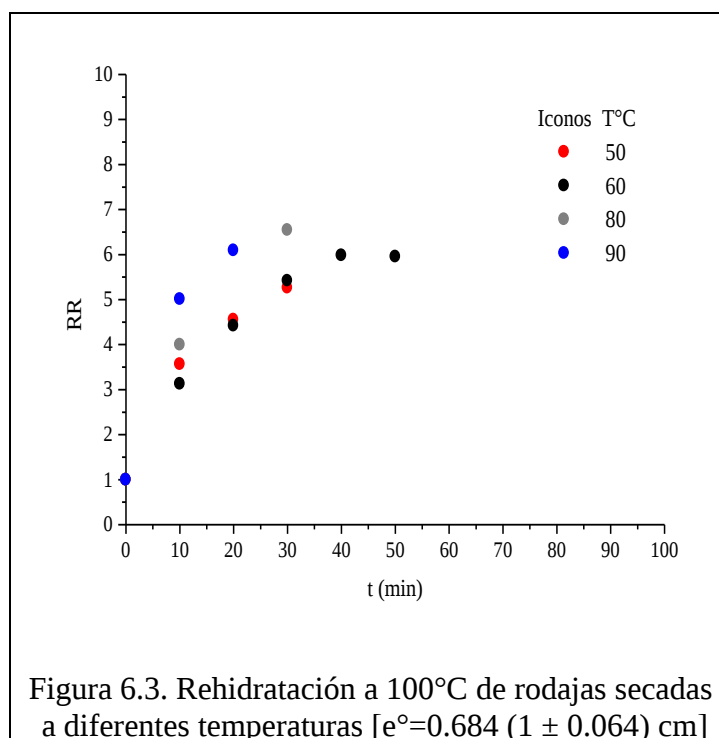


Figura 6.2. Rehidratación a 25°C de rodajas secadas a diferentes temperaturas [$e^{\circ} = 1.275 (1 \pm 0.094) \text{ cm}$]

En ambas figuras se observa que la alineación de los puntos podrían interpolarse mediante familias de líneas curvas. Por otra parte, independientemente de la temperatura de secado, las rodajas presentan un periodo de reconstitución inicial relativamente rápido, el cual puede atribuirse a que los capilares y cavidades cercanas a la superficie se llenan rápidamente (García-Pascual y col., 2005), seguido de un incremento gradual de su peso con tendencia a una tasa máxima de rehidratación ($RR_{\max}$). Este comportamiento concuerda con lo observado en diversos trabajos de investigación realizados utilizando otros alimentos deshidratados, como ser trozos de papa (Mc Minn & Magee, 1997), kiwi (Maskan, 2001a), tallos de brócoli (San Juan y col., 1999), pimientos en trozos (Sgroppo y col., 2000), mango (Maldonado y col., 2007), cilindros de papas (Cunningham y col., 2008), entre otros.

En las Figs. 6.1 y 6.2 se observa que el grado de rehidratación a 25°C de rodajas de berenjena se incrementa con el tiempo. Las rodajas de espesor menor secadas a 50, 60, 70-80 y 90°C alcanzan el equilibrio a 180, 210, 230 y 160 minutos; mientras que las de espesor mayor secadas a las mismas temperaturas lo hacen a partir de 140, 210, 240 y 280 minutos, respectivamente. Estos últimos son superiores a los empleados por las rodajas de espesor menor.

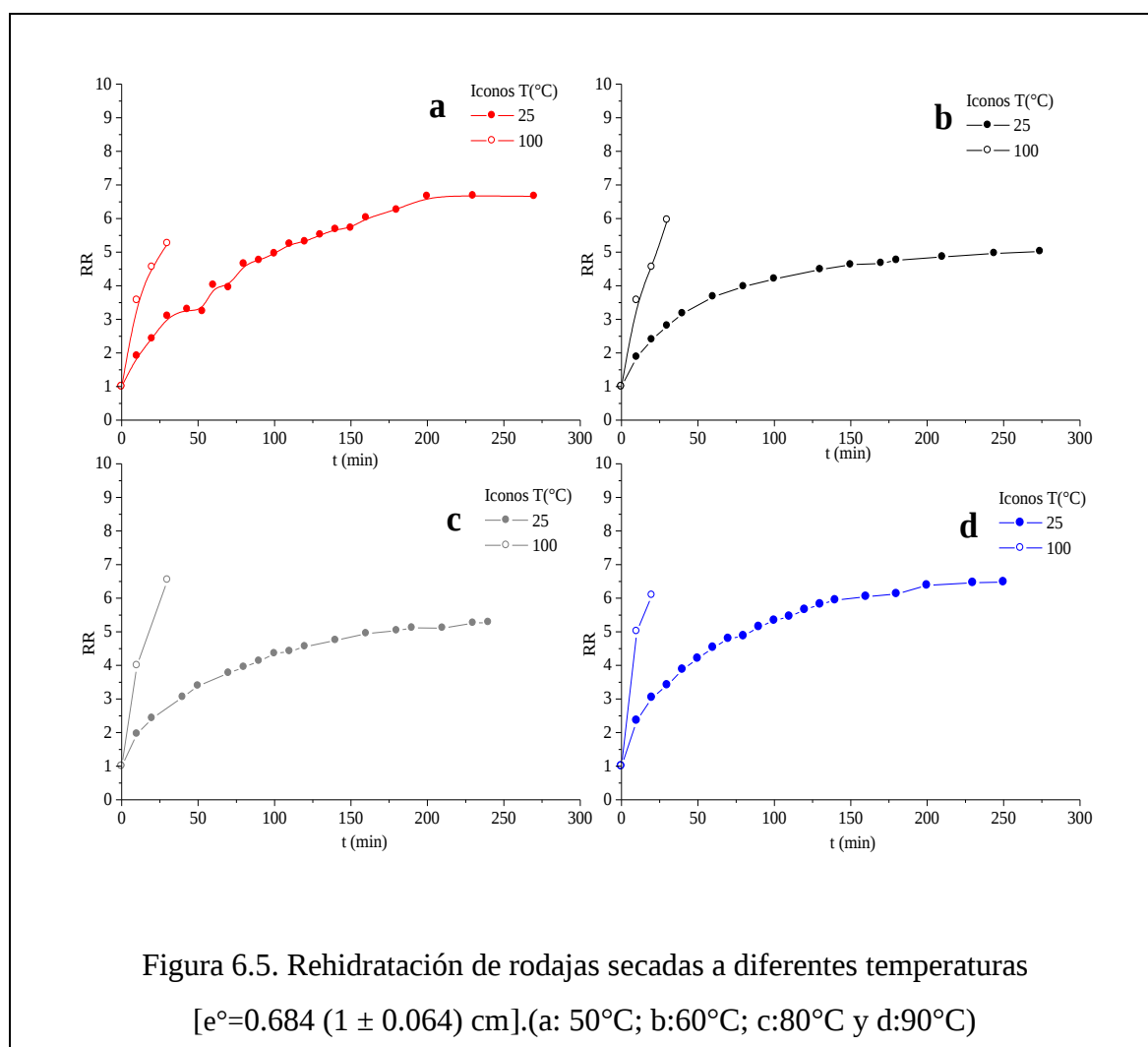
En las Figs. 6.3 y 6.4 se presentan datos del grado de rehidratación (RR) a 100°C de rodajas de berenjena secadas a 50°C, 60°C, 70°C, 80 °C y 90°C, de espesor inicial de 0.684 (1 ± 0.064) cm y 1.275 (1 ± 0.094) cm, respectivamente. En las mismas, se observa que la alineación de los puntos podrían interpolarse mediante familias de líneas curvas, al igual que en las Figs. 6.1 y 6.2.



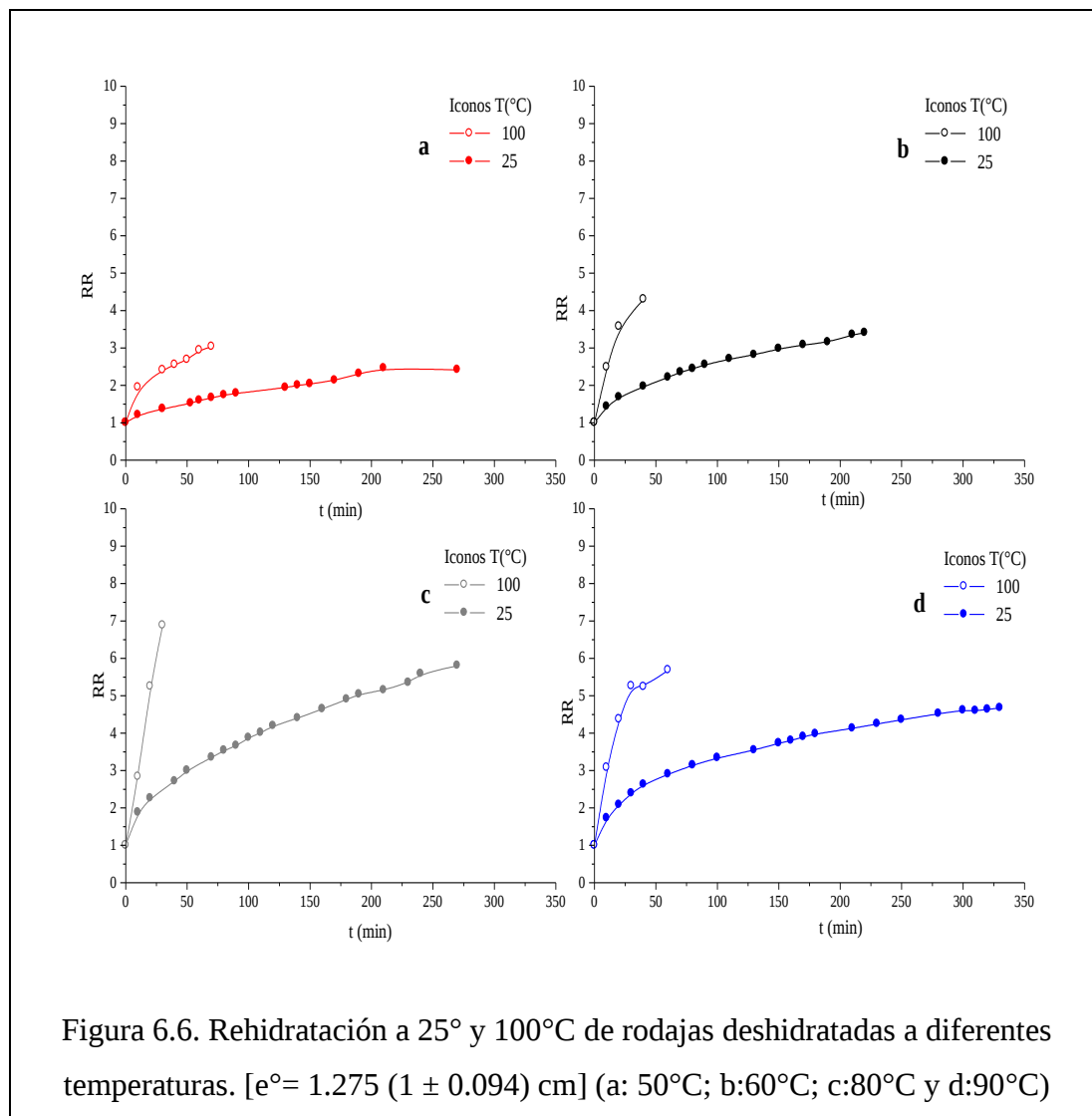
En ambos casos el grado de rehidratación aumenta con el tiempo de tratamiento hasta alcanzar el equilibrio (aproximadamente a los 30 minutos de tratamiento); en los casos donde no se observa claramente este comportamiento, es debido a que las rodajas se desarman llegado cierto tiempo de tratamiento dificultando de esta manera la determinación.

6.2.2 Influencia de la temperatura de rehidratación

En las Fig. 6.5 se presentan las curvas de rehidratación (RR) a 25°C y 100°C, de rodajas de berenjena de espesor inicial, $e^0=0.684$ (1 ± 0.064) cm secadas a las distintas temperaturas ensayadas.



En la Fig. 6.6 se presentan las curvas de rehidratación (RR) a 25°C y 100°C, de rodajas de berenjena de espesor inicial, $e^0 = 1.275 (1 \pm 0.094)$ cm secadas a las distintas temperaturas ensayadas.

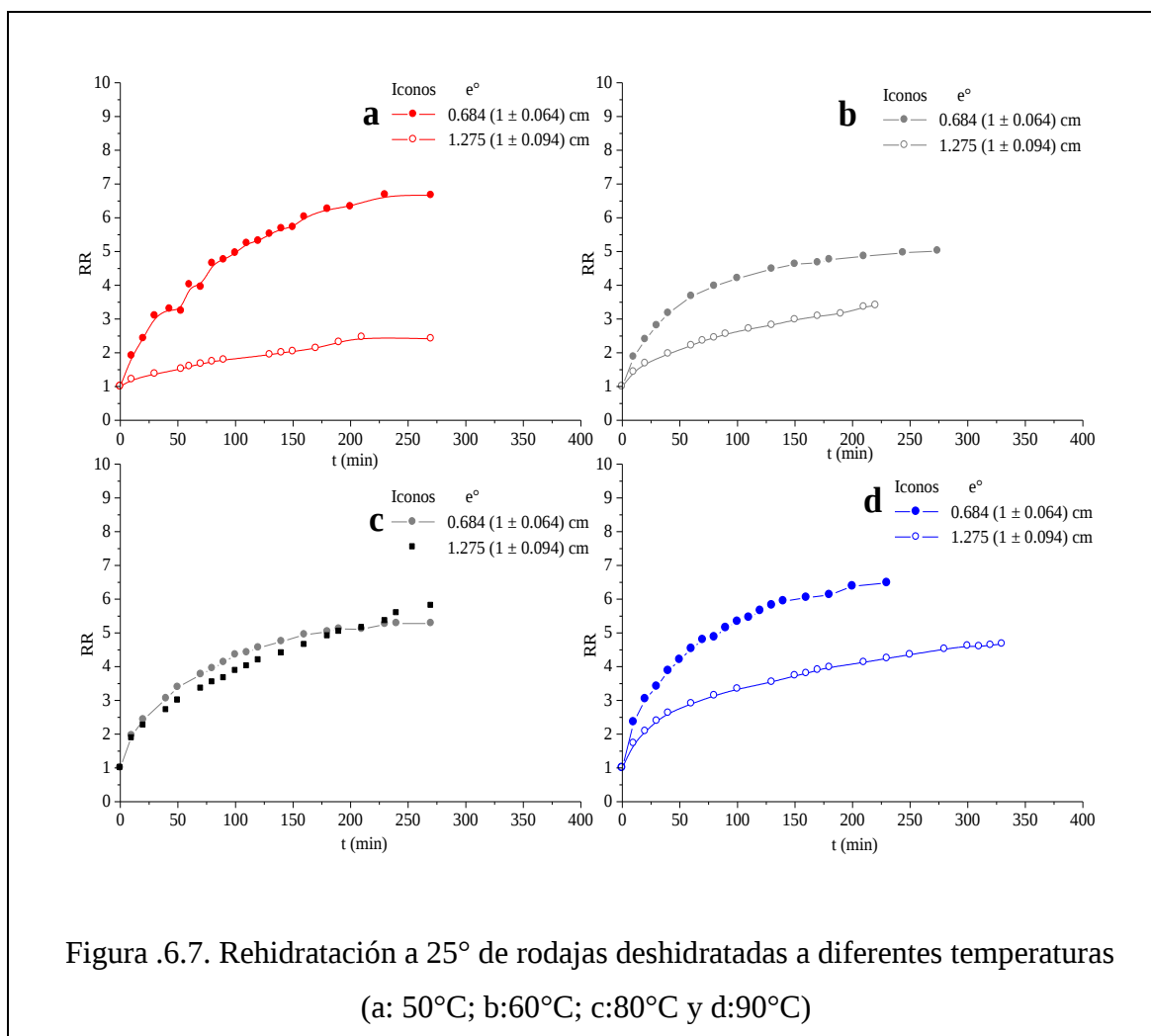


En ambas figuras se observa que la velocidad de rehidratación es mayor a 100°C que a 25°C, independientemente de la temperatura de secado y de las dimensiones iniciales de las muestras vegetales alcanzándose los valores máximos en menor tiempo (excepto aquellas secadas a 50°C y espesor inicial 0.684 (1 ± 0.064) cm, cuya capacidad rehidratación máxima es mayor a 25°C que a 100°C. Esta dependencia de la temperatura es mayor al inicio del proceso de rehidratación, coincidiendo con lo observado por Cunningham y col. (2008) durante la rehidratación de cilindros de papa a diferentes temperaturas.

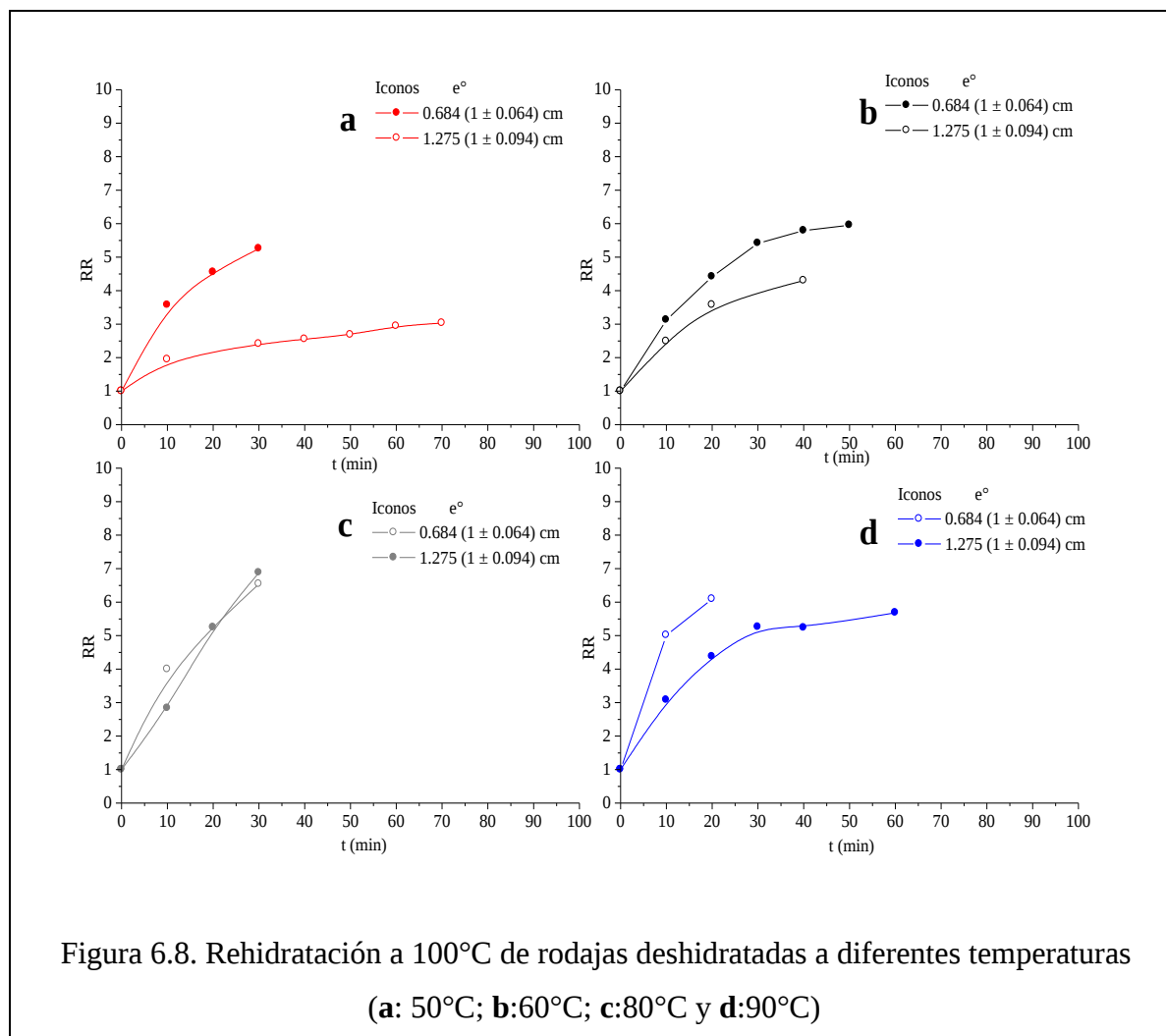
6.2.3 Influencia del tamaño de los trozos

En la Fig. 6.7, se presentan las curvas de rehidratación a 25°C de rodajas de berenjena de diferentes espesores iniciales en función del tiempo.

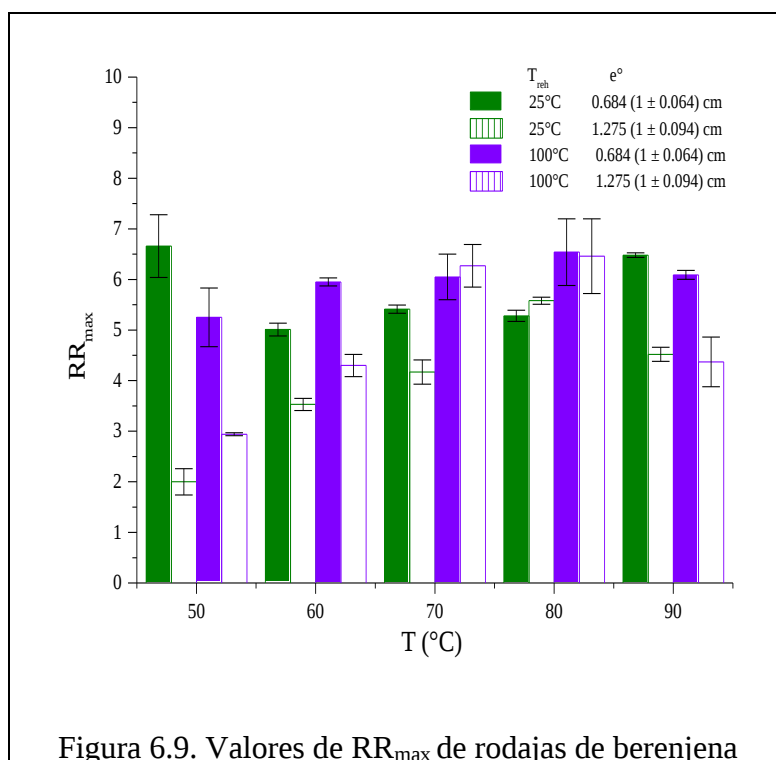
Las rodajas de espesor 0.684 (1 ± 0.064) cm presentan una mayor velocidad de rehidratación a 25°C que aquellas de espesor 1.275 (1 ± 0.094) cm independientemente de la temperatura a la cual fueron secadas, excepto para aquellas secadas a 80°C, que presentan un comportamiento diferente.



En las Fig. 6.8 se presentan las curvas de rehidratación a 100°C de rodajas de diferentes espesores iniciales en función del tiempo. Se observa un comportamiento similar al observado durante la rehidratación a 25°C.



En la Fig. 6.9 se presentan los valores de $RR_{\max}$ a 25°C y 100°C, de rodajas de diferente espesor inicial y deshidratadas a diferentes temperaturas. En la misma, se observa que la rehidratación máxima alcanzada por rodajas de espesor inicial 0.684 (1 ± 0.064) cm, es mayor a 100°C que a 25°C, excepto en el caso de rodajas secadas a 50°C y 90°C. Un comportamiento similar presentan las rodajas de espesor mayor, con la diferencia que las rodajas secadas a 90°C alcanzan el $RR_{\max}$ a 25°C. Esto podría deberse probablemente a que la rehidratación a 100°C es muy enérgica, provocando ruptura de las muestras al final del proceso, dificultando así su medición. Un comportamiento similar fue observado por Singh y col. (2006) durante la rehidratación de papas dulces y fue atribuido al efecto que ejerce la temperatura sobre las paredes celulares y el tejido del material en estudio. Sin embargo, Cunningham y col. (2008) observaron que la temperatura de rehidratación tiene un efecto limitado sobre el grado de rehidratación final alcanzado por cilindros de papas.



Por otra parte, se observa que a las dos temperaturas de rehidratación ensayadas, las rodajas de espesor inicial 0.684 (1 ± 0.064) cm, alcanzan mayores grados de rehidratación que las de espesor mayor, al igual a lo observado por Doymaz (2008) durante la rehidratación a 30°C de rodajas de puerros de diferente espesor. Puede observarse, en algunos casos, una cierta dependencia con la temperatura de secado a la cual fueron sometidas las rodajas.

En la Tabla 6.3 se presentan los valores calculados del grado de recuperación de peso inicial (COR) a cada condición ensayada utilizando la ec. (6.2).

El grado de recuperación de peso inicial de las rodajas secadas a 60°C, 70°C y 80°C, es mayor 100°C que a 25°C ($p < 0.05$), encontrándose además que las rodajas de espesor inicial 0.684 (1 ± 0.064) cm presentaron valores superiores al de las rodajas de espesor 1.275 (1 ± 0.094) cm. En cambio, los valores de COR obtenidos para rodajas secadas a 50°C y 90°C, no presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los dos espesores y las dos temperaturas de rehidratación ensayados. Se observa además que el grado de recuperación del peso inicial alcanzado no presenta relación definida con la temperatura de secado de las rodajas.

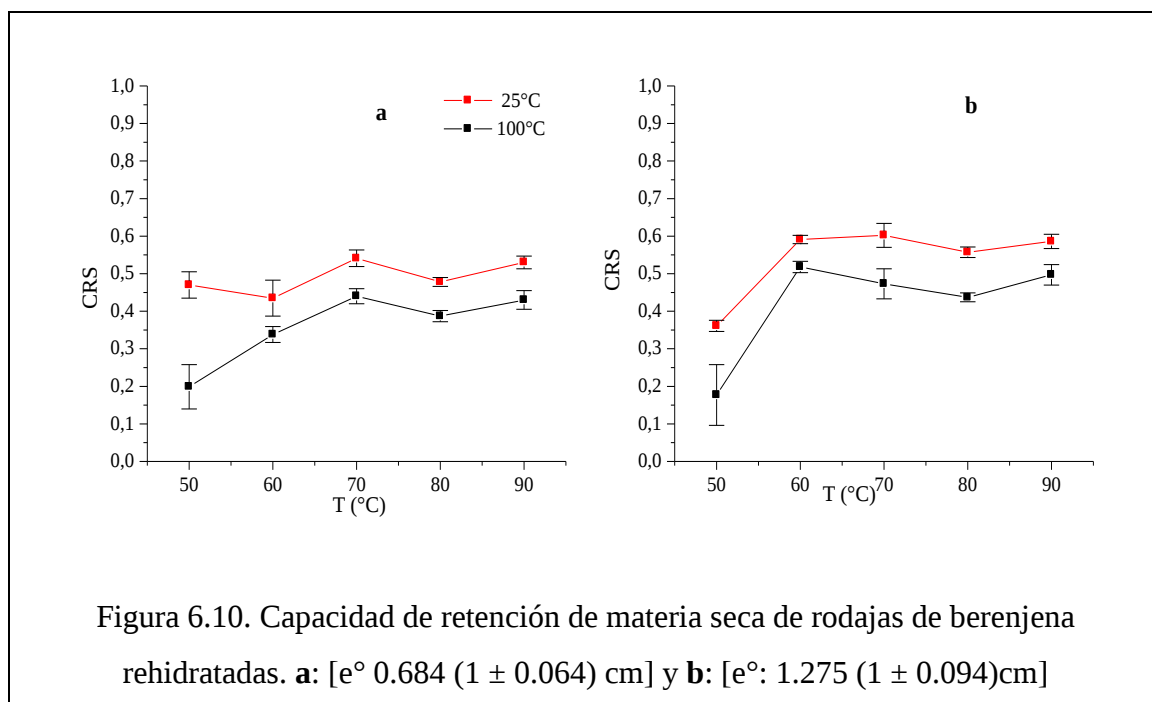
Tabla 6.3: Valores de COR de rodajas no pretratadas				
Temperatura de secado (°C)	Temperatura de rehidratación			
	25°C		100°C	
	0.684 (1 ± 0.064) cm	1.275 (1 ± 0.094) cm	0.684 (1 ± 0.064) cm	1.275 (1 ± 0.094) cm
50	0.53 ± 0.07a	0.51 ± 0.03a	0.47 ± 0.03a	0.57 ± 0.07a
60	0.45 ± 0.02b	0.34 ± 0.01b	0.56 ± 0.04b	0.42 ± 0.02b
70	0.57 ± 0.04ac	0.37 ± 0.01b	0.63 ± 0.03c	0.55 ± 0.04a
80	0.52 ± 0.03b	0.59 ± 0.01c	0.63 ± 0.02c	0.73 ± 0.02c
90	0.63 ± 0.05c	0.46 ± 0.02d	0.49 ± 0.03a	0.52 ± 0.03a

*letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$), se compararon los valores obtenidos a cada temperatura de rehidratación para cada espesor ensayado, las distintas temperaturas de secado de las rodajas. Test LSD Fisher

Las rodajas deshidratadas a diferentes temperaturas son incapaces de embeber suficiente cantidad de agua y alcanzar la rehidratación completa. Este comportamiento puede explicarse teniendo en cuenta que durante el proceso de secado se produce ruptura y desorganización celular, con la consecuente pérdida de la integridad del tejido original (ver Capítulo 4). Esto también fue observado por Jayaraman, Gupta, y Babu Rao (1990) durante el secado de coliflor. Ertekin y Yaldiz (2004) encontraron que al rehidratar en agua destilada durante 24 hs. (a temperatura ambiente) rodajas de berenjena secadas en bandejas a temperaturas de 30°C a 70°C, el grado de rehidratación aumentaba de 25.46% para rodajas de espesor 0.635 cm, a 33.60 % para rodajas de 2.54 cm de espesor, alcanzando el valor máximo las rodajas secadas a 50°C. Los valores reportados son inferiores a los obtenidos en este Trabajo de Tesis.

Neubert y col. (1968) adoptó la designación de buen grado de rehidratación para describir la reconstitución de apio deshidratado entre valores 45-50% del peso de la muestra vegetal fresca. En base a este criterio, se podría decir que las rodajas de berenjena deshidratadas han alcanzado un buen grado de rehidratación, sobretudo en el caso de rodajas de espesor menor.

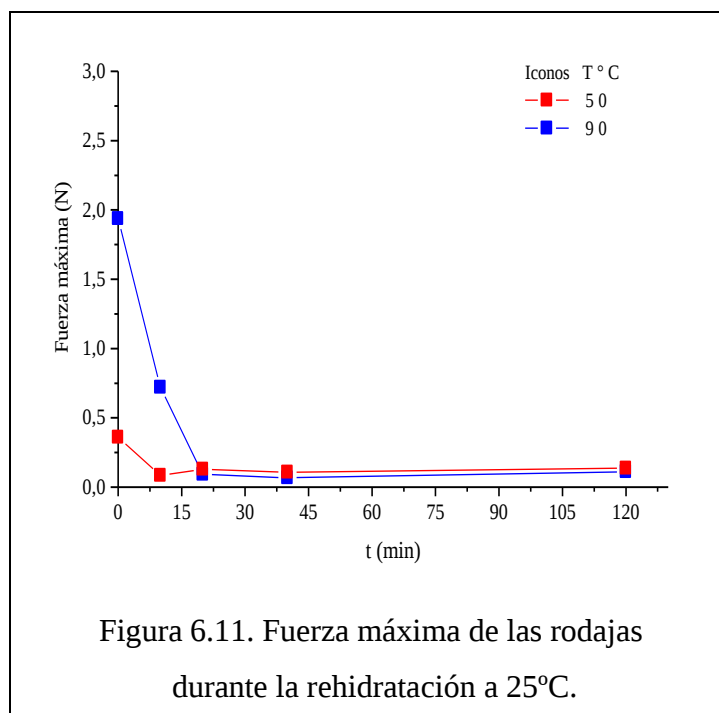
En la Fig. 6.10 se presentan los resultados de la capacidad de retención de materia seca, CRS calculados mediante la ec. (6.3), de rodajas secadas a 50°C, 60°C, 70°C, 80°C y 90°C, a las dos temperaturas de rehidratación ensayadas.



La capacidad de retención de materia seca (CRS) de las rodajas deshidratadas es mayor a 25°C que a 100°C, independientemente de la temperatura de secado y del espesor inicial de la muestra. En todos los casos las rodajas deshidratadas a 50°C presentan el menor grado de retención de materia seca, excepto las rodajas rehidratadas a 25°C de espesor inicial 0.684 (1 ± 0.064) cm.

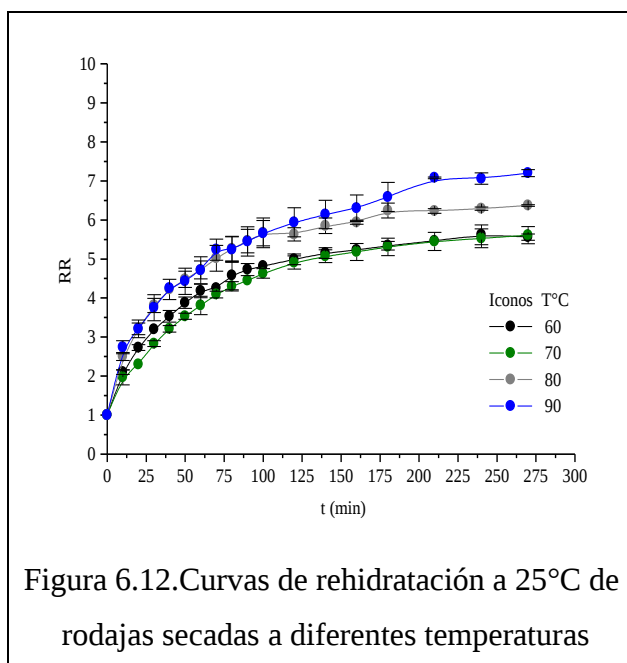
6.2.4 Variación de textura de las rodajas durante la rehidratación.

En la Fig. 6.11 se presentan los valores promedio de las medidas de fuerza máxima (Newton) de rodajas secadas a 50 y 90°C y luego rehidratadas a 25°C. La dureza de las rodajas disminuye a medida que aumenta el porcentaje de rehidratación, donde aquellas secadas a 50°C presentan una menor dureza inicial que las secadas a 90°C, debido probablemente al mayor endurecimiento de la rodaja debido a la temperatura de secado.

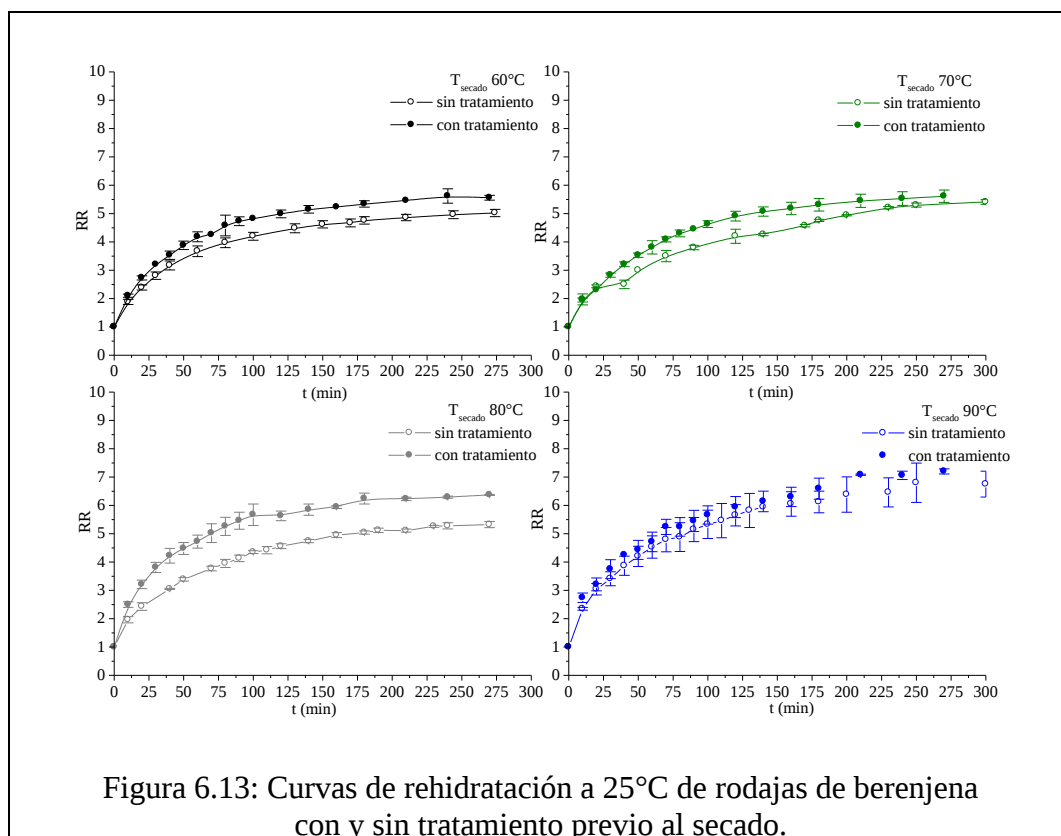


6.3. REHIDRATACIÓN DE RODAJAS TRATADAS

En el Capítulo anterior se encontró que el tratamiento previo al secado, adecuado para disminuir el pardeamiento de las muestras vegetales, era la inmersión durante tres minutos en una solución al 0.5 % p/v de metabisulfito de sodio. Es por ello que se realizaron ensayos de rehidratación de rodajas de espesor inicial 0.684 (1 ± 0.064) cm, deshidratadas a diferentes temperaturas, preparadas en dichas condiciones. En la Fig. 6.12 se presentan las curvas de rehidratación a 25°C, expresadas como grado de rehidratación, RR, en función del tiempo. Se observa la influencia de la temperatura de secado sobre el grado de rehidratación obtenido, a diferencia de lo observado durante la rehidratación de rodajas no tratadas.



En la Fig. 6.13 se presentan las curvas de rehidratación a 25°C de rodajas de berenjena tratadas de espesor inicial, $e^0=0.684$ (1 ± 0.064) cm y sin pretratamientos previo al secado a las siguientes temperaturas: 60, 70, 80 y 90°C.



Las rodajas tratadas por inmersión durante 3 minutos en soluciones de metabisulfito de sodio antes del secado, presentan un grado de rehidratación mayor que aquellas no tratadas, para todas las temperaturas ensayadas, excepto las rodajas secadas a 90°C que no presentan diferencias significativas con su par no tratada.

En las Tablas 6.4 y 6.5 se presentan los valores de $RR_{\max}$ obtenidos a cada condición ensayada, tanto para rodajas no tratadas y pretratadas con metabisulfito de sodio 0.5 % p/v 3 minutos.

Tabla 6.4: Valores de $RR_{\max}$ a 25°C

Temperatura de secado (°C)	$RR_{\max}$ pretratadas	$RR_{\max}$ no pretratadas
60	$5.56 \pm 0.08a$	$5.01 \pm 0.13a$
70	$5.61 \pm 0.22a$	$5.41 \pm 0.08b$
80	$6.27 \pm 0.18b$	$5.28 \pm 0.11b$
90	$7.20 \pm 0.09c$	$6.48 \pm 0.04c$

*letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$)

Tabla 6.5: Valores de $RR_{\max}$ a 100°C

Temperatura de secado (°C)	$RR_{\max}$ pretratadas	$RR_{\max}$ no pretratadas
60	$7.17 \pm 0.59ab$	$5.95 \pm 0.08a$
70	$4.63 \pm 0.36c$	$6.06 \pm 0.46b$
80	$6.35 \pm 0.27a$	$6.55 \pm 0.66a$
90	$7.49 \pm 0.52b$	$6.09 \pm 0.09a$

*letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$)

En la Tabla 6.4 se evidencia la influencia de la temperatura de secado sobre el grado de rehidratación alcanzado por las rodajas pretratadas, ya que $RR_{\max}$ se incrementa con el mismo, no ocurre así en el caso de la rehidratación a 100°C, probablemente debido al hecho de que las rodajas se desarman y hay mayor error en la determinación. Además, el grado de rehidratación alcanzado por las rodajas pretratadas a 25°C es superior al de las no pretratadas, lo que indicaría que el pretratamiento con metabisulfito de sodio favorecería la rehidratación de éstos productos. Vega-Gálvez y col. (2008) no encontraron diferencias

significativas en el grado de rehidratación de láminas de pimientos rojos tratados y no tratados con metabisulfito de sodio previo al secado, pero si observaron una mejora en la calidad del producto rehidratado obtenido. Ertekin y Yaldiz (2004) encontraron que rodajas de berenjena secadas en bandejas, previamente tratadas por inmersión durante 5 minutos en agua hirviendo, alcanzaban un mayor grado de rehidratación que las no tratadas previo al secado.

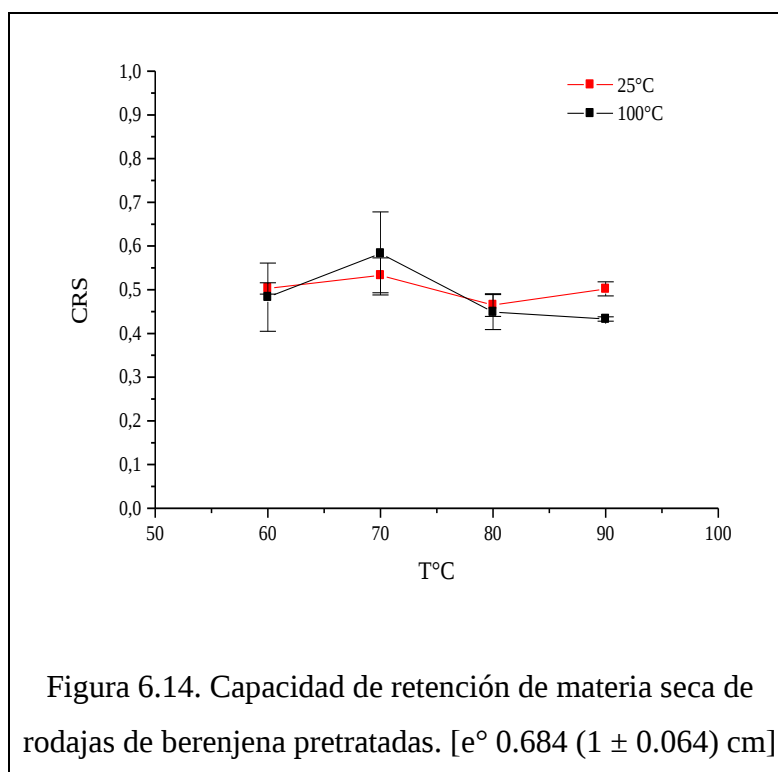
En la Tabla 6.6 se presentan los valores del grado de recuperación de peso inicial (COR) de rodajas tratadas calculados mediante la ec. (6.2) a cada condición ensayada. La temperatura de rehidratación no presenta una influencia significativa entre los valores hallados de COR, excepto a 60°C donde el COR es mayor a 100°C que a 25°C.

Tabla 6.6: Valores de COR de rodajas pretratadas		
Temperatura de secado (°C)	Temperatura de rehidratación	
	25°C	100°C
60	0.56 ± 0.03ab	0.70 ± 0.12a
70	0.62 ± 0.03b	0.55 ± 0.07b
80	0.51 ± 0.05a	0.48 ± 0.02b
90	0.52 ± 0.02a	0.50 ± 0.05b

*letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$)

Comparando los valores obtenidos en la Tabla 6.6 con los obtenidos para rodajas no pretratadas, se observó que no hay diferencias significativas entre los mismos para rodajas secadas a las distintas temperaturas ensayadas, excepto a 60°C, donde el COR de las tratada es mayor de la no tratada.

En la Fig. 6.14 se presentan los resultados de la capacidad de retención de materia seca, CRS calculados mediante la ec. (6.3), de rodajas tratadas y secadas a 60°C, 70°C, 80°C y 90°C.



Los valores de capacidad de retención de materia seca obtenidos no son afectados por la temperatura de rehidratación, salvo en el caso de las rodajas secadas a 90°C. Únicamente en las rodajas pretratadas y luego secadas a 60°C presentan una mayor retención de materia seca que su par no tratado.

Capítulo 7

RESULTADOS Y DISCUSION

PARTE 5: Isotermas de adsorción y Almacenamiento

7.1. INTRODUCCIÓN

El agua es un componente importante de los alimentos vegetales, ya sea porque contribuye a la estructura y textura de los mismos, o bien debido a que su interacción con otros componentes determina la estabilidad relativa durante el almacenamiento. Es bien conocido que los alimentos vegetales más susceptibles a la degradación (tanto física como química) son aquellos con alto contenido de agua.

La actividad del agua, a_w , es un parámetro ampliamente utilizado en la elaboración de alimentos deshidratados. Establece la condición de equilibrio que determina el límite del proceso de secado, siendo una parte importante del gradiente que provoca el movimiento del agua. Es por ello que la actividad de agua se ha convertido en un factor determinante en el estudio de la estabilidad de los alimentos secos. (Singh y Heldman, 1998)

La actividad del agua se define como la relación entre la presión de vapor de agua del alimento (en la interfase sólido-gas) y la presión de vapor del agua líquida pura a la misma temperatura. Así cuando un alimento está en equilibrio con sus alrededores, la presión de vapor de agua del alimento es igual a la presión parcial de vapor de agua de la atmósfera, y por lo tanto a_w del alimento es igual a la humedad relativa de equilibrio del aire, dividida por 100. Es decir, a una temperatura dada T , se tiene que:

$$a_w = \frac{p}{p^\circ} = \frac{\mathcal{H}\mathcal{R}_{eq}}{100} \quad (7.1)$$

donde: a_w , es la actividad del agua; p , es la presión de vapor del agua contenida en el alimento; p° , es la presión de vapor del agua pura; $\mathcal{H}\mathcal{R}_{eq}$, es la humedad relativa porcentual de equilibrio del aire.

Vale decir que a_w es un parámetro que indica la disponibilidad de agua en un alimento, ya sea para que ocurran reacciones de naturaleza química o bioquímica (oxidación de lípidos, reacciones enzimáticas, reacción de Maillard, entre otros) como así también el desarrollo microbiano (Comaposada y col., 2000).

Las isotermas de adsorción muestran la relación entre la actividad del agua y la humedad de equilibrio contenida en un producto alimenticio, M_{eq} , a una temperatura y presión constante (Zhang y col. 1996). El contenido de humedad equilibrio es una propiedad fisicoquímica específica de la muestra vegetal. La misma es definida como:

$$M_{eq} = \frac{m_{w_{eq}}^L}{m_s^S} \quad (7.2)$$

donde: M_{eq} , es el contenido de humedad en equilibrio; $m_{w_{eq}}^L$, masa de agua de equilibrio de la muestra vegetal

Esta relación ha sido ampliamente estudiada y es así que se han propuesto diversos modelos matemáticos, entre los cuales debemos señalar los siguientes: 1) modelo de Brunauer, Emmett y Teller, también conocido por sus siglas BET, (1938); 2) modelo de Oswin (1946); 3) modelo de Halsey (1948); 4) modelo de Henderson (1952); 4) modelo de Guggenheim, Anderson y de Boer, GAB, propuesto para su uso en alimentos por Van den Berg en 1981; 5) modelo de Ferro Fontán y col. (1982); 6) modelo BET modificado por Aguerre y col. (1989a,b).

De la amplia gama de modelos disponibles en la bibliografía consultada, se han seleccionado para su análisis: el modelo BET y BET modificado, por tratarse de modelos clásicos para la descripción de isotermas de adsorción; el modelo GAB, por ser el más utilizado en el caso de alimentos; y el modelo de Ferro Fontán, por presentarse como una alternativa adicional para el estudio de las isotermas, debido a que posee tres parámetros. A continuación se detallarán los aspectos fundamentales de cada uno de ellos.

Modelo de Brunauer, Emmett y Teller (BET)

Este es uno de los primeros modelos que se propuso para interpretar isotermas de sorción en monocapas y ha sido aplicado en la adsorción de gases y vapores en superficies y en sólidos porosos, como así también en la absorción de vapor de agua en polímeros y otros materiales homogéneos. Ha sido aplicado a alimentos, en un principio, por Labuza, (1968) y luego por Iglesias y Chirife, (1976a). Este modelo presenta la dificultad de poseer un reducido rango de aplicabilidad, ya que solamente permite analizar isotermas con bajos valores de actividad del agua ($a_w < 0.3-0.4$). Sin embargo, los conceptos teóricos sobre los que se basó su desarrollo matemático, se ha utilizado para desarrollar nuevos modelos alternativos que permitieron extender los alcances del modelo de BET.

Básicamente es un modelo de dos parámetros (M_{mb} , C_b), cuya forma es la siguiente:

$$M_{eq} = \frac{M_{mb} C_b a_w}{(1 - a_w) [1 + (C_b - 1) a_w]} \quad (7.3)$$

donde: M_{mb} , es el contenido de humedad de la monocapa o capacidad de sorción de la monocapa; C_b , constante relacionada con el calor de sorción o constante energética.

Ambas constantes, que también son características de la isoterma de sorción de Langmuir (1918), se calculan utilizando la forma linealizada de la ecuación BET, llamados también gráficos BET. En casi todos los casos la desviación de la linealidad de estos gráficos indica que a altas presiones de vapor la cantidad sorbato es menor a la predicha por la isoterma.

Modelo de BET modificado

Aguerre y col. (1989a, 1989b), mediante modificaciones que introducen en el modelo BET, proponen el siguiente:

$$M_{eq} = \frac{M_{mb}C_b a_w}{(1 - a_w)[1 - C_b \ln(1 - a_w)]} \quad (7.4)$$

Modelo de Guggenheim, Anderson y de Boer (GAB)

Este modelo es una extensión de la ecuación de BET, tomando en cuenta las propiedades modificadas del agua adsorbida en la región multicapa. Fue propuesto para ser aplicado a alimentos por Van den Berg en 1981. El modelo de GAB ha es muy utilizado para predecir datos de niveles de actividad de agua de aproximadamente 0.9, y da mejores ajustes que la ecuación de BET en un intervalo amplio de contenido de humedad.

Es un modelo de tres parámetros, cuya forma es la siguiente:

$$M_{eq} = \frac{M_{mg}C_g K a_w}{(1 - K a_w)[1 + (C_g - 1)K a_w]} \quad (7.5)$$

donde: C_g , es la constante de Guggenheim; $K = C_g/C_b$, constante de corrección de las propiedades de la multicapa con respecto del líquido.

Para la determinación de las tres constantes de GAB existen diversos métodos que pueden emplearse. Uno de ellos es a mediante el método de linealización.

Otro método conocido es el que propusieron Schaer y Ruegg (1988), quienes transforman la ec. (7.5) de GAB en la siguiente expresión parabólica:

$$\frac{a_w}{M_{eq}} = c_1 + c_2 a_w + c_3 a_w^2 \quad (7.6)$$

Los coeficientes c_1 , c_2 y c_3 , pueden estimarse por regresión no lineal; y a partir de sus estimas pueden calcularse los tres coeficientes del modelo GAB.

El modelo de GAB fue aplicado con éxito por diversos investigadores, entre los que se deben mencionar: Maroulis y colaboradores (1988), quienes estudiaron isotermas de adsorción de pasa de higos, pasa de ciruelas, y damascos deshidratados; Hyun y col. (1991), quienes trabajaron con pimientos morrones rojos; Maroulis y col., (1995) con papas; Iglesias y Chirife (1995) trabajaron con alimentos de origen vegetal y animal; Kaymak-Ertekin y Sulatanoglu (2001) determinaron las isotermas de sorción de pimientos morrones; Giovanelli y col., (2002) con productos derivados del tomate; Viswanathan y col. (2003) con rodajas de tomate y cebollas en trozos; Krokida y col., (2003a) con calabaza, ajo, tomates, guisantes verdes, hongos, cebollas, apio y pimientos morrones verdes; Timmermann y col., (2001) con diversos tipos de alimentos.

Modelo de Ferro Fontán, Chirife, Sancho e Iglesias (1982). Este modelo fue propuesto para el analizar isotermas de adsorción de productos alimenticios. Es un modelo de tres parámetros que tiene la siguiente forma:

$$\ln\left(\frac{\gamma}{a_w}\right) = \frac{\alpha}{(M_{eq})^r} \quad (7.7)$$

donde: γ , parámetro que toma en cuenta la estructura del sorbato agua; α , coeficiente de proporcionalidad; r , potencia que vincula el calor isostérico de sorción con el contenido de humedad de equilibrio.

Iglesias y Chirife (1995), estudiaron el comparativamente éste modelo junto con el de GAB, llegando a la conclusión que presentaba un buen grado de ajuste para el rango de a_w de 0.1-0.9, presentándose éste como una alternativa al modelo de GAB.

Diversos autores han tratado de ajustar sus datos experimentales a estas ecuaciones de manera de dilucidar cual de ellos es el más adecuado para describir el comportamiento del material en estudio. Entre ellos, encontramos a Kaymak-Ertekin y col., (2004) que trabajaron sobre isotermas de damascos, manzanas y papas; Viswanathan y col., (2003) para rodajas de tomate y cebollas en trozos; Kaymak-Ertekin y col., (2001) para pimientos

morrones; García y col., (2000) para okara; Gabas y col. (2000) para la cáscara y pulpa de uvas *Italia*.

La utilidad de un modelo dependerá en mayor grado de los objetivos que tenga el investigador ya que si se quiere determinar el tiempo de vida útil del producto se deberá considerar aquel modelo que mejor ajuste a los datos experimentales amén de aquel que posea un mayor fundamento teórico. Otro factor importante es la simplicidad del mismo, ya que aquel que posea un menor número de parámetros requerirá menor tiempo para ser procesado (Boquet y col., 1978)

El conocimiento y el entendimiento de las isotermas de adsorción de alimentos es de crucial importancia en la ciencia y tecnología de alimentos, sobre todo en el diseño y optimización de procesos como por ejemplo el secado, empaquetamiento, almacenamiento así como en el diseño de secaderos, predicción de la estabilidad y vida útil del alimento (Gal, 1987; Zhang y col. 1996).

Considerando el envasado y almacenamiento, el paso siguiente a la deshidratación es importante destacar ciertos aspectos, a saber.

El envasado de alimentos persigue diversos propósitos, entre los que podemos encontrar: manejo de material, ayuda en el procesado, conveniencia para el consumidor, herramienta de marketing, dispositivo de ahorro de costes, y protección del alimento. (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 2000). Es por ello que el envasado debe ser considerado una parte integral del procesado de alimentos. (Brennan y col., 1981).

Throller y Christian (1978) observaron que el proceso de deshidratación aplicado a numerosos alimentos, como papa, cebolla y frijoles, resultan en productos de 5 a 10 % de humedad residual y una actividad del agua que ronda 0.10 a 0.35. Estos alimentos no presentan riesgos de desarrollo de hongos y mohos al menos que una hidratación extensa ocurra, por lo que los mismos deben ser envasados en contenedores que prevengan la rehidratación de los mismos.

Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado (2000) indican que la selección de un material de envasado o recipiente se basa en la consideración de los siguientes factores:

- Deterioro mecánico: proveniente de los impactos súbitos o choques durante la manipulación y transporte, así como las cargas de vibración y compresión impuestas en el almacenamiento.

- Características de permeabilidad: las pérdidas de humedad provocan pérdida de peso, así como deterioro en el aspecto y textura. Por otra parte los alimentos secos tienden a absorber humedad que puede causar una pérdida de la calidad del producto.
- Cambios de temperatura.
- Transmisión de luz: la exposición a la luz puede provocar pérdida de vitaminas, disminución de color y degradación de grasas. El envasado debe ser opaco o coloreado para evitar la luz de corta longitud de onda. (Brennan y col., 1981)
- Consideraciones químicas y bioquímicas: debe ser compatible con el alimento con el que está en contacto.
- Consideraciones microbiológicas y biológicas: la prevención o reducción de la contaminación microbiológica es una de las funciones del envasado.

La microflora de las hortalizas desecadas está formada esencialmente por las mismas clases de microorganismos que aparecen en las materias crudas, salvo el caso que haya contaminación. El número de microorganismos que al principio es alto disminuye durante las distintas fases de elaboración, como selección, lavado, limpieza, pelado, blanqueado y desecado. (Muller, 1992); por lo tanto si el tratamiento de desecación y las condiciones de almacenamiento son apropiados, en el alimento desecado no habrá multiplicación microbiana. (Frazier, 1993)

7.2. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN Y TRATAMIENTO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las isotermas de adsorción de rodajas de berenjena preparadas según lo indicado en el ítem 2.6.3 del Capítulo 2.

Los datos experimentales fueron correlacionados con modelos matemáticos de dos parámetros (BET y BET modificado) y de tres parámetros (GAB y Ferro Fontán), cuyas expresiones fueron detalladas previamente. Los parámetros de los modelos de isotermas de adsorción fueron estimados por regresión no lineal de los datos experimentales (Origin 5.0). La bondad de ajuste de las ecuaciones fue evaluada a través del error relativo promedio porcentual, calculado como:

$$\%P = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|M_{eq}^{cal} - M_{eq}^{exp}|}{M_{eq}^{exp}} \quad (7.8)$$

donde: N, es el número de datos experimentales; M_{eq}^{exp} , contenido en humedad de equilibrio experimental; M_{eq}^{cal} , contenido en humedad de equilibrio predicho por el modelo; %P, error porcentual promedio

Boquet y col., (1978) consideran que un modelo es aceptable cuando $\%P < 10$.

En la Fig. 7.1 se presentan isotermas de adsorción a 10°C y 30°C de rodajas de berenjena secadas a 50°C, 70°C y 90°C. El contenido de humedad de equilibrio, M_{eq} , a cada valor de a_w , corresponde al valor promedio de tres determinaciones. Las isotermas de adsorción de rodajas secadas a las distintas temperaturas de trabajo, no presentan diferencias significativas entre sí (test LSD de Fisher: $p > 0.05$), por lo que se infiere que en este caso, la temperatura de secado no influye sobre la isoterma de adsorción dentro del rango de temperaturas estudiado.

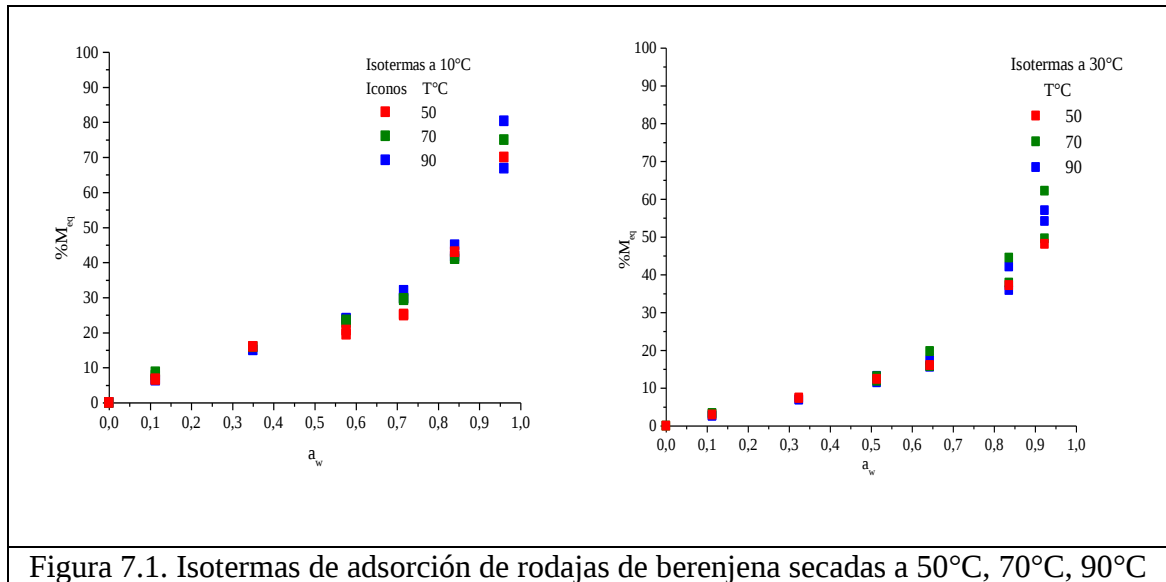
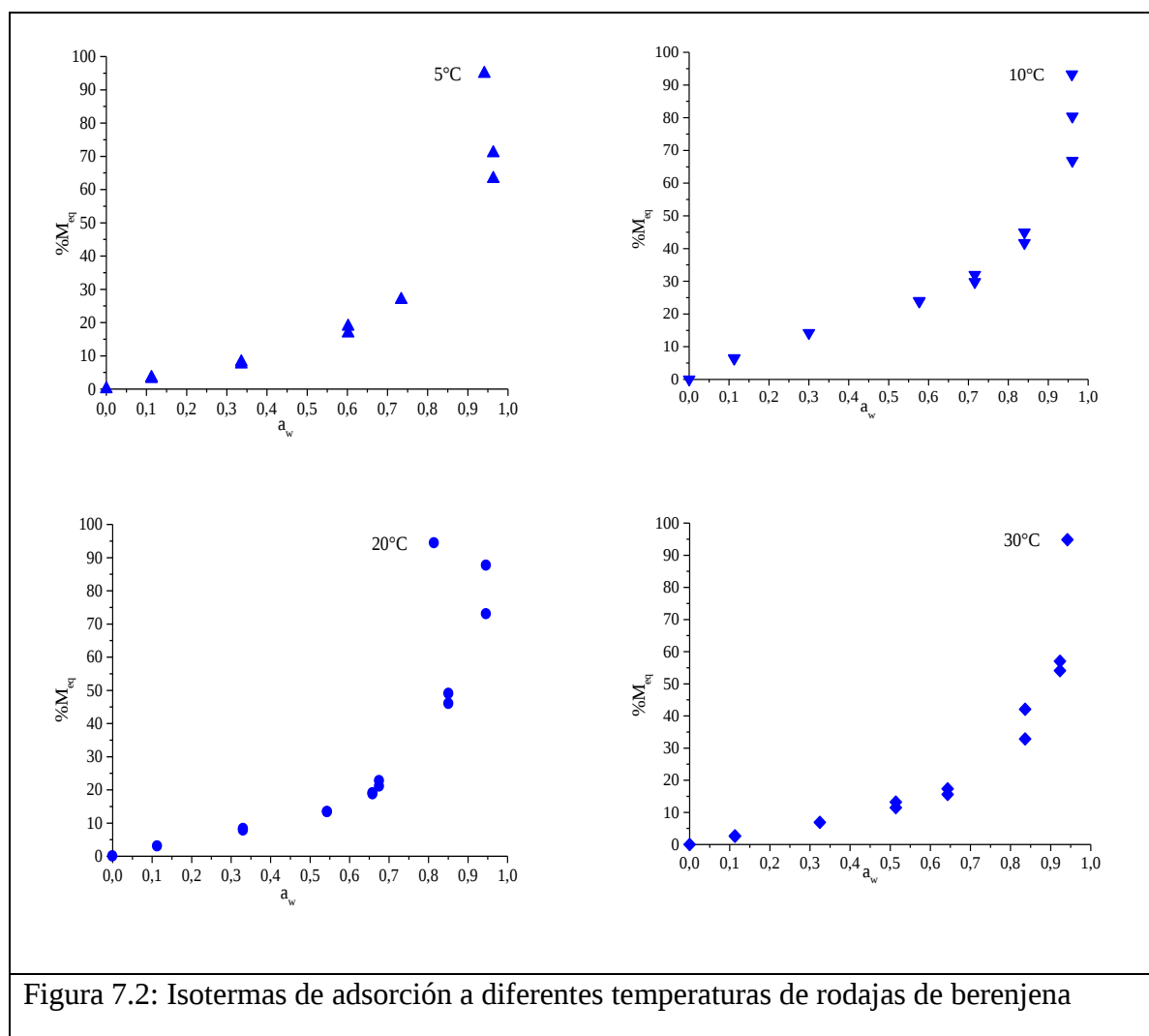


Figura 7.1. Isotermas de adsorción de rodajas de berenjena secadas a 50°C, 70°C, 90°C

En la Fig. 7.2 se presentan las isotermas de adsorción a 5°C, 10°C, 20°C y 30°C de rodajas de berenjena secadas a 90°C.



Estas figuras muestran el incremento del contenido de humedad de equilibrio de rodajas de berenjena con el incremento de la actividad del agua, a temperatura constante, presentando una forma característica y típica de muchas isotermas de alimentos. (ver por ej. Labuza, 1968; McLaughlin y Magee, 1998; Timmermann y col., 2001; Viswanathan y col., 2003)

En las Tablas 7.1 y 7.2 se presentan las estimas de las constantes de los cuatro modelos previamente mencionados (BET, BET modificado, GAB y Ferro Fontán) obtenidos por regresión no lineal de los datos experimentales, utilizando las ecuaciones respectivas, a cada condición ensayada en todo el rango de a_w.

Tabla 7.1. Estimaciones de las constantes de los modelos de BET y BET modificado

T (°C)	Modelo	Constantes del modelo		%P
		C_b	M_{mb}	
5	BET	1.60	9.31	54.41
10		15.46	9.03	52.46
20		4.86	7.21	14.27
30		2.00	7.15	26.79
5	BET Mod.	1.89	15.83	19.79
10		4.81	17.40	17.36
20		1.47	17.57	8.55
30		1.54	15.73	6.09

Tabla 7.2. Estimaciones de las constantes de los modelos de GAB y Ferro Fontán

T (°C)	Modelo	Constantes del modelo			%P
		α	γ	r	
5	Ferro Fontán	0.242	1.323	0.679	4.45
10		0.113	1.129	1.187	7.18
20		0.206	1.201	0.674	8.54
30		0.193	1.236	0.704	7.18
		C_g	M_{mg}	K	%P
5	GAB	3.707	9.40	0.907	4.37
10		7.170	13.61	0.846	4.14
20		4.069	8.06	0.963	4.87
30		3.629	7.92	0.942	5.30

El grado de ajuste de los datos experimentales a los modelos de BET y BET modificado en todo el rango de a_w (0.1-0.9) no es adecuado (%P >10) en casi todos los casos. Por otro lado el modelo de GAB y el de Ferro Fontán presentaron un buen grado de ajuste (%P < 10) en todo el rango de a_w y temperaturas estudiados, presentando el primero el menor error, a todas las condiciones ensayadas.

En la Fig. 7.3 se presentan las curvas teóricas correspondientes a cada uno de los modelos matemáticos probados, utilizando los valores de las constantes hallados para cada modelo, a cada condición ensayada.

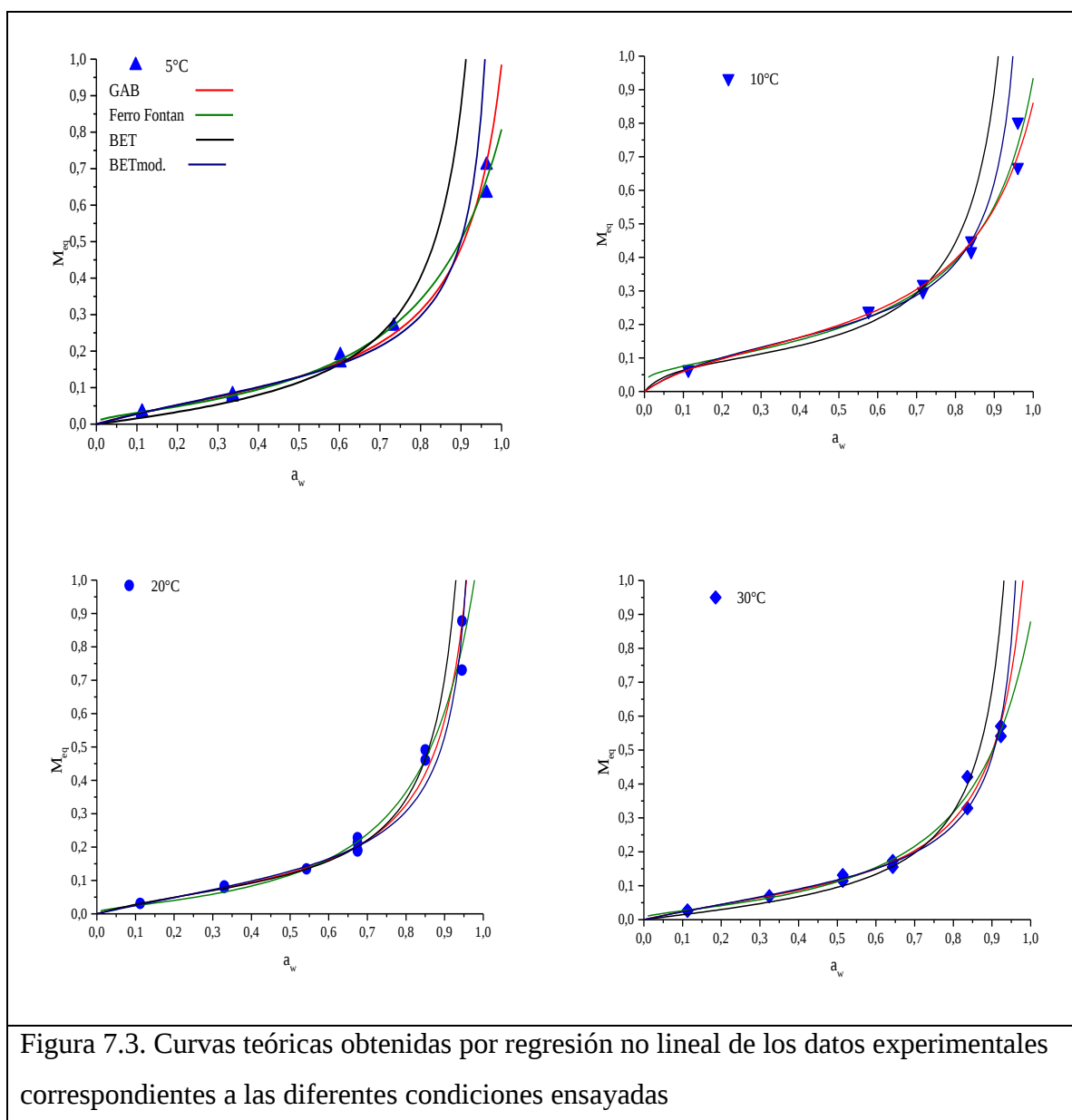


Figura 7.3. Curvas teóricas obtenidas por regresión no lineal de los datos experimentales correspondientes a las diferentes condiciones ensayadas

El contenido de humedad de la monocapa, M_{mb} y M_{mg} , disminuye a medida que aumenta la temperatura en el rango de 10 a 30°C. Este comportamiento ya ha sido reportado para al menos 100 tipos de alimentos y productos alimenticios por Iglesias y Chirife (1976 a, b). Palipane y Driscoll (1993) sugirieron que el aumento de temperatura provoca que algunas moléculas de agua alcancen ciertos niveles de energía que les permitiría abandonar sus sitios de sorción, provocando la disminución del contenido de humedad de equilibrio de la monocapa.

A medida que aumenta la temperatura de trabajo en el rango 10 a 30°C, la constante de Guggenheim, C_g , disminuye. Esto coincide con lo encontrado por Hyun y col. (1991) para pimientos rojos y Maroulis y col. (1988) para pasas de uva. Mientras que K presenta una relación variable con la temperatura, encontrándose dentro del rango propuesto por Lewicki (1997).

Del análisis de las Tablas 7.1 y 7.2 surge claramente que aquellos modelos de tres parámetros (GAB y Ferro Fontán) presentan un mayor grado de ajuste a los datos experimentales (%P=4.4-5.3 y %P=4.4-8.5%) que aquellos que poseen solamente dos parámetros (BET y BET modificado) (P=14-54% y P=6-19%), para el rango de temperaturas y a_w estudiado.

El modelo propuesto por GAB (van den Berg, 1981) es el que proporciona un mayor grado de ajuste a los datos experimentales, con un valor promedio de %P=4.3, lo que permitiría determinar el comportamiento de las rodajas de berenjenas deshidratadas cuando son expuestas a entornos con diferentes temperaturas y humedad relativa. Esto está de acuerdo con otros autores como Akanbi y col.,(2006) quienes encontraron que la ecuación de GAB era la que mejor describía las isotermas de tomate, así como McLaughlin y Magee (1998) para papas.

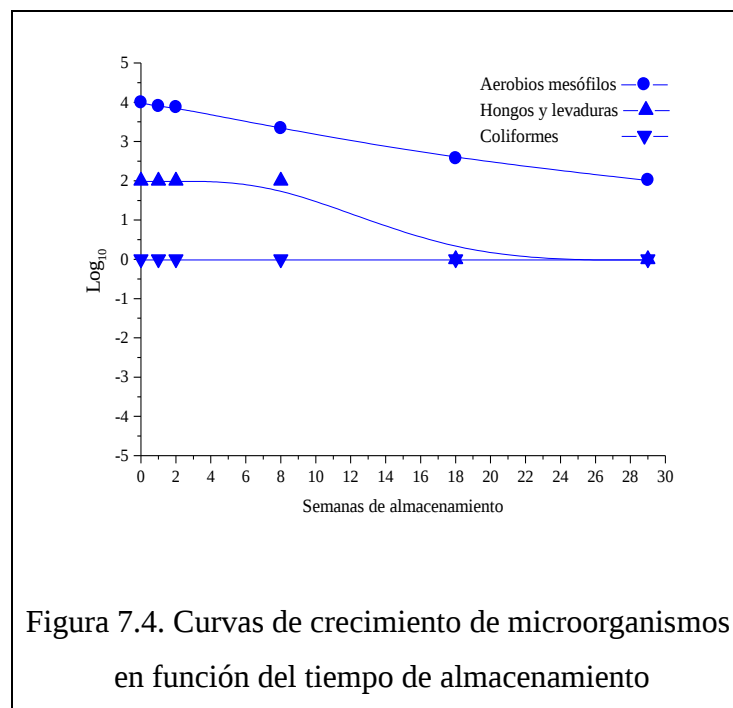
7.3 ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

En esta sección se presentan los resultados correspondientes al análisis microbiológico de rodajas de berenjena tratadas con metabisulfito de sodio 0.5 % p/v, secadas luego a 90 °C, envasadas al vacío y almacenadas a temperatura ambiente. (ítem 2.6.1 del Capítulo 2)

En la Fig. 7.4 se presentan las curvas de recuento de microorganismos aerobios mesófilos, coliformes totales y hongos y levaduras durante el almacenamiento a temperatura ambiente.

Se puede observar que a lo largo de los seis meses de almacenamiento, no se detectó crecimiento o presencia de coliformes y el recuento total de microorganismos aerobios mesófilos y mohos y levaduras decreció con el tiempo de almacenamiento. Respecto a las muestras control refrigeradas a - 22 °C, a las 18 semanas no hubo crecimiento de

coliformes totales ni de hongos y levaduras y el recuento de aerobios mesófilos fue de $4.85 \cdot 10^2$ ufc/g. m_s^S .



La carga microbiana inicial se encuentra por debajo de lo recomendado por el Código Alimentario Argentino (2002) para alimentos deshidratados que deben cocerse antes de ser consumidos. (Recuento de aerobios en placa a 37°C Max. $2 \cdot 10^5$ ufc/g. m_s^S ; Coliformes a 37°C (NMP) máx: 500/ g. m_s^S ; Hongos y levaduras: máx. $1 \cdot 10^4$ ufc/g. m_s^S).

Capítulo 8

RESULTADOS Y DISCUSION.

PARTE 6: Tratamiento Cinético

8.1. INTRODUCCION

Se entiende por *tratamiento cinético* al procesamiento de datos experimentales provenientes de laboratorio mediante el empleo del método científico, con el propósito de:

- (a) Procurar interpretar los cambios fisicoquímicos que experimentan las distintas variables del sistema durante su evolución.
- (b) Sintetizar cuantitativamente en términos matemáticos los cambios observados, a través de uno o más modelos cinéticos.
- (c) Seleccionar, del mejor modo posible, el/los modelo/s más probable/s de todos los que hayan sido formulados.

Las columnas fundamentales sobre las que se basa el *tratamiento cinético*, son las siguientes:

- I. Definición del objetivo que debe alcanzarse mediante la experimentación.
- II. Caracterización del proceso en sí, y del sistema experimental que habrá de utilizarse.
- III. Selección de métodos fisicoquímicos que se consideren más apropiados para seguir cuantitativamente los cambios que experimenten cada una de las variables que integran el sistema experimental.
- IV. Diseño de los experimentos que habrán de realizarse, procurando obtener la máxima información posible con el menor número de experimentos.
- V. Modelado del sistema experimental, a partir de sus correspondientes ecuaciones de balance.
- VI. Formulación de modelos cinéticos, tales que tomen en cuenta los mecanismos intrínsecos que gobiernan la velocidad del proceso y los cambios estructurales que se observen.
- VII. Selección de métodos de cálculo numérico que habrán de emplearse durante el procesamiento de los datos experimentales.
- VIII. Selección de los modelos más probables.

8.2. OBJETIVO

Si bien es cierto que el estudio cinético de todo proceso nuevo que debe encararse puede presentar a priori múltiples objetivos, en lo que sigue de este Trabajo de Tesis Doctoral, se adoptará como más importante al siguiente:

“A través de datos experimentales cuidadosamente realizados sobre la base de una apropiada planificación experimental previa, se procurará adquirir, y resumir en un modelo matemático, el conocimiento básico que se necesita para lograr un diseño más exacto y optimizado del futuro proceso”.

El tratamiento cinético de datos provenientes de un proceso de secado depende de las características mecánicas y dinámicas del sistema experimental que se utilice. Cuando se emplea un sistema experimental de tipo discontinuo, entonces el conjunto de datos experimentales secuenciales deben confrontarse con modelos matemáticos que predigan los cambios que experimenten las variables *dependientes* del sistema en función del tiempo que dura el proceso, y de los distintos factores que se hallan involucrados en el mismo.

Se debe hacer notar que las variables *dependientes* (también denominadas *respuestas* del sistema), se hallan directamente vinculadas con cada una de las propiedades fisicoquímicas adjuntas a cada una de las respectivas fases que integran el sistema.

8.3. CARACTERIZACION DEL PROCESO

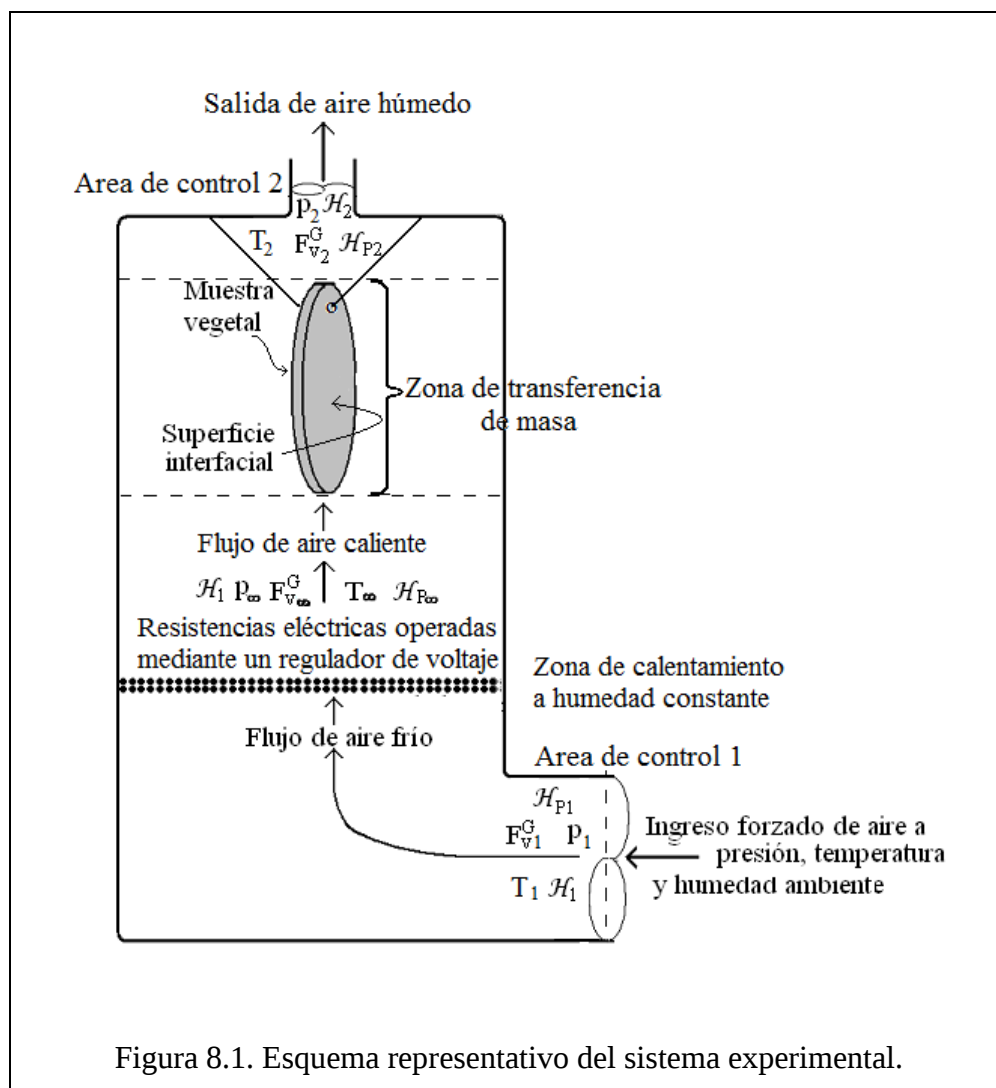
Tal como ha sido indicado previamente en el Capítulo 3, *el secado* se define como la operación mediante la cual se elimina humedad de un producto dado. Es el método más antiguo de preservación de alimentos practicado por el hombre, quién durante miles de años lo ha empleado en el secado y/o ahumado de carne, pescado, frutas y vegetales, para su propia alimentación durante los periodos de escasez.

Existen diversos tipos de equipos para secar vegetales, los cuales van desde los clásicos secadores discontinuos tipo bandeja hasta los continuos de tipo cinta transportadora. En la mayoría de los casos, la elección del tipo de equipo de procesamiento queda sujeta a los requisitos que debe cumplir el producto final, a los costos operativos del proceso y a las restricciones de impacto ambiental.

8.4. CARACTERIZACION DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

En la Fig. 8.1 se presenta un esquema representativo del sistema experimental que se utilizó durante el secado de rodajas individuales de berenjena. En dicho esquema puede observarse que el sistema en estudio está integrado por dos subsistemas: uno que corresponde a la fase gaseosa, y otro a la muestra vegetal húmeda.

Ambos subsistemas se hallan en contacto directo y mutuamente interrelacionados a través de una *superficie interfacial* común que los separa; y, a su vez, se comporta como una superficie *abierta*, de modo tal que a través de ella pueden establecerse flujos de materia entre ambos subsistemas.

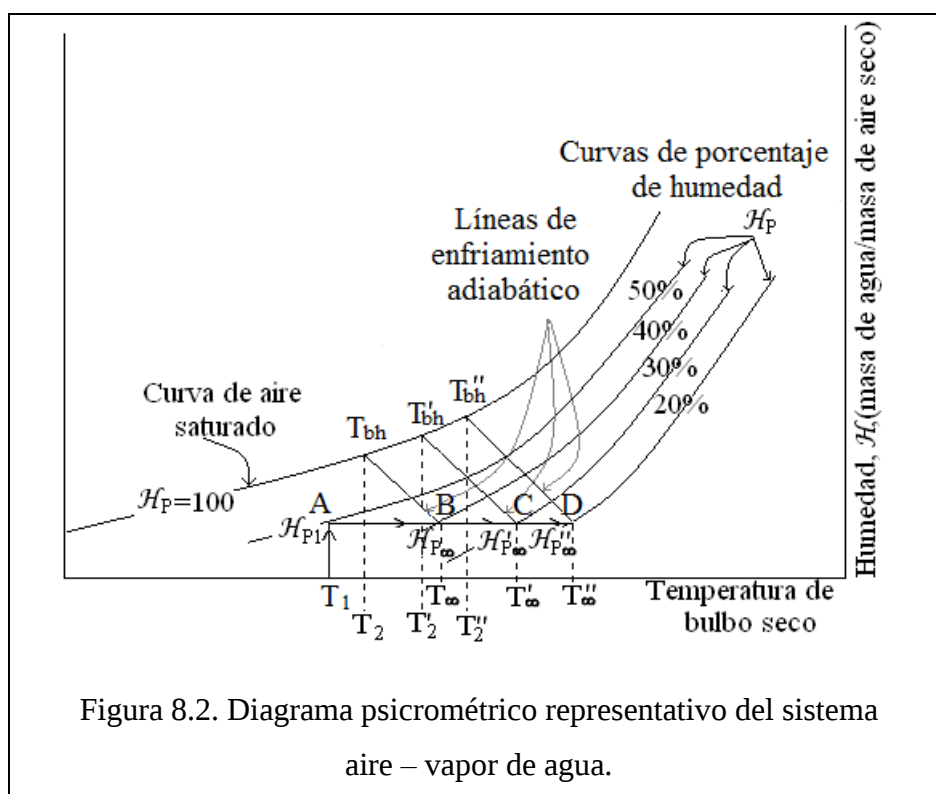


8.4.1. Caracterización del subsistema gaseoso

El primer subsistema corresponde a una fase homogénea gaseosa, representada por un flujo continuo de aire que circula por el interior del sistema experimental. Tal como puede verse en la Fig. 8.1, el recorrido de este subsistema es el siguiente:

- 1) El flujo de aire ingresa al sistema a través del **Área de control 1**, y se mantiene estacionario a condiciones preestablecidas y perfectamente medidas de las siguientes variables operativas: a) flujo volumétrico, F_{V1}^G ; b) presión total, p_1 ; c) temperatura de bulbo seco, T_1 ; d) temperatura de bulbo húmedo, T_{bh1} ; e) contenido de humedad, $\mathcal{H}_1$ (determinada a partir de datos conocidos de T_1 y de T_{bh1}); y, f) humedad porcentual, $\mathcal{H}_{p1}$ (determinada mediante el empleo de un diagrama psicrométrico aire – vapor de agua dado a presión p_1).
- 2) Una vez que el flujo de aire ha ingresado al sistema, es forzado a pasar por una **Zona de calentamiento**, la cual está constituida por un conjunto de resistencias eléctricas, cuyo voltaje es regulado y controlado de modo tal que, a la salida de esta zona, la temperatura (de bulbo seco) del flujo de aire alcance el valor previamente programado para el factor T. Su valor se indicará como: T_∞ , T'_∞ , T''_∞ , ..., según los distintos niveles a los que haya sido programado previamente. Durante el recorrido de esta zona, el aire sólo aumenta la temperatura mientras su contenido de humedad se mantiene constante.
- 3) A la salida de la **Zona de calentamiento**, el estado de las variables adjuntas al flujo de aire son: a) flujo volumétrico, $F_{V\infty}^G$; b) presión total del sistema, p_∞ ; c) temperatura de bulbo seco, T_∞ ; d) contenido de humedad, $\mathcal{H}_1$, (dado que el proceso de calentamiento se realiza a humedad constante); e) humedad porcentual, $\mathcal{H}_{p\infty}$, cuyo valor debe estimarse mediante el uso de un diagrama psicrométrico, siguiendo un procedimiento similar al que se muestra en el esquema de la Fig. 8.2.
- 4) Continuando con su recorrido, el flujo de aire caliente ingresa a la **Zona de transferencia de masa**. En términos específicos, esta zona queda restringida sólo a la superficie interfacial que encierra a la muestra vegetal húmeda. En esta zona el aire tiene un contacto interactivo con la muestra vegetal de la berenjena, el cual da como resultado un fenómeno mutuo de transferencia convectiva de masa.

- 5) Finalmente, el flujo de aire ligeramente enriquecido por el vapor de agua que se ha transferido desde la muestra vegetal, sale del sistema a través del **Área de control 2**, a las siguientes condiciones de estado de sus variables adjuntas: a) flujo volumétrico, F_{V2}^G ; b) presión total medida a la de salida del sistema, p_2 ; c) temperatura de bulbo seco, T_2 ; d) contenido de humedad, $\mathcal{H}_2$ (cuyo valor sólo puede estimarse si se conoce el de la temperatura de bulbo húmedo, T_{bh2}); y, e) humedad porcentual, $\mathcal{H}_2$ (también sólo puede estimarse si se conoce el valor de $\mathcal{H}_2$ y se dispone de un diagrama psicrométrico aire – vapor de agua).



8.4.2. Variables fisicoquímicas adjuntas al subsistema gaseoso

1. Humedad.

La humedad $\mathcal{H}$ de una mezcla de aire – vapor de agua es definida como la masa de vapor de agua que se halla contenida en la unidad de masa de aire seco:

$$\mathcal{H} = \frac{m_W^G}{m_{As}^G} = \frac{m_W^G}{m_A^G - m_W^G} \quad (8.1)$$

donde: m_A^G , m_W^G y m_{As}^G , son la masa de aire húmedo, de vapor de agua que contiene el aire húmedo y de aire seco, respectivamente.

Usando el peso molecular del agua igual a 18.02 (g/gmol) o (kg/kmol) y de 28.97 (g/gmol) o (kg/kmol) para el aire, la ec.(8.1) también puede expresarse como:

$$\mathcal{H} = \frac{18.02 n_W^G}{28.97 (n_A^G - n_W^G)} = \frac{18.02 p_W}{28.97 (p - p_W)} \quad (8.2)$$

donde: n_A^G y n_W^G , son moles de aire húmedo y de vapor de agua, respectivamente.

La humedad así definida, depende únicamente de la presión parcial de vapor de agua en el aire húmedo, p_W , y de la presión total del sistema, p .

2. Aire saturado.

Aire saturado, es aquél cuya presión de vapor de agua está en equilibrio con agua líquida a condiciones de presión y temperatura dadas. En esta mezcla la presión parcial del vapor de agua es igual a la presión de vapor del agua pura a la temperatura dada, p_{Wsat} . Por consiguiente, la humedad de saturación es:

$$\mathcal{H}_{sat} = \frac{18.02 p_{Wsat}}{28.97 (p - p_{Wsat})} \quad (8.3)$$

3. Porcentaje de humedad.

El porcentaje de humedad es definido como 100 veces la humedad actual del aire dividida por la humedad de saturación a la misma presión y temperatura:

$$\mathcal{H}_p = 100 \frac{\mathcal{H}}{\mathcal{H}_{sat}} = 100 \frac{p_W (p - p_{Wsat})}{p_{Wsat} (p - p_W)} \quad (8.4)$$

4. Porcentaje de humedad relativa.

Usando las presiones parciales, la cantidad de saturación de una mezcla de aire – vapor de agua también es dada como porcentaje de humedad relativa:

$$\mathcal{H}_R = 100 \frac{P_w}{P_{w\text{sat}}} \quad (8.5)$$

8.4.3. Caracterización de la muestra vegetal

El segundo subsistema que integra el sistema experimental de la Fig. 8.1, corresponde a la muestra vegetal húmeda que se halla expuesta al flujo continuo de aire.

Si se analizara microscópicamente la muestra vegetal húmeda, entonces podría observarse que en realidad la misma constituye un verdadero sistema heterogéneo, el cual está formado por: una fase sólida elástica porosa y una fase líquida que se halla retenida en el interior de los poros, y está compuesta por una mezcla de agua y de componentes químicos volátiles.

Mediante un análisis cualitativo de la composición de la masa total de la muestra vegetal húmeda, m_{tot}^S , se puede deducir que la misma está constituida del modo siguiente:

- 1) Por la masa de sólido seco, m_s^S , la cual corresponde a la estructura celular intrínseca de la muestra. También es denominada masa de sólido seco.
- 2) Más la masa de agua líquida, m_w^L , que se encuentra retenida en el interior de la estructura celular de la muestra vegetal.
- 3) Más las masas de distintas especies químicas aromáticas volatilizables que se encuentran mezclada con el agua líquida, a las que, sin entrar aquí a especificarlas cualitativa ni cuantitativamente, se resumirán como: m_v^L .

Es decir que en cualquier instante, la masa total de cada una de las muestras de vegetal húmedo que se ha utilizado en cada uno de los experimentos, está dada por la siguiente ecuación:

$$m_{\text{tot}}^S = m_s^S + m_w^L + m_v^L \quad (8.6)$$

8.4.4. Conclusiones acerca del sistema experimental

Como conclusión importante del análisis que se ha realizado a lo largo del punto 8.4, se tiene que el sistema experimental está constituido por dos subsistemas húmedos que

se encuentran en contacto mutuo por una superficie interfacial común que los separa, a través de la de cual algunas especies químicas fluidas establecen flujos difusivos.

Esta conclusión permite inferir que deberán tomarse los recaudos necesarios para definir claramente el contenido de humedad que corresponde a cada uno de los subsistemas que se hallan en contacto.

8.5. MODELADO DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

Para modelar ambos subsistemas se empleará aquí el modelo macroscópico. La selección de este modelo se realizó tomando en cuenta la caracterización del sistema experimental que se utilizó y el grado de precisión con el que se midieron sus distintas variables fisicoquímicas adjuntas a cada uno del ellos.

8.5.1 Modelado de la fase gaseosa

- Balance de masa de aire húmedo:

$$\frac{dm_A^G}{dt} = \rho_{A1}^G v_{A1}^G A_1 - \rho_{A2}^G v_{A2}^G A_2 + \sum_{i=A}^I w_i^G|_{\Omega} \quad (8.7)$$

- Balance de masa del vapor de agua:

$$\frac{dm_W^G}{dt} = \rho_{W1}^G v_{W1}^G A_1 - \rho_{W2}^G v_{W2}^G A_2 + w_W^G|_{\Omega} \quad (8.8)$$

- Balance de masa de aire seco:

$$\frac{dm_{As}^G}{dt} = \rho_{As1}^G v_{As1}^G A_1 - \rho_{As2}^G v_{As2}^G A_2 = 0 \quad (8.9)$$

donde: ρ_{Ak}^G , densidad del aire húmedo correspondiente a las áreas de ingreso (k=1) y de salida (k=2); v_{Ak}^G , velocidad media del aire húmedo en las áreas de ingreso (k=1) y de salida (k=2) del sistema experimental; Ω , superficie interfacial; $w_i^G|_{\Omega}$, flujo másico de la i-ésima especie química gaseosa evaluada sobre Ω .

Debe hacerse notar que en la formulación de la ec.(8.9) se ha supuesto que la superficie interfacial, Ω , es cerrada a todos los elementos químicos que integran la mezcla de aire seco; y que el flujo de aire es estacionario.

Haciendo uso de las siguientes relaciones de vínculo:

$$F_{mik}^f = \rho_{ik}^f v_{ik}^f A_k \quad F_{vik}^f = v_{ik}^f A_k \quad (8.10a, b)$$

$$w_{tot}^f = \sum_{i=A}^I w_i^f|_{\Omega} \quad w_i^f = w_i^f|_{\Omega} \quad (8.10c, d)$$

las ecs. (8.7) a (8.9) precedentes, pueden expresarse ahora del modo siguiente:

$$\begin{aligned} \frac{dm_A^G}{dt} &= F_{mA1}^G - F_{mA2}^G + w_{tot}^G \\ &= \rho_{A1}^G F_{VA1}^G - \rho_{A2}^G F_{VA2}^G + w_{tot}^G \end{aligned} \quad (8.11)$$

$$\begin{aligned} \frac{dm_W^G}{dt} &= F_{mW1}^G - F_{mW2}^G + w_W^G \\ &= \rho_{W1}^G F_{VW1}^G - \rho_{W2}^G F_{VW2}^G + w_W^G \end{aligned} \quad (8.12)$$

$$F_{mAs1}^G = F_{mAs2}^G = \rho_{As1}^G F_{VAs1}^G = \rho_{As2}^G F_{VAs2}^G \quad (8.13)$$

donde: F_{mik}^f y F_{vik}^f , son el caudal másico y flujo volumétrico, respectivamente, de la i -ésima especie química que se halla en la fase fluida f , ($f=G$, fase gas; $f=L$, fase líquida), evaluados sobre áreas de control abiertas a flujos convectivos del sistema ($k=1$, área de ingreso; $k=2$; área de salida).

La ec.(8.13) es una restricción que debe satisfacer el sistema experimental que se ha utilizado, y sólo es válida cuando el flujo de aire se mantiene estacionario.

8.5.2 Modelado de la muestra vegetal húmeda

Se hace notar que, desde un punto de vista macroscópico, durante el proceso de secado la muestra vegetal húmeda se comporta como si fuera un subsistema único, cuyas propiedades fisicoquímicas adjuntas a cada una de las fases que la componen resultan difíciles de especificar con el mayor grado de detalle y precisión. Por tal motivo, en estos casos, lo más aconsejable es aplicar sobre ella un balance de masa total, teniendo presente

que a través de su superficie interfacial adjunta sólo pueden tener lugar flujos difusivos las especies químicas fluidas:

$$\begin{aligned}\frac{dm_{\text{tot}}^S}{dt} &= -w_{\text{tot}}^G \\ &= -(w_W^G + w_V^G)\end{aligned}\tag{8.14}$$

Siendo m_{tot}^S la masa total de la muestra vegetal húmeda, la cual ha sido definida previamente mediante la ec. (8.6).

Mediante un análisis detallado de los datos experimentales que se obtuvieron durante el proceso de secado, fue posible extraer las siguientes conclusiones, las cuales se adoptarán aquí como hipótesis de modelado:

(H1) La masa sólida adjunta a la muestra vegetal es, a los efectos prácticos, un invariante del sistema. Por consiguiente, la misma puede expresarse como:

$$m_s^S \cong m_{s^0}^S\tag{8.15}$$

(H2) La masa de las especies químicas aromáticas que contiene el vegetal, a lo largo del proceso, es sumamente pequeña cuando se la compara con la masa de agua que contiene la muestra vegetal húmeda. Es decir que: $m_W^L \gg m_V^L$. Por consiguiente, sin introducir un error grosero en la formulación del sistema, se puede asumir que:

$$m_V^L \cong 0\tag{8.16}$$

(H3) Teniendo presente la hipótesis (H2), mediante un razonamiento comparativo similar, con respecto de los flujo máxicos: w_W^G y w_V^G , podría concluirse que para cualquier valor de t:

$$w_V^G \cong 0\tag{8.17}$$

(H4) Se supondrá que la temperatura media de la muestra vegetal se mantiene constante e igual a: T_M .

Adoptando este conjunto de hipótesis, su introducción en la ec.(8.14) permite reducirla a la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}\frac{d(m_{W^o}^L - m_W^L)}{dt} &= -w_W^G \\ &= -n_W^{(m_i)} \Omega\end{aligned}\quad (8.18)$$

Finalmente, como bien puede inferirse de la ec. (8.18), el modelado del flujo másico, w_W^G (o velocidad de secado de la muestra vegetal), puede realizarse a partir de la variación que experimenta la masa de la muestra vegetal húmeda.

8.5.3 Ecuación fundamental del modelado

La ec.(8.18) expresa la velocidad de cambio macroscópico que experimenta la propiedad extensiva: m_W^L . La misma, a los efectos de modelar un proceso de secado discontinuo de un vegetal, tal cual como está expresada no resulta de mucha utilidad. En efecto, para estos casos lo que se necesita es contar con una ecuación que permita cuantificar la velocidad de cambio macroscópico que experimente alguna propiedad intensiva asociada a m_W^L . Para ello puede optarse entre dividirla por el volumen inicial de la muestra vegetal, $V_{tot^o}^S$, o por su masa inicial, $m_{tot^o}^S$. Tanto $V_{tot^o}^S$ como $m_{tot^o}^S$, son factores invariantes del sistema, por lo que cualquiera de ellos puede utilizarse para transformar a la variable extensiva m_W^L en una variable intensiva. En este caso, se eligió a la masa inicial de la muestra vegetal húmeda, $m_{tot^o}^S$, por cuanto su magnitud puede medirse con mayor precisión, y por consiguiente tiene adjunto un error experimental menor.

Dividiendo ambos miembros de la ec.(8.18) por $m_{tot^o}^S$, entonces la misma expresará la velocidad de cambio macroscópico que experimenta una variable intensiva por la masa inicial de la muestra. Es decir:

$$\begin{aligned}\frac{dX}{dt} &= -\frac{w_W^G}{m_{tot^o}^S} \\ &= -\frac{n_W^{(m_i)} \Omega}{m_{tot^o}^S}\end{aligned}\quad (8.19)$$

En la ec.(8.19) se ha definido a la variable intensiva X , del modo siguiente:

$$X = \frac{m_{tot^o}^S - m_{tot}^S}{m_{tot^o}^S} = \frac{m_{W^o}^L - m_W^L}{m_{tot^o}^S} \quad (8.20)$$

donde: X , es la masa de agua evaporada con respecto de la masa total inicial de la muestra vegetal húmeda. También puede definirse como: grado de secado de la muestra vegetal.

Debe hacerse notar que la ec.(8.19) es *fundamental* para el modelado de secado de vegetales, por los siguientes motivos: 1º) porque describe la velocidad de cambio macroscópico que experimenta la variable intensiva: X ; 2º) porque ha sido deducida independientemente de las fuerzas impulsoras que puedan hallarse involucradas en la densidad de flujo másico de vapor de agua: $n_w^{(m_i)}$; 3º) porque ha sido deducida independientemente de los cambios estructurales que pueda experimentar el área de la superficie interfacial de la muestra vegetal húmeda: Ω .

En lo que sigue de este Trabajo de Tesis Doctoral, habrá de tenerse en mente que la ec.(8.19) es una de las ecuaciones necesarias para describir los cambios que experimenta un sistema de secado que satisface las hipótesis (H1) a (H4), que fueron explicitadas previamente, pero aún no es suficiente. En efecto, para describir completamente el sistema, además de ella se requiere: a) una ecuación que tome en cuenta los cambios estructurales que va experimentando la muestra vegetal a medida que avanza su tiempo de procesamiento, y; b) otra ecuación que tome en cuenta los mecanismos cinéticos que se hallan involucrados en la densidad de flujo másico $n_w^{(m_i)}$. Ninguna de estas ecuaciones puede formularse a priori por cuanto se desconoce aún cómo serán los cambios que experimentará la muestra vegetal. Lo único que se sabe es que estos cambios dependen intrínsecamente de las propiedades fisicoquímicas y estructurales adjuntas a la muestra vegetal y al flujo de aire que circula alrededor de ella y su correspondiente contenido de humedad. Estos cambios sólo podrán inferirse una vez que se realizaron los experimentos, se hayan procesado los resultados de los mismos y se disponga del modelo o de los modelos con mayor probabilidad adjunta.

8.6. CARACTERIZACIÓN DE LOS MODELOS CINETICOS

Los modelos cinéticos que se utilizan frecuentemente para cuantificar la velocidad de los cambios que se observan en un sistema experimental dado, pueden clasificarse en tres grandes grupos. A saber:

- a) Modelos *teóricos*.

- b) Modelos *empíricos*.
- c) Modelos *semiteóricos*.

Los modelos *teóricos*, comúnmente suelen expresarse mediante un conjunto de ecuaciones matemáticas que se formulan sobre la base de alguna teoría científica que describe cualitativamente los cambios fisicoquímicos y estructurales que experimentaría un sistema dado. En general, la formulación de estos modelos suele basarse sobre principios fundamentales de la *termodinámica de los procesos irreversibles*, y da como resultado un conjunto acoplado de ecuaciones no lineales a derivadas parciales. Respecto de esta clase de modelos, se debe destacar aquí la publicación de Hernández Rodríguez y Quinto Diez (2005), quiénes realizaron un cuidadoso estudio acerca de los distintos modelos fenomenológicos que fueron propuestos por diferentes investigadores, entre los años 1921 y 2005. También es digna de destacar la publicación de Kowalski y Strumillo (1996), quiénes presentan una descripción generalizada completa de los procesos de secado de vegetales. Si bien es cierto que estos modelos tienen de base un buen soporte teórico, cabe hacer notar que su aplicación en la resolución de problemas concretos de secado suele presentar serios inconvenientes matemáticos que son difíciles de resolver. Por tal motivo, en cierto sentido, puede decirse que la principal aplicación de estos modelos es brindar una descripción fenomenológica global del problema.

En cambio, los modelos *empíricos*, son simplemente ecuaciones matemáticas que se formulan libremente sin tomar en cuenta restricción alguna. Desde el punto de vista de la matemática, estos modelos resultan más fáciles de tratar, motivo por el cual se utilizan frecuentemente en diferentes ramas tecnológicas.

Finalmente, los modelos *semiteóricos*, se obtienen a partir de modelos *teóricos* que describen adecuadamente los cambios fisicoquímicos y estructurales que experimenta el sistema, mediante la introducción de hipótesis simplificadoras coherentes en las distintas ecuaciones. Desde el punto de vista matemático, generalmente, estos modelos suelen resultar más fáciles de tratar, pero requieren un buen soporte teórico y experimental que permita justificar las hipótesis simplificadoras que se introdujeron durante su formulación. El profesor Octave Levenspiel (1988) y (2002), es un gran defensor de este tipo de modelos, y alienta fervientemente su desarrollo y utilización en el campo de la ingeniería química y disciplinas afines.

En los tres capítulos siguientes de este Trabajo de Tesis Doctoral, se analizarán con un mayor grado de detalle los distintos modelos cinéticos que han sido propuestos para interpretar la cinética del secado de vegetales; y se discutirán y aplicarán los distintos procedimientos que han sido sugeridos para el tratamiento cinético de los datos experimentales.

Capítulo 9

RESULTADOS Y DISCUSION. PARTE 7.

Tratamiento cinético mediante la segunda ley de Fick

9.1. INTRODUCCION

Debido a la gran variedad de materiales que se procesan en secaderos industriales y a su amplia diversidad, no existe aún una única teoría de secado que cubra todos los casos que pueden presentarse. Por tal motivo no se dispone de herramientas teóricas que permitan dar al problema un tratamiento unificado. (Mc Cabe y Smith, 1968; Hernández Rodríguez y Quinto Diez, 2005).

Los primeros intentos realizados para tratar de explicar el proceso de secado, así como los mecanismos que intervienen en el mismo, datan de fines del siglo XIX y comienzos del siglo XX. A partir de entonces se han propuesto diversas teorías que buscan describir los mecanismos cinéticos que se hallan involucrados en este proceso. Como resultado de ello se tiene la formulación de diversos modelos matemáticos, muchos de ellos desarrollados con base en el conocimiento empírico. Sin embargo, también se ha recurrido a la *termodinámica* y a los *fenómenos de transporte*, para plantear modelos que describan al proceso en cuestión, de una manera más formal. En estos casos, no solo se consideran las condiciones del medio secante, sino también los mecanismos de movimiento interno de humedad del vegetal y sus efectos, lo que conlleva a la formulación de sistemas de ecuaciones cuya solución resulta muy compleja. (Hernández Rodríguez y Quinto Diez, 2005)

Un perfil completo (tradicional) de secado consiste en considerar que el proceso se realiza en dos etapas, a saber: 1º) correspondiente al periodo de velocidad constante de secado; y 2º) correspondiente al periodo de velocidad decreciente (ver sección 3.1). Sin embargo, no todos los sólidos siguen este patrón de comportamiento. En la mayoría de las aplicaciones prácticas, la etapa de velocidad decreciente es la predominante. (Dincer y Dost, 1995).

Dependiendo de la forma de la curva de secado, se han propuesto diferentes tipos de mecanismos. Así por ej.: Brennan y col., 1981; Geankoplis, 1998; Barbosa- Cánovas y Vega- Mercado, 2000; presentan un sumario de los mecanismos de transferencia de agua posibles durante el proceso de secado, a saber: movimiento de agua bajo fuerzas capilares; difusión del líquido por gradiente de concentración; difusión superficial; difusión de vapor de agua en los poros llenos de aire; flujo debido a gradientes de presión y flujo debido a la vaporización-condensación del vapor de agua.

Considerando la teoría de la difusión, se supone que la humedad fluye por difusión a través del sólido, generalmente no poroso, aunque el mecanismo real sea probablemente más complejo que una simple difusión. La difusión es una característica de los materiales que se secan lentamente, donde la resistencia a la transferencia de materia, del vapor de agua, desde la superficie del sólido al aire, es generalmente despreciable, controlando la velocidad global de secado. La humedad de la superficie tiene, por consiguiente un valor muy próximo al de equilibrio. La velocidad del aire tiene poco o ningún efecto y su influencia en el proceso se debe esencialmente a la que ejerce sobre la humedad de equilibrio del sólido. Puesto que la difusividad aumenta con la temperatura, la velocidad de secado aumenta también con la temperatura del sólido. (Martínez Pavez, 2002; Mc Cabe, Smith, 1968).

Durante el secado de sólidos porosos, se considera que la humedad libre se desplaza a través de capilares o espacios vacíos de los sólidos, por acción capilar. Es decir, que a medida que se evapora el agua se forma un menisco de líquido en cada poro en el interior del sólido, lo que origina las fuerzas capilares por la tensión interfacial entre el agua y el sólido. Estas fuerzas constituyen el impulso para desplazar el agua a través de los poros hacia la superficie. A medida que avanza el secado, llega un momento donde no hay suficiente agua para mantener una película continua en todos los poros y la velocidad de secado disminuye repentinamente al principio del segundo periodo de velocidad decreciente. En algunos sólidos de poros muy finos, el segundo periodo de velocidad decreciente de la curva de velocidad de secado, puede obedecer la ley de difusión caso contrario de sólidos con poros muy grandes. (Martínez Pavez, 2002; Mc Cabe, Smith, 1968).

Diversos investigadores han informado que algunos alimentos durante el proceso de secado, exhiben únicamente el periodo de velocidad decreciente, por ejemplo Mulet y col. (1989) para zanahorias, Yapar y col. (1990) para hongos en rodajas, Vaccarezza y col. (1974), Bon y col. (1997), para papas, entre otros. Por otra parte, Pabis (1999) evidenció la existencia del periodo de velocidad constante durante el secado de hongos, ajo, zanahorias y cebolla utilizando un modelo matemático basado en las leyes de intercambio externo de calor y agua.

Los modelos cinéticos utilizados para estudiar el secado de diferentes sustancias, en el período de velocidad decreciente, según Ruiz-López y colaboradores (2004), Hernández y col. (2000) y Zogzas y Maroulis (1996), se distribuyen en dos tendencias bien definidas.

En primera instancia se encuentran los llamados modelos simplificados, a través de los cuales se evalúa la difusividad del agua a partir de un modelo que proviene de la resolución analítica de la segunda ley de Fick, tomando en cuenta la contracción de volumen que experimente la muestra, y sujeto a las hipótesis siguientes: 1) proceso de secado isotérmico; 2) el coeficiente de transferencia de masa superficial es lo suficientemente alto como para que el contenido de humedad en la superficie esté en equilibrio con las condiciones del aire; 3) las condiciones de aire de secado son constantes; 4) la difusividad efectiva del agua es constante, independiente del contenido de humedad del material y es unidireccional; 5) la resistencia externa a la transferencia de masa es despreciable. (ver por ej.: Lamberg, 1989; Lopez, Virseda y Abril, 1995; Giovanelli y col., 2002; Hawlader y col., 1991; Hernández y col., 2000).

En segundo lugar se encuentran los llamados modelos detallados, en los que la cinética de secado es considerada una transferencia simultánea de calor y materia; y su importancia radica en el aporte al conocimiento científico respecto del fenómeno de secado de alimentos, ya que la aplicación práctica de los mismos al diseño o simulación del proceso de secado, es poco viable. El único camino posible para resolverlos, es recurrir al auxilio de métodos de cálculo numérico, tales como: el método de diferencias finitas o elementos finitos; el método de los residuos ponderados; principios de variación; etc. (Husain y col., 1972; Balaban y Pigott, 1988; Sereno y Medeiros., 1990; Maroulis y col., 1995; Rovedo y col, 1995; Wang y Brennan, 1995b; Hawlader y col., 1999).

Diversos autores consideran que *la migración de la humedad contenida en un alimento por difusión*, es el mecanismo principalmente planteado en el secado de la mayoría de vegetales y otros productos alimenticios. (Chirife, 1983; Lomauro, Bakshi y Labuza, 1985; Balaban y Pigott, 1988; Karathanos, Villalobos y Saravacos, 1990; Zogzas y Maroulis, 1996; Akanbi y col., 2005). Es por ello, que el método tradicional para el estudio de la transferencia de masa en estado no estacionario para el secado de productos agrícolas, considerados como sólidos húmedos, es la aplicación de la solución de la segunda ley de Fick, la que para el caso de un sistema unidimensional se expresa mediante la ec. (9.1), (Vega y col., 2001a y b):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 M}{\partial \xi^2} \quad (9.1)$$

donde: ξ , es la coordenada interna del subsistema sólido húmedo en la que tiene lugar la difusión; D_{ef} , es el coeficiente de difusión efectiva del agua en el sólido húmedo.

La ec. (9.1) puede usarse en aquellos casos en los que el mecanismo de control de la velocidad de secado es la difusión de humedad. (Marinos-Kouris y Maroulis, 1995).

El coeficiente D_{ef} es una propiedad fisicoquímica importante que debe tenerse en cuenta para los cálculos y el modelado de diversos procesos en la industria de alimentos, como ser: secado, rehidratación, envasado y almacenamiento. Dependiendo de la forma del material vegetal, se pueden encontrar en la bibliografía diferentes soluciones a la ec. (9.1). (ver por ej. Barbosa-Cánovas, Vega-Mercado, 2000; Bon y col., 1997)

La predicción teórica de D_{ef} en materiales tan complejos como los alimentos aún no es factible, se hace necesaria su determinación experimental. Al respecto, Marinos-Kouris y Maroulis (1995), recopilaron diferentes métodos para la determinación del coeficiente de difusividad efectiva del agua en alimentos, que han sido desarrollados en primera instancia para materiales poliméricos, como ser: a través de la cinética de sorción, impregnación, curvas de concentración distancia, por medio de técnicas de secado (métodos simplificados, de régimen regular, solución numérica), entre otros. Los métodos simplificados, de régimen regular y los de análisis de regresión son particularmente relevantes para el proceso de secado. En ellos, las muestras deben ser colocadas en un secadero y la difusividad del agua es estimada a partir de los datos experimentales de secado, haciendo una serie de simplificaciones.

En base a lo anteriormente expuesto, la solución de la ecuación de la segunda ley de Fick, tal como ha sido señalado por: Mc. Cabe y Smith, 1968; para el caso de una lámina de espesor “e”, es la siguiente

$$M_r = \frac{M - M_{eq}}{M^0 - M_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(\frac{-(2n-1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{e^2}\right) \quad (9.2)$$

donde: M_r , es el contenido agua humedad libre de la muestra vegetal (masa de agua libre sin evaporar respecto de su masa de agua libre inicial).

Mulet (1994) luego de testear diferentes modelos detallados con diferente grado de complejidad al secado de zanahorias y papas, concluyó que el factor principal que debe considerarse para el modelado del secado de un material, es el encogimiento del mismo. La variación de la forma y tamaño de los alimentos durante el proceso de secado es evidente en muchos de ellos y ha sido reportado por numerosos investigadores (Lozano, Rostein y Urbicain, 1983; Balaban y Pigott, 1988; Mulet 1994; Sjöholm y Gekas, 1995; Wang y Brennan 1995; Pabis y Jaros, 2002). Este fenómeno es significativo en el secado difusional, ya que como consecuencia del mismo, se produce una variación en la distancia que recorrerán las moléculas de agua durante el proceso de secado.

Respecto del tratamiento de modelos que tienen en cuenta el encogimiento del material vegetal en función de la humedad de la muestra vegetal, son de destacar los esfuerzos de Hawlader y colaboradores (1991), quienes modelaron el secado de rodajas de tomate en bandejas en un rango de temperatura de 40 a 80°C, a distintas velocidades de aire (0.4 a 1.8 m/s). Para el cálculo del coeficiente de difusividad efectiva, realizaron una serie de consideraciones: 1) el contenido de humedad de equilibrio de las muestras fueron lo suficientemente pequeños como para no ser utilizados en los cálculos; 2) como el espesor, e , es pequeño y el tiempo de secado, t , es grande, la contribución de los términos de la serie de la ec. (9.2) correspondiente a $n > 1$, son pequeños. Luego, utilizando los datos experimentales, graficaron $\ln (M/M^0)$ frente a t/e^2 y calcularon a partir de la pendiente de la recta, el valor del coeficiente de difusividad efectiva, D_{ef} , correspondiente. En el caso del secado de rodajas de tomate, este gráfico resultaba en uno de tipo no lineal y lo asociaron a dos situaciones a saber: 1) el incremento de la temperatura del material vegetal durante el proceso de secado, permaneciendo este por debajo de la temperatura de bulbo húmedo; 2) la rodaja de tomate se contraía durante el proceso, es decir que el espesor no permanecía constante y el encogimiento era desproporcionado, siendo mayor el del espesor que el del diámetro de la rodaja, pudiendo esto último deberse al tipo de corte vegetal utilizado. Estas dos situaciones y la relativa magnitud de los efectos provocados por ellas, provocarían la no linealidad de la curva; ya sea porque al incrementarse la temperatura del material en estudio, aumenta el coeficiente de difusión, o bien porque el encogimiento y el endurecimiento evidente durante el secado, disminuirían su valor. Para considerar el encogimiento dentro del modelo propuesto, relacionaron el espesor teórico (e') con la masa de la muestra vegetal, en base a la siguiente ecuación:

$$\frac{e'}{e^o} = \left(\frac{m_{tot}^S}{m_{tot^o}^S} \right)^\delta \quad (9.3)$$

donde: m_{tot}^S , es la masa de la muestra vegetal; e' , espesor que predice el modelo; δ , potencia.

A partir de datos experimentales graficaron la relación ec. (9.3) y buscaron aleatoriamente valores para la potencia “ δ ”, tales que dieran como resultado una recta para el cálculo de $\mathcal{D}_{ef}$, asumiendo que el valor hallado como el representativo de la combinación de todos los efectos: temperatura, endurecimiento y encogimiento sobre el valor del coeficiente de difusividad efectiva. Donde un valor de $\delta = 0$ implica que no hay encogimiento y un valor de $\delta = 1$ implica que el volumen encogido equivale al volumen de agua perdido.

Es importante, destacar también que hasta el momento existe una gran variabilidad entre los valores reportados de difusividad efectiva del agua, por diferentes autores lo que está de acuerdo con la complejidad que presentan los alimentos (composición, estructura, etc.) y los diferentes métodos de estimación utilizados. (Saravacos, 1986; Karathanos y col., 1990). Marinos-Kouris y Maroulis (1995), recopilaron datos de $\mathcal{D}_{ef}$, provenientes de diferentes autores y encontraron que los mismos varían en un rango de 10^{-13} a 10^{-6} m²/s, pudiendo observarse que la mayoría (82%) se acumula en la región comprendida entre: 10^{-11} y 10^{-8} m²/s.

La dependencia $\mathcal{D}_{ef}$ con la temperatura puede ser descripta en base a la ecuación de Arrhenius:

$$\mathcal{D}_{ef} = \mathcal{D}_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (9.4)$$

donde: $\mathcal{D}_0$, es denominado factor de Arrhenius; E_a , energía de activación; R , constante de los gases.

El cálculo del coeficiente de difusividad efectiva del agua en alimentos a partir de datos experimentales de secado utilizando el método de la pendiente, fue también utilizado por (Okos y col., 1992).

Entonces, en base a lo anteriormente detallado y a las condiciones de secado de rodajas y lonjas de berenjena descrito en el Capítulo 2, si consideramos las rodajas como

finas láminas infinitas, donde la pérdida de agua se produce solamente en sentido axial, es decir por ambas caras de la misma, podríamos aplicar el primer término de la serie de la solución de la segunda ley de Fick para describir la transferencia de masa durante el secado considerando D_{ef} constante.

De los ensayos de secado experimentales realizados, cuyos resultados se presentaron en el Capítulo 3, se eligieron para realizar el tratamiento cinético, las rodajas de espesor inicial de 0.684 (1 ± 0.064) cm y diámetro inicial de 6.637 (1 ± 0.040) cm, ya que el tiempo de secado empleado es el menor, lo que minimiza los efectos indeseables sobre el producto final obtenido suponiendo esto un bajo costo energético; el diámetro elegido se corresponde con el diámetro de los frutos, en general. Y también se calculó el coeficiente de difusividad efectiva del agua durante el secado de lonjas de berenjena de espesor inicial: $e^0 = 0.664 (1 \pm 0.086)$ cm, con el objetivo de comparar los valores obtenidos para ambos tipos de corte.

Aplicando logaritmo natural al primer término de la serie de la solución de la segunda ley de Fick, se obtiene la ec. (9.5) y luego, graficando $\ln M_r$ en función de t/e^2 y luego de calculada la pendiente de la recta, se obtuvo el coeficiente de difusividad efectiva del agua de las muestras vegetales. Como el secado de las rodajas de berenjena y de las lonjas se producía por ambas caras de la misma (ver Fig. 2.1), el espesor, e , es en realidad el semi-espesor, por lo cual la expresión es la que sigue:

$$\ln M_r = \ln \left(\frac{M - M_{eq}}{M^0 - M_{eq}} \right) = - \frac{\pi^2 D_{ef} t}{e^2} \quad (9.5)$$

En primera instancia se realizó el modelado del proceso considerando el espesor instantáneo obtenido partir de la medida del espesor a cada tiempo, t y luego, se utilizó el obtenido por cálculo, que se denominó e' , considerando la contracción de volumen de la muestra vegetal (detallado en el Capítulo 4). El contenido de humedad de equilibrio, M_{eq} , fue considerado equivalente al valor de contenido de humedad de la muestra en equilibrio con el aire de secado, al final del proceso, bajo las condiciones especificadas en el Capítulo 2, ya que la masa del material vegetal permanecía constante. Lo mismo consideraron otros investigadores como Uddin y col., (1990); Togrul y Phelivan (2003); Akpinar y Bicer (2005).

Para evaluar el grado de ajuste de los datos experimentales se calcularon los siguientes parámetros estadísticos: (Togrul y Pehlivan, 2003; Akpinar y Dincer, 2005):

$$\text{RMSE} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\text{Mr}_{\text{teo},i} - \text{Mr}_{\text{exp},i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9.6)$$

$$\text{MBE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\text{Mr}_{\text{teo},i} - \text{Mr}_{\text{exp},i} \right) \quad (9.7)$$

$$\%E = \frac{100}{N} \left[\sum_{i=1}^N \frac{\left(\text{Mr}_{\text{teo},i} - \text{Mr}_{\text{exp},i} \right)}{\text{Mr}_{\text{exp},i}} \right] \quad (9.8)$$

Los subíndices: teo,i y exp,i , se refieren a los valores predicho y experimental, respectivamente, del i -ésimo experimento; N es el número total de determinaciones u observaciones realizadas.

La raíz cuadrada media del error (RMSE) es la media del cuadrado de las desviaciones entre los datos experimentales y los calculados por los distintos modelos propuestos. Cuanto más pequeño es el valor de RMSE mejor es el ajuste del modelo.

9.2. TRATAMIENTO CINETICO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

9.2.1 Cálculo del coeficiente de difusividad efectiva del agua considerando la disminución del espesor instantáneo experimental

En las Figs. 9.1 (a, b, c, d y e) se presentan los datos obtenidos por aplicación de la ec. (9.5) a los datos experimentales a cada temperatura de trabajo. Para el cálculo de los valores de las abscisas, se utilizaron los valores del espesor de las rodajas medidos experimentalmente, a cada tiempo de secado.

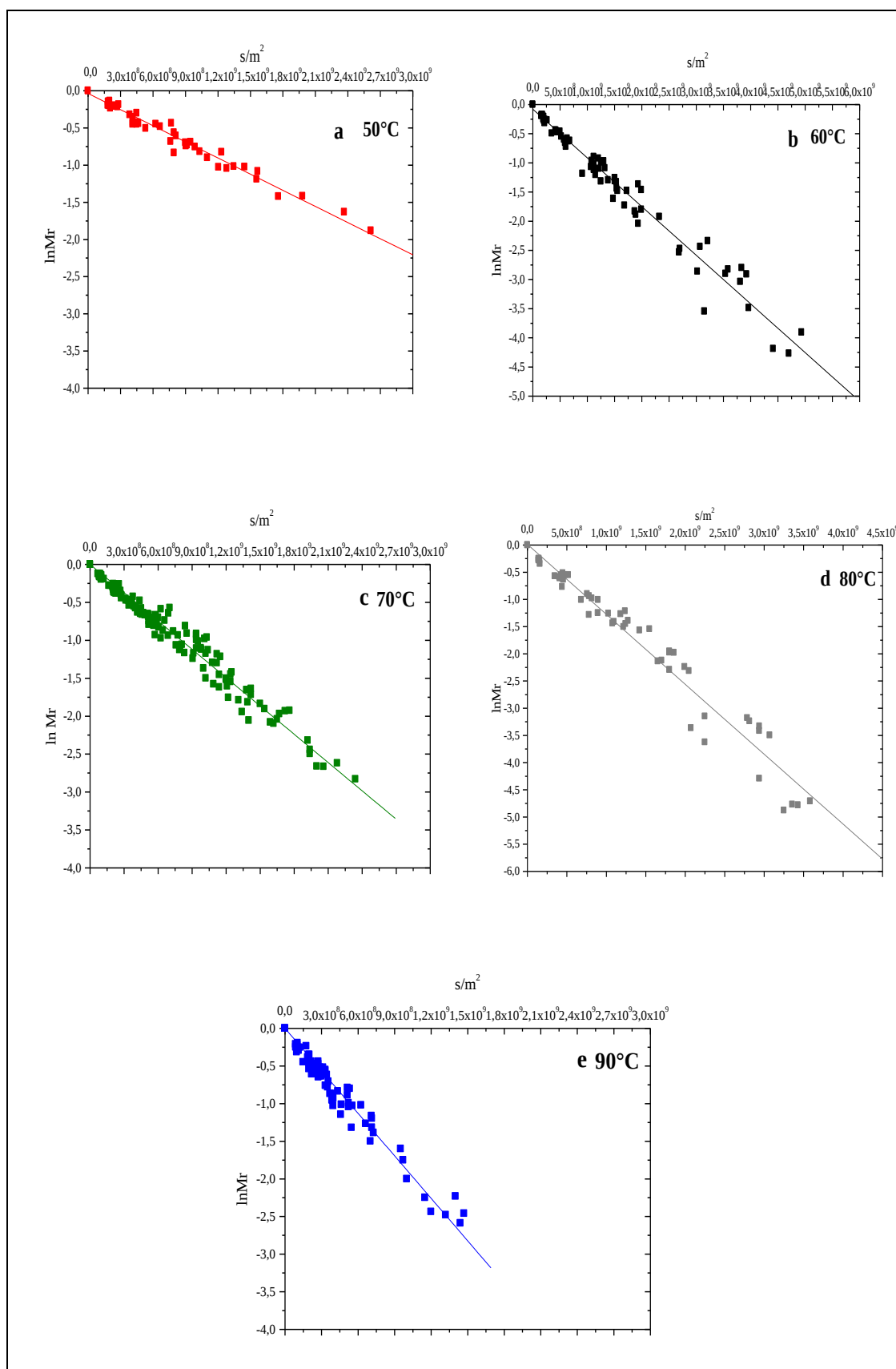


Figura 9.1(a, b, c, d y e). Resultados de la regresión lineal que utilizando la ec. (9.5)

En la Tabla 9.1 se detallan los valores de los coeficientes de difusividad efectiva del agua, $\mathcal{D}_{\text{ef}}$, obtenidos a cada temperatura ensayada, a partir de datos experimentales de secado de rodajas de berenjena de diámetro inicial, D° , 6.637 (1 ± 0.040) cm y espesor inicial, e° , 0.684 (1 ± 0.064) cm. Para ello, se realizó la regresión lineal, aplicando la ec.(9.5) (software Origin 5.0). Así mismo se detallan los valores calculados de RMSE, MBE, y %E obtenidos para cada caso. El valor de R^2 , corresponde a la regresión de $\ln M_r$ vs t/e^2 , a partir del cual se calculó $\mathcal{D}_{\text{ef}}$.

Tabla 9.1: Estimaciones de los coeficientes $\mathcal{D}_{\text{ef}}$ calculados durante el secado de rodajas de berenjena

T(°C)	R^2	$\mathcal{D}_{\text{ef}} \times 10^{10} \text{ (m}^2/\text{s)}$	RMSE	MBE	%E
50	0.971	2.96	0.0371	0.0051	15.26
60	0.969	3.38	0.0391	-0.0126	15.59
70	0.976	4.69	0.0412	0.0032	18.76
80	0.975	5.21	0.0316	0.0050	20.06
90	0.983	7.69	0.0321	0.0300	18.28

Akpınar y Dincer (2005), encontraron que durante el secado de rebanadas de berenjenas de 5 mm de espesor y 35 mm de diámetro secadas desde 55 a 75 °C con velocidades de aire de 1 a 1.5 m/s en un secadero de bandejas, valores del coeficiente de difusividad efectiva, $\mathcal{D}_{\text{ef}}$ entre 6.77×10^{-10} y $12.965 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Estos valores son superiores a los detallados en la Tabla 9.1, podría explicarse, ya que, previo al secado, las rodajas de berenjena fueron escaldadas, lo que favoreció la pérdida de agua durante el proceso o bien a que el sistema experimental planteado fue diferente. También encontraron que la difusividad efectiva del agua se incrementa con la temperatura y la velocidad del aire de secado.

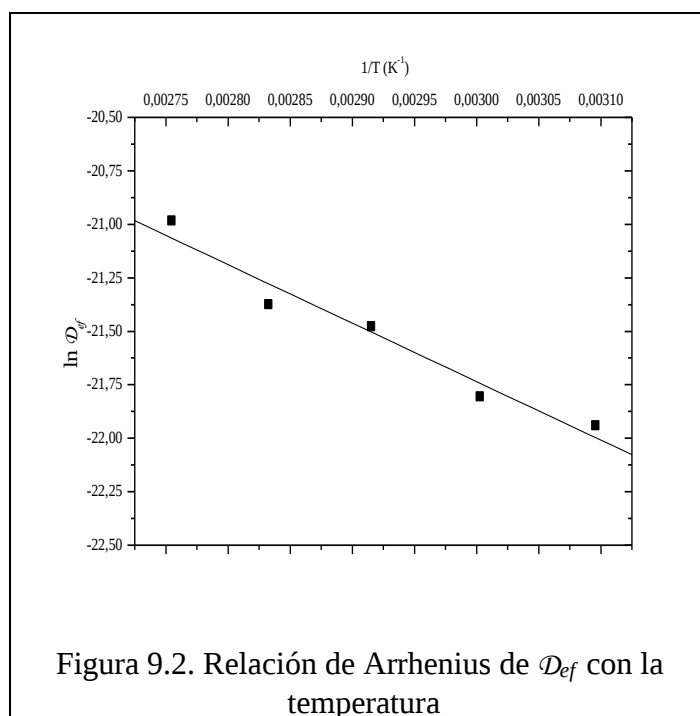
Akpınar y Bicer (2005), si bien realizaron el modelado de la cinética de secado de rodajas de berenjena en un secadero tipo ciclón, no calcularon coeficientes de difusividad efectiva.

Valores similares del coeficiente de difusividad efectiva han sido informados por Giovanelli y col. (2002) para rodajas de tomate, Vega y col. (2001) para otros vegetales así

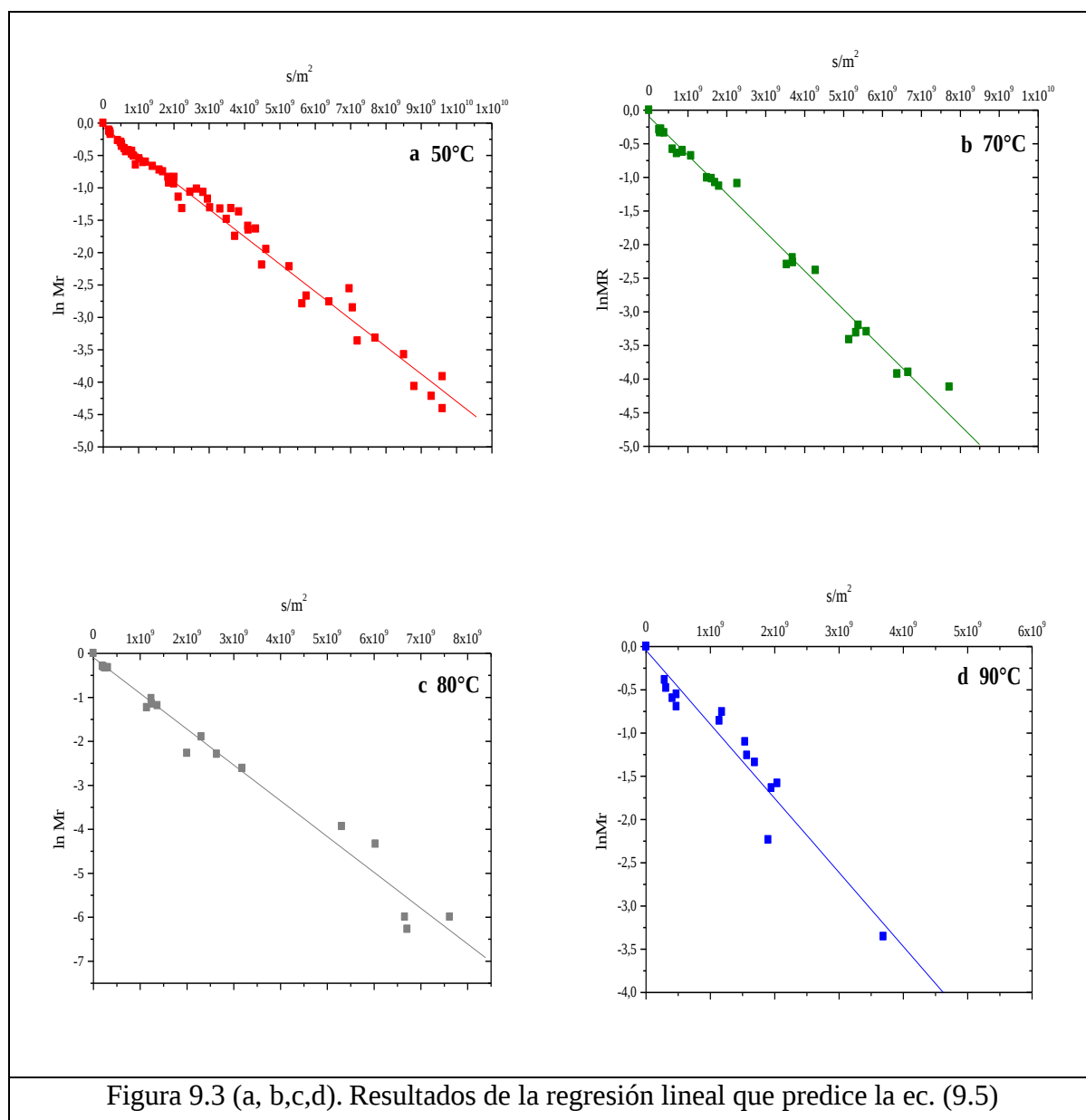
como los valores recopilados por Marinos-Kouris y Maroulis (1995) donde la mayoría (82%) se acumulan en la región de 10^{-11} a 10^{-8} m²/s.

Aunque los valores del coeficiente de difusividad efectiva se corresponden con los hallados para los vegetales en general, presentan una variabilidad elevada debido a que el grado de ajuste a los datos experimentales no es muy bueno, estando los valores de error porcentual comprendidos entre un 15.2 % y 20 %.

La influencia de la temperatura de secado sobre el coeficiente de difusividad efectiva del agua sigue una ley tipo Arrhenius, Fig. (9.2) y el valor de la energía de activación calculado es 22.741 kJ (mol K)⁻¹ ($R^2 = 0.980$); el mismo se encuentra en el orden de los valores reportados por Hernández, Pavón y García (2000) para el secado de rodajas de mango y cubos de mandioca, Simal y col. (1998) para tallos de brócoli y Rovedo y col. (1995) para láminas de papas.



En las Figs. 9.3 (a, b, c, d) se presentan los datos obtenidos por aplicación de la ec. (9.5) a los datos experimentales recopilados durante el secado de lonjas de berenjena a cada temperatura de trabajo.



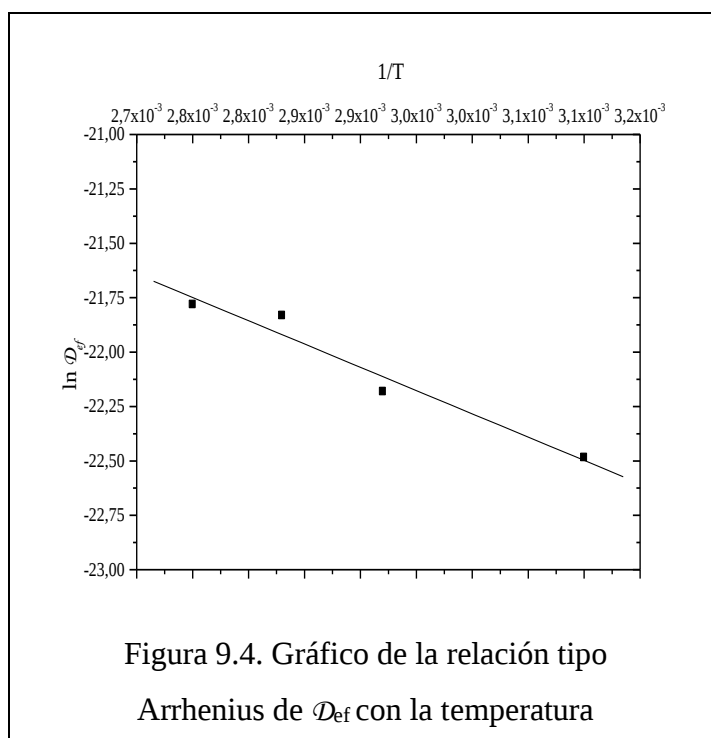
En la Tabla 9.2 se detallan los valores de coeficientes de difusividad efectiva del agua obtenidos por regresión lineal de los datos experimentales aplicando la ec.(9.5), para el corte tipo lonja secadas a cada temperatura ensayada (software Origin 5.0). Así mismo se detallan los valores calculados para RMSE, MBE, y % E para cada caso. El valor de R^2 , corresponde a la regresión lineal de $\ln Mr$ vs t/e^2 , a partir del cual se calculó el coeficiente de difusividad efectiva. Los valores del coeficiente de difusividad efectiva obtenidos para rodajas de berenjena son 1.5 a 2 veces superiores a los encontrados para lonjas, en las mismas condiciones de secado. Esto podría sugerir la importancia del sentido de corte

utilizado para secar. El grado de ajuste de los datos experimentales son similares a los obtenidos para rodajas de berenjena

Tabla 9.2: Estimaciones de los coeficientes $\mathcal{D}_{\text{ef}}$ calculados durante el secado de lonjas de berenjena

T(°C)	R ²	$\mathcal{D}_{\text{ef}} \times 10^{10}$ (m ² /s)	RMSE	MBE	%E
50	0.984	1.72	0.0418	-0.0037	14.99
70	0.989	2.34	0.0285	-0.0070	15.11
80	0.978	3.29	0.0745	0.0572	20.23
90	0.947	3.47	0.0525	0.0009	19.28

La influencia de la temperatura de secado sobre los coeficientes de difusividad efectiva obtenidos para lonjas de berenjena sigue una tendencia tipo Arrhenius, al igual a lo observado para rodajas. En la Fig. 9.4 se presenta el gráfico correspondiente, a partir del cual se obtuvo por regresión lineal (software: Origin 5.0) la energía de activación de 17.788 Kj/mol K ($R^2 = 0.958$). Este valor es bastante inferior al hallado para rodajas de berenjena.



9.2.2 Cálculo del coeficiente de difusividad efectiva del agua considerando la disminución de volumen.

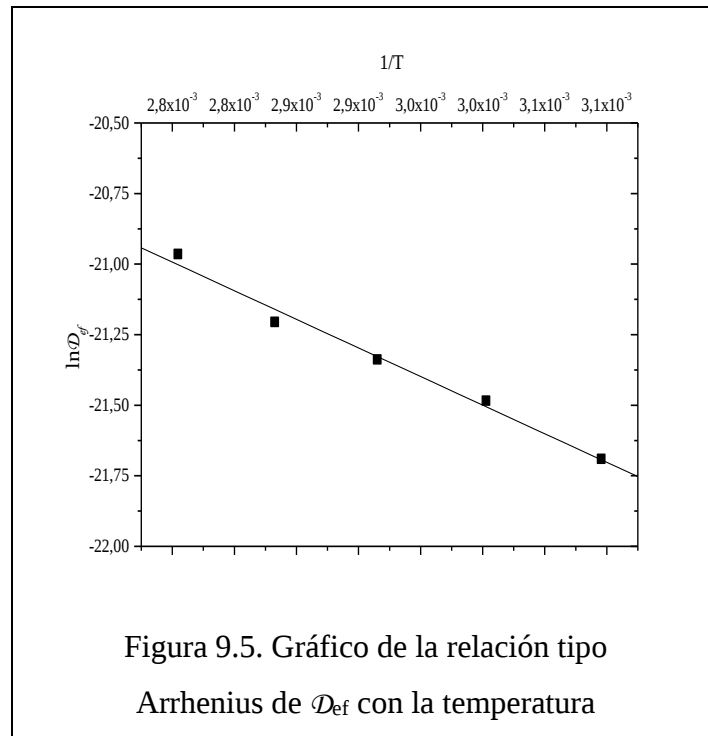
Para realizar la corrección, teniendo en cuenta la variación de volumen de la muestra vegetal, se procedió a calcular el espesor instantáneo teórico, e' , a partir de la combinación de las ecuaciones 4.3 y 4.4, ya mencionadas previamente. La regresión es efectiva hasta el momento del alabeo, debido a que se realizaron mediciones del diámetro hasta el momento previo en que se inicia el alabeo de las rodajas. En la Tabla 9.3 se detallan los valores de los coeficientes de difusividad efectiva del agua obtenidos a cada temperatura ensayada, por regresión lineal de los datos experimentales aplicando la ec.(9.5) (software Origin 5.0). Así mismo se detallan los valores calculados para RMSE, MBE, y %E para cada caso.

Tabla 9.3: Estimaciones de los coeficientes $\mathcal{D}_{ef}$ calculados durante el secado de rodajas de berenjena, obtenidos a partir de espesores teóricos

T(°C)	R ²	$\mathcal{D}_{ef} \times 10^{10}$ (m ² /s)	RMSE	MBE	%E
50	0.969	3.73	0.0281	0.0006	7.47
60	0.993	4.66	0.0147	-0.0034	1.43
70	0.923	4.93	0.0308	-0.0023	7.40
80	0.976	6.17	0.0200	-0.0569	3.70
90	0.984	7.95	0.0270	0.0009	4.18

Los valores de $\mathcal{D}_{ef}$, corregidos en base a la contracción volumétrica, son superiores a los calculados con el espesor instantáneo experimental, mejorando notablemente el grado de ajuste de los datos experimentales con un error porcentual que varía entre 1.4 y 7.4 %. Sin embargo debe notarse aquí que el ajuste corresponde hasta el momento previo al alabeo.

La influencia de la temperatura de secado sobre el coeficiente de difusividad efectiva del agua sigue una ley tipo Arrhenius. En la Fig. 9.5 se presenta el gráfico correspondiente a $\ln(\mathcal{D}_{ef})$ en función de $1/T$, a partir del cual se obtuvo un valor de energía de activación de 16.853 kJ/mol K. ($R^2 = 0.987$), valor también inferior al calculado anteriormente.

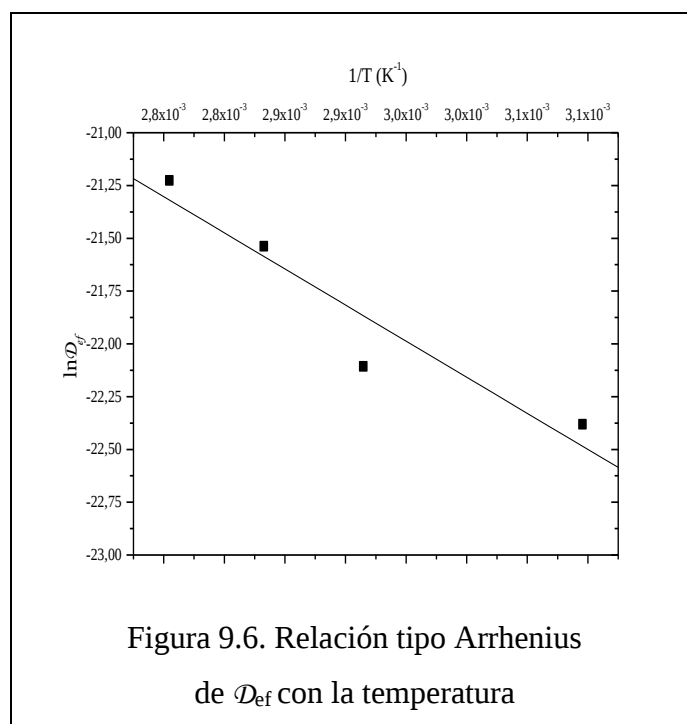


En el caso de las lonjas se calculó el espesor instantáneo teórico a partir de las ecs. (4.6) y (4.4) ya mencionadas en el Capítulo 4 y luego se determinó el valor del coeficiente difusividad efectiva, D_{ef} por el método anteriormente utilizado, ec.(9.5). La regresión es efectiva hasta el momento del alabeo, al igual que en el caso de rodajas. En la Tabla 9.4 se detallan las estimas de los coeficientes de difusividad efectiva del agua obtenidos a cada temperatura ensayada y los valores calculados para RMSE, MBE, y %E para cada caso. En dicha tabla puede observarse que se ha mejorado el grado de ajuste respecto a los calculados previamente.

Tabla 9.4: Estimas de los coeficientes D_{ef} calculados durante el secado de lonjas de berenjena obtenidos a partir de espesores teóricos

T (°C)	R ²	$D_{ef} \times 10^{10}$ (m ² /s)	RMSE	MBE	%E
50	0.968	1.90	0.0357	-0.0295	3.48
70	0.957	2.50	0.0685	-0.0090	8.39
80	0.987	4.42	0.0872	-0.0498	16.50
90	0.994	6.04	0.0727	-0.0735	8.75

La influencia de la temperatura de secado sobre la difusividad sigue una tendencia tipo Arrhenius y en la Fig. 9.6 se presenta el gráfico correspondiente a $\ln \mathcal{D}_{ef}$ en función de $1/T$, a partir del cual se obtuvo por regresión lineal (software: Origin 5.0) de la ec. (9.4), un valor de energía de activación de 28.43 KJ/mol K. ($R^2= 0.989$), muy superior al hallado para rodajas y al calculado para lonjas de berenjena sin tener en cuenta la contracción volumétrica.



Se puede observar en base a los resultados obtenidos (Tablas 9.3 y 9.4) que el ajuste de la regresión lineal de los datos mejora al utilizar el espesor calculado considerando la contracción de volumen de las muestras vegetales, disminuyendo los valores de RMSE, MBE y %E, modificándose también los valores de la energía de activación. Es de considerar que los valores de $\mathcal{D}_{ef}$ calculados teniendo en cuenta la contracción volumétrica corresponden a los primeros tiempos de secado, previo al labeo, donde la velocidad de secado es elevada.

En el caso del secado de lonjas de berenjena el coeficiente de difusividad efectiva del agua obtenido es siempre menor que los valores encontrados para el corte tipo rodaja, ya sea considerando el espesor instantáneo experimental o el proveniente de la contracción de volumen.

Capítulo 10

RESULTADOS Y DISCUSION

PARTE 8. Ensayos de Deshidratación en bandejas

10.1 INTRODUCCIÓN

De los diversos modelos matemáticos semi-teóricos y empíricos que fueron citados en la bibliografía consultada, los más frecuentemente utilizados para describir el fenómeno de secado de alimentos vegetales húmedos en bandejas se detallan en la Tabla siguiente:

Tabla 10.1: Modelos matemáticos		
Nombre del modelo	Ecuación	Referencias
Newton	$MR = e^{-kt}$	Mujumdar y Menon (1995)
Page	$MR = e^{-kt^n}$	Page (1949)
Henderson y Pabis	$MR = Ae^{-kt}$	Henderson y Pabis (1961)
Wang y Singh	$MR = 1 + At + Bt^2$	Wang y Singh (1978)
Logaritmico	$MR = Ae^{-kt} + C$	Yaldız y Ertekin (2001)
Midilli	$MR = Ae^{-kt^n} + Bt$	Midilli y col. (2002)

La definición de MR, varía según el autor, (Diamente y Munro, 1993; Yaldız y Ertekin, 2001; Yaldız y col., 2001; Ertekin y Yaldiz, 2004; Doymaz, 2004). En el presente Trabajo de Tesis Doctoral se utilizó la siguiente definición:

$$MR = \frac{M}{M^o}$$

El modelo de Newton ha sido utilizado por muchos investigadores para estudiar el secado de productos agrícolas como ser: arroz integral (Shei y Chen, 1998), damasco (Togrul y Pehlivan, 2003). También ha sido utilizado por O'Callaghan y col., (1971), Nellist (1987), Tiris y col., (1994), Ayensu (1997), Liu and Bakker-Arkema (1997), Sarsavadia y col., (1999), Togrul y Phelivan (2002), Akpinar y col., (2003), Togrul y Phelivan (2004).

El modelo de Page (1949) es de tipo empírico y ha sido empleado para describir el secado de sólidos en lechos fijos, bajo condiciones constantes de secado, considerándose este modelo como una modificación del modelo de Newton (Panchariya y Sharma, 2002). En 1949, Page encontró que el secado de maíz en lecho delgado podía ser representado por la ecuación homónima (Tabla 10.1), donde el valor de la constante, n , dependía de la humedad relativa del aire de secado. A partir de entonces ha sido aplicado por numerosos investigadores para estudiar el secado de diferentes alimentos, entre los que se pueden nombrar: Bruce (1985), Zhang and Litchfield (1991), Togrul y Phelivan (2002), Akpinar y

col., (2003), Togrul y Phelivan (2004), Ertekin y Yaldiz (2004), entre otros. Este modelo ha dado resultados satisfactorios en la predicción del secado de papas dulces (Diamante y Munro, 1993), ajo (Madamba et al, 1996), damasco (Pala et al., 1996), uvas sin semillas (Doymaz y Pala, 2002), hojas de menta (Park et al, 2002) así como el secado en en bandejas de zanahorias (Doymaz, 2004).

El modelo de Henderson y Pabis (1961), suele ser asociado como una representación simplificada del primer término de las series de la solución de la segunda ley de Fick. Este modelo ha sido utilizado por Ozdemir y Devres (1999), Akpinar y col., (2003), Togrul Togrul y Phelivan (2002; 2004) para el tratamiento de los datos experimentales de secado en bandejas de diferentes alimentos.

El modelo logarítmico fue utilizado por diversos investigadores, entre los que encontramos Yaldiz and Ertekin (2001), Akpinar y col. (2003), Togrul y Phelivan (2002; 2004), Kingsly y col., (2007).

El modelo propuesto por Midilli y col., (2002) es un modelo empírico, fenomenológico que ha sido empleado por Ertekin y col., (2004) para modelar, con muy buenos resultados, las curvas de secado en bandejas de berenjenas de espesor promedio de 0.635 cm, previamente escaldadas 5 minutos en agua 100°C.

En este Capítulo se presentan los resultados obtenidos del secado de rodajas de berenjena utilizando un secadero de bandejas, según lo detallado en el ítem 2.7 del Capítulo 2.

Las muestras vegetales utilizadas fueron rodajas de espesor inicial 0.664 (1 ± 0.086) cm, pretratadas por inmersión en soluciones acuosas de metabisulfito de sodio al 0.5% p/v durante 3 minutos. Se realizaron medidas de color superficial durante el secado de las rodajas a las diferentes temperaturas de trabajo, mediante métodos colorimétricos.

El objetivo de ésta parte del trabajo fue estudiar el secado en bandejas de rodajas de berenjena por convección forzada de aire caliente que incide tangencialmente a la superficie de las mismas, teniendo en cuenta los ensayos previamente realizados con muestras individuales y, además aplicar el tratamiento cinético convencional de los datos experimentales.

El grado de ajuste de los diferentes modelos a los datos experimentales fue evaluado en base a parámetros comúnmente usados en la bibliografía, como es el caso del

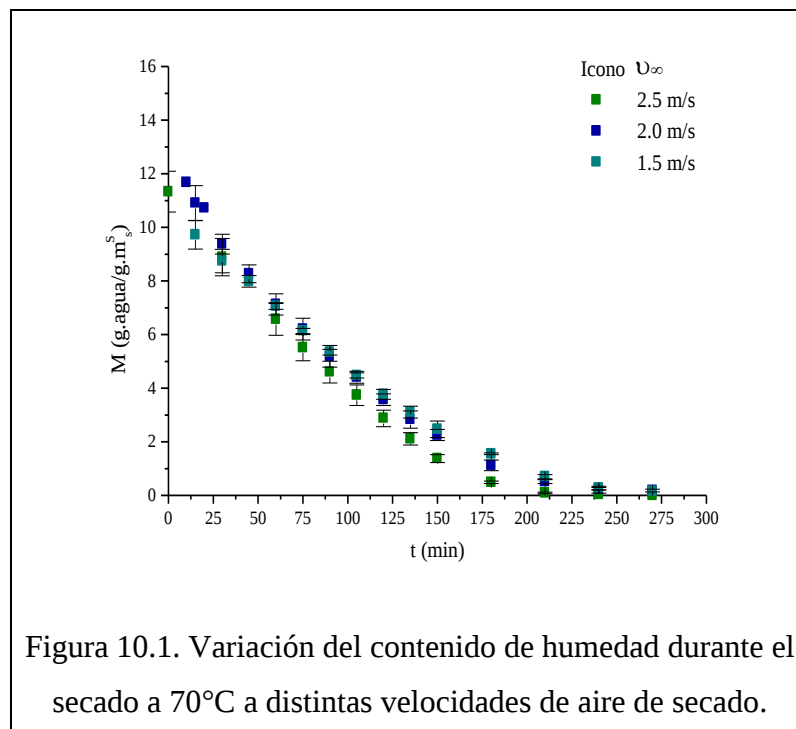
coeficiente de correlación, R^2 y el valor de χ^2 (Noomhorm y Verma, 1986; Ajibola, 1989; Rapusas y Driscoll, 1995; Sarsavadia, 1999; Akpinar y Bicer 2005).

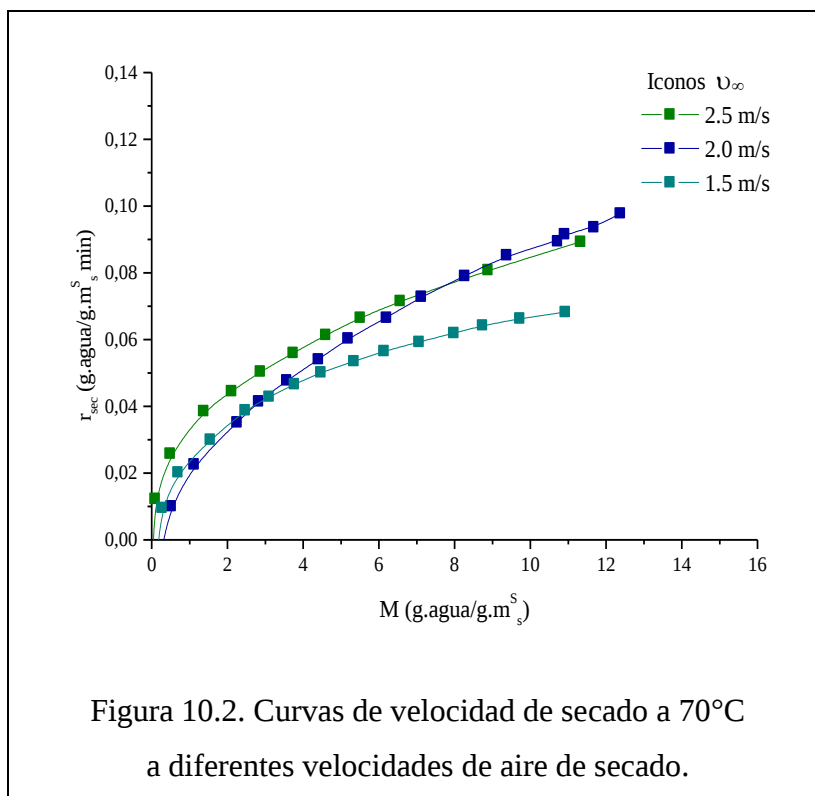
10.2 RESULTADOS Y TRATAMIENTO CINÉTICO

En la Fig. 10.1 se presentan los datos experimentales obtenidos durante el secado a 70°C, a diferentes velocidades de aire, u_∞ : 1.5, 2.0 y 2.5 m/s.

En la Fig. 10.2 se presentan los correspondientes a la velocidad de secado, r_{sec} , en función del contenido de humedad residual, M , no observándose periodo de velocidad constante, al igual que Ertekin y Yaldiz (2003) y Akpinar y Bicer (2005) durante el secado de berenjenas.

Otros autores reportaron similares observaciones durante el secado de otros alimentos, como ser pimientos rojos (Akpinar y col., 2003), zanahorias (Doymaz, 2004), rodajas de calabaza (Doymaz, 2007).



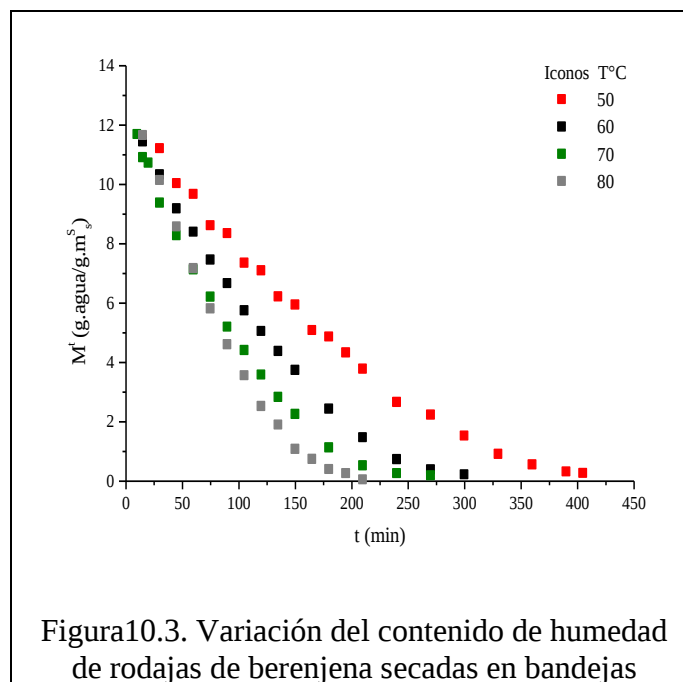


Se observa que tanto a 2 y 2.5 m/s de velocidad de aire, se diferencian claramente de la curva a velocidad de aire de 1.5 m/s. Hawlader y col. (1991) encontraron que la velocidad de aire de secado, en el rango 0.4 a 1.8 m/s, tenía influencia sobre la velocidad de secado de rodajas de tomate de 5 mm de espesor secados en bandejas a temperaturas entre 60 y 80 °C, incrementándose la tasa de secado con la velocidad de aire de secado. Similares resultados obtuvo Doymaz (2004) durante el secado en bandejas de cubos de zanahoria a 50°C. Ertekin y Yaldiz (2003) encontraron que la velocidad de aire de secado presentaba una influencia significativa sobre la tasa de secado de rodajas de berenjena en bandejas, cuando se trabajaba a velocidades de aire de 0.5, 1.0 y 2.0 m/s, entre 30 y 70°C. Por otra parte, Akpinar y Bicer (2005) encontraron que la velocidad del aire de secado no presentó influencia sobre el tiempo total de secado. Sgroppo y col. (1990) encontraron que la velocidad del aire de secado no presentaba influencia sobre la velocidad de secado de chips de mandioca. Krokida y col. (2003a) encontraron que la velocidad del aire tenía una influencia relativamente baja sobre la velocidad de secado en un rango de 1.5 a 2.6 m/s. Por otra parte, Hossain, Woods y Bala (2007) encontraron que la tasa de secado de pimientos morrones (*Capsicum annum*, L.) fue mayor a altas velocidades de aire, incrementándose con la misma en un rango de 0.1 a 0.5 m/s y permaneciendo constante

cuando se trabajaba en un rango entre 0.5 a 1.0 m/s. En el Capítulo 3, se encontró que durante el secado de rodajas y lonjas de berenjena individuales, la velocidad del aire de secado no presentaba influencia sobre la velocidad de secado de las mismas (ver por ej. Fig. 3.4).

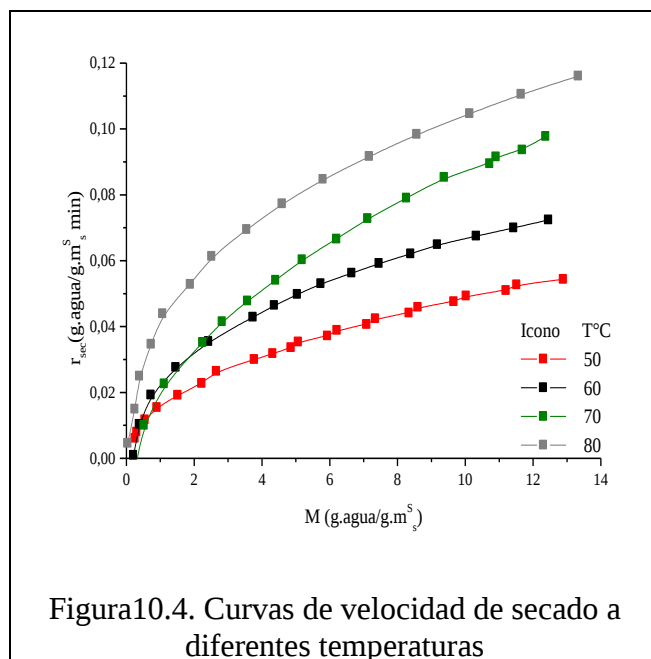
A partir de estos resultados se seleccionó como velocidad de aire de secado 2 m/s, ya que de esta manera no se exigía demasiado el equipo de secado empleado, cuya velocidad de aire de secado máxima era de 2.5 m/s, manteniéndose el criterio de trabajo, utilizado en el secado individual de rodajas de berenjena.

En la Fig. 10.3 se presentan los datos correspondientes al secado de rodajas de berenjena a 50°C, 60°C, 70°C y 80°C. En ella, se observa la marcada influencia de la temperatura en el tiempo de secado, ya que a 80°C el tiempo total de secado fue de 210 minutos mientras que a 50°C fue de 400 minutos. Similares observaciones fueron hechas por Ertekin y Yaldiz (2004), Akpinar y Bicer (2005), Doymaz (2007), Hossain, Woods y Bala (2007), así como durante el secado de rodajas y lonjas de berenjena individuales presentados en el Capítulo 3.



En la Fig. 10.4 se presentan las curvas de velocidad de secado para cada condición ensayada, donde se observa que al incrementarse la temperatura de secado aumenta la velocidad de secado, no presentándose período de velocidad constante, al igual que lo observado por Ertekin y Yaldiz (2004) y Akpinar y Bicer (2005) durante el secado de

rodajas de berenjena. Se pueden observar además, dos períodos de velocidad decreciente, al igual que lo observado durante el secado de rodajas y lonjas individuales de berenjena (Capítulo 3).



En la Tabla 10.2, se detallan los valores de humedad crítica, M^* , obtenidos a cada condición de secado. Al comparar estos valores, con los obtenidos anteriormente (ver Capítulo 3) para muestras de berenjena sin tratamiento previo al secado y deshidratadas de manera individual, se observó que estos son similares a los de secado de lonjas de berenjena, excepto a 80 °C y son superiores a los calculados para rodajas de berenjena, excepto a 70 °C, disminuyendo su valor con el incremento de la temperatura de secado, al igual a lo encontrado para el caso de lonjas, excepto a 70 °C (ver Tabla 3.3).

Tabla 10.2: Valores de humedad crítica	
T (°C)	M^*
	(g. agua/ g. m ^s)
50	2.702
60	2.115
70	2.830
80	1.059

A continuación se presentan los resultados obtenidos del ajuste de los datos experimentales a los distintos modelos detallados en la Tabla 10.1.

En la Tabla 10.3 se presentan los valores de la constante k , obtenidas por regresión no lineal de los datos experimentales utilizando el modelo de Newton.

Tabla 10.3: Valores de las constantes para modelos de un parámetro a cada condición ensayada					
Modelo	T (°C)	u_{∞} (m/s)	k	$\chi^2 \times 10^3$	R^2
Newton	50	2	0.346	2.41	0.975
	60	2	0.481	3.18	0.969
	70	1.5	0.536	3.49	0.963
	70	2	0.601	2.59	0.975
	70	2.5	0.669	3.57	0.966
	80	2	0.746	3.82	0.964

El grado de ajuste de los datos experimentales al modelo de Newton, es bueno, donde la constante “ k ” presenta una relación tipo Arrhenius ec. (5.3) con la temperatura de secado donde la energía de activación calculada es de 24.05 KJ/molK ($R^2 = 0.993$); por otro lado, esta constante presenta una relación lineal con la velocidad de aire de secado a 70°C, incrementándose con el aumento de la velocidad de la misma.

En la Tabla 10.4 a, b y c, se presentan los valores de las constantes de los modelos de dos parámetros, obtenidas por regresión no lineal de los datos experimentales.

Tabla 10.4a: Valores de las constantes para modelos de dos parámetros a cada condición ensayada						
Modelo	T (°C)	u_{∞} (m/s)	$k \times 10^3$	n	$\chi^2 \times 10^4$	R^2
Page	50	2	1.942	1.225	5.699	0.994
	60	2	2.099	1.295	7.549	0.992
	70	1.5	1.742	1.358	7.857	0.992
	70	2	2.375	1.322	1.330	0.988
	70	2.5	1.414	1.473	5.188	0.995
	80	2	2.138	1.409	7.350	0.993

Tabla 10.4b: Valores de las constantes para modelos de dos parámetros a cada condición ensayada

Modelo	T (°C)	v_{∞} (m/s)	A	k	$\chi^2 \times 10^3$	R ²
Henderson y Pabis	50	2	1.056	0.368	1.960	0.980
	60	2	1.063	0.515	2.580	0.976
	70	1.5	1.071	0.577	2.820	0.971
	70	2	1.063	0.639	2.10	0.980
	70	2.5	1.072	0.715	3.010	0.973
	80	2	1.071	0.798	3.150	0.972

Tabla 10.4c: Valores de las constantes para modelos de dos parámetros a cada condición ensayada

Modelo	T (°C)	v_{∞} (m/s)	A	B	$\chi^2 \times 10^4$	R ²
Wang y Singh	50	2	-0.262	0.017	0.988	0.999
	60	2	-0.362	0.033	3.391	0.997
	70	1.5	-0.404	0.039	6.089	0.994
	70	2	-0.466	0.057	1.260	0.988
	70	2.5	-0.492	0.059	2.029	0.998
	80	2	-0.544	0.073	5.015	0.995

El modelo de Page y el de Wang y Singh presentan un buen grado de ajuste a los datos experimentales, como se evidencia en los valores del coeficiente de correlación hallados, a diferencia del modelo de Newton y el modelo de Henderson y Pabis, cuya correlación a los datos experimentales fue menor.

La constante “k” del modelo de Page presenta una dependencia con la temperatura de secado en el rango 50°C-70°C y la constante “n” en todo el rango de temperaturas ensayadas. En ambos casos no se observó dependencia con la velocidad de aire de secado.

La constante “k” del modelo de Henderson y Pabis, presenta una dependencia tipo Arrhenius con la temperatura ($R^2 = 0.992$), estimándose: $E_a = 24.089$ KJ/molK. Además, el valor de esta constante se incrementa con el aumento de la velocidad de aire de secado, a 70°C. La constante “A” del modelo no presenta una dependencia clara con la temperatura ni con la velocidad de aire de secado.

En el caso del modelo de Wang y Singh la constante “A” incrementa cuando aumenta la temperatura: y la constante “B” presenta una relación tipo Arrhenius con la temperatura. ($R^2 = 0.977$), estimándose: $E_a = 46.56$ KJ/molK.

En la Tabla 10.5 y 10.6 se presentan los valores de las constantes de modelos matemáticos de tres y cuatro parámetros, obtenidas por regresión no lineal de los datos experimentales.

Tabla 10.5: Valores de las constantes para modelos de tres parámetros a cada condición ensayada							
Modelo	T (°C)	v_{∞} (m/s)	A	k	C	$\chi^2 \times 10^4$	R ²
Logarítmico	50	2	1.299	0.224	-0.291	2.004	0.998
	60	2	1.309	0.315	-0.291	5.568	0.995
	70	1.5	1.359	0.341	-0.333	7.811	0.992
	70	2	1.135	0.527	-0.094	0.201	0.981
	70	2.5	1.235	0.491	-0.201	8.874	0.992
	80	2	1.302	0.489	-0.275	8.092	0.993

Tabla 10.6: Valores de las constantes para modelos de cuatro parámetros a cada condición ensayada								
Modelo	T (°C)	v_{∞} (m/s)	A	B	n	k	$\chi^2 \times 10^4$	R ²
Midilli	50	2	0.988	-0.015	1.153	0.246	1.619	0.998
	60	2	0.988	-0.016	1.232	0.352	4.238	0.996
	70	1.5	0.995	-0.018	1.264	0.401	5.799	0.994
	70	2	0.984	-0.003	1.371	0.486	8.777	0.992
	70	2.5	0.986	-0.011	1.368	0.509	3.023	0.997
	80	2	0.992	-0.019	1.301	0.586	4.959	0.996

Tanto el modelo logarítmico como el modelo de Midilli, presentan un alto grado de ajuste a los datos experimentales.

La constante “k” del modelo logarítmico presenta una dependencia tipo Arrhenius con la temperatura ($R^2 = 0.865$), estimándose: $E_a = 27.26$ KJ/molK; no así la constante “C” ni la constante “B”.

Aplicando el modelo de Midilli a nuestros datos experimentales, se observa que las constantes del modelo no dependen de la velocidad de aire de secado; las constante “A” y “B” no dependen de la temperatura de secado no así la constante “k”, la cual presenta una relación tipo Arrhenius con la temperatura, cuya estima de: $E_a = 27.857$ KJ/molK ($R^2 = 0.988$). El valor de la constante “n” se incrementa con la temperatura, pero hasta 70°C. Ertekin y Yaldiz (2003) encontraron una relación matemática entre las constantes de este modelo y la velocidad y temperatura del aire de secado (<70°C), sin analizar en forma independiente la influencia de la temperatura sobre cada una de estas constantes. El grado

de ajuste de los datos experimentales es muy similar al hallado por Ertekin y Yaldiz (2003) para el secado en bandejas de berenjenas escaldadas.

En base a los resultados obtenidos, se observa que la mayoría de los modelos presentan un valor de coeficiente de correlación, R^2 , mayor a 0.97, lo que nos indica que el ajuste a los datos experimentales es bastante bueno.

Para seleccionar el modelo que describe más adecuadamente los datos experimentales, se tuvo en cuenta que el coeficiente de correlación (R^2) sea mayor a 0.97, el valor de χ^2 lo mas bajo posible y además, el principio de la simplicidad, es decir aquel modelo que tenga menor número de constantes, requerirá menos tiempo de procesamiento. (Boquet, 1978). Teniendo en cuenta los criterios previamente establecidos el modelo de Wang y Singh (1978) sería adecuado para describir el secado en bandejas de rodajas de berenjena pretratadas por inmersión con soluciones de metabisulfito de sodio 0.5% p/v, sin por ello dejar de tener en cuenta que los modelos de Page, logarítmico y Midilli presentaron valores promedio de R^2 del orden de 0.99.

Ertekin y Yaldiz (2004) encontraron que el modelo de Midilli y col. (2002) podría ser utilizado para describir el proceso de secado de rodajas de berenjena entre 30 y 70°C y velocidades de aire de secado entre 0.5 y 2 m/s. En cambio, Akpinar y Bicer (2005) encontraron que el modelo de Page (1949) era el más adecuado para describir las curvas de secado de rodajas de berenjena de 6 mm de espesor y 30 mm de diámetro, en bandejas perforadas, utilizando un secadero tipo ciclón. Además encontraron una relación entre las constantes del modelo, la temperatura y la velocidad de aire de secado. Otros investigadores han reportado que el modelo de Page predice adecuadamente el secado en bandejas de una amplia variedad de cultivos como ser papas, pasas de uva, higos, ciruelas, etc. (Afzal y Abe, 1999; Karathanos y Belessiotis, 1999; Hossain y Bala, 2002).

Doymaz (2004) obtuvo buen grado de ajuste con los modelos de Henderson y Pabis y Page para el secado en bandejas de cubos zanahorias. Simal y col. (2005) encontraron que el modelo difusional (resuelto para una lámina infinita) describía adecuadamente la cinética de secado de rodajas de kiwi. Doymaz (2007) encontró que el modelo logarítmico describía adecuadamente la cinética de secado de rodajas de calabaza.

Los valores de energía de activación hallados se encuentran en el orden de los hallados por otros investigadores para diferentes tipos de alimentos, como ser Simal y col.,

(1998), Bon y col., (1997), Park y col. (2002), Azzouz y col., (2002), Senadeera y col., (2003), Doymaz (2004), Simal y col (2005).

10.3 EVALUACIÓN DEL GRADO DE PARDEAMIENTO DURANTE EL SECADO

En la Fig. 10.5 se muestran fotografías de rodajas de berenjena frescas pretratadas por inmersión en una solución de metabisulfito de sodio al 0.5 % p/v durante 3 minutos, y rodajas secadas a tiempo final a 60 °C. Se observa el cambio de forma de las mismas debido al proceso, así como la ausencia de pardeamiento de las rodajas.



Figura 10.5. Fotografías de rodajas de berenjena frescas (a) y secadas a tiempo final a 60°C

En la Fig. 10.6 se presentan los valores del índice de pardeamiento, BI, durante el secado en bandejas de rodajas de berenjena pretratadas. El índice de pardeamiento no presenta diferencias significativas durante el secado, a las distintas temperaturas ensayadas. Además los valores obtenidos a tiempo final son superiores a los hallados para rodajas secadas de manera individual a tiempo final presentados en el Capítulo 5 (Fig. 5.12 y 5.13); pero inferiores a los presentados por rodajas secadas a tiempo final sin pretratamiento (Fig. 5.11). Ertekin y Yaldiz (2004) encontraron que durante el secado de rodajas de berenjenas pretratadas por inmersión en agua hirviendo durante 5 minutos, la

luminosidad, L^* , y el croma, C^* , decrecían en su valor con el incremento de la temperatura de secado en el rango de 30 a 70°C.

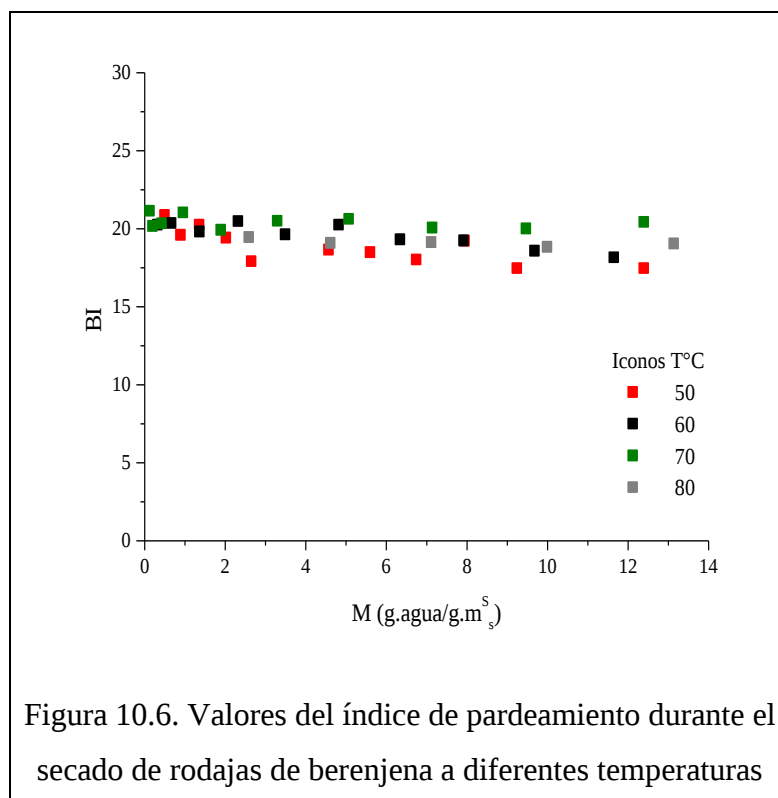


Figura 10.6. Valores del índice de pardeamiento durante el secado de rodajas de berenjena a diferentes temperaturas

Capítulo 11

RESULTADOS Y DISCUSION. PARTE 9.

Tratamiento cinético mediante el empleo de un software

11.1 METODOLOGÍA

Como bien se sabe, el procesamiento de datos experimentales también puede realizarse mediante el empleo de algún software disponible o que se desarrolle específicamente para tal propósito. Trabajando de este modo, es posible reducir considerablemente el tiempo y el esfuerzo que demanda la compleja y engorrosa tarea que se presenta durante el modelado.

En el presente capítulo de este Trabajo de Tesis Doctoral, para el procesamiento de los datos experimentales (del secado individual de rodajas de berenjena) se utilizó un software que fue originalmente desarrollado por Quiroga y col. (2000), para el tratamiento cinético específico de *transformaciones fluido-sólido reactivo*; basado en la monografía: “*Modelado cinético de las transformaciones fluido-sólido reactivo*”, de Quiroga, Avanza y Fusco (1996).

Las transformaciones tipo fluido-sólido reactivo se caracterizan porque en ellas suelen presentarse simultáneamente:

- a) Fenómenos de transferencia de cantidad de movimiento, masa y energía, que tienen lugar sobre una interfase sólido-fluido no adiabática y abierta a flujos difusivos de materia.
- b) Cambios estructurales que experimenta la partícula del reactivo sólido durante el proceso.

Es decir que en las transformaciones tipo fluido-sólido reactivo se presentan los mismos fenómenos de transferencia simultánea y cambios estructurales que suelen observarse comúnmente durante el secado de vegetales.

El software antes mencionado, ha sido desarrollado para simular procesos que evolucionan en el tiempo, como por ejemplo el que corresponde a la velocidad de secado que fue deducida en el Capítulo 8 y fue expresada mediante la ec. (8.19). Es decir:

$$\frac{dX}{dt} = -\frac{w_W^G}{m_{tot}^S} = -\frac{n_W^{(m_i)}\Omega}{m_{tot}^S} \quad (8.19)$$

El software actúa como un simulador del proceso de secado. En este caso, la resolución del problema consiste en integrar la ec. (8.19) con 110 modelos diferentes que se han propuesto para $n_W^{(m_i)}$ y Ω , ya sea en función de X y/o de t ; y, simultáneamente,

estimar del mejor modo posible los parámetros cinéticos y geométricos correspondientes a cada uno de los modelos.

Para adaptar los datos experimentales de secado de vegetales al uso del software, se trabajó con la definición de grado de secado de la muestra húmeda, X , que fue previamente dada en el Capítulo 8 por la ec. (8.20):

$$X = \frac{m_{\text{tot}}^S - m_{\text{tot}}^S}{m_{\text{tot}}^S} = \frac{m_{W^0}^L - m_W^L}{m_{\text{tot}}^S} \quad (8.20)$$

junto con la definición de contenido en humedad del vegetal, dada previamente en el Capítulo 3 por la ec.(3.1):

$$M = \frac{m_W^L}{m_s^S} \quad (3.1)$$

Finalmente, combinando la ec.(3.1) con la ec.(8.20), se tiene que entre X y M existe la siguiente relación:

$$X = \frac{M^0 - M}{M^0 + 1} \quad (11.1)$$

11.2 ESTADO INICIAL DE LOS PRINCIPALES FACTORES

Previo al procesamiento de los datos experimentales, se consideró conveniente analizar el estado inicial de cada uno de ellos. Los resultados que se obtuvieron se resumen en la Tabla 11.1. Cada una de sus columnas tiene el significado siguiente:

N = número de la Tabla que identifica al conjunto de datos experimentales que se obtuvieron a un mismo valor inicial de las factores del sistema.

T = temperatura del aire de secado a la que se realizó el experimento, expresada en: °C.

m_{tot}^S = masa total inicial de la muestra vegetal húmeda, expresada en: kg.

m_s^S = masa total inicial de la muestra vegetal seca o masa de sólido seco, expresada en: kg.

$m_{W^0}^L$ = masa inicial de agua que contiene la muestra vegetal húmeda, fue calculada como:

$$m_{W^0}^L = m_{\text{tot}}^S - m_s^S ; \text{ y expresada en: kg.}$$

D^0 = diámetro inicial de la muestra vegetal húmeda, expresado en: m.

e^0 = espesor inicial de la muestra vegetal húmeda, expresado en: m.

Tabla 11.1 Datos correspondientes a rodajas. Estado inicial de los factores

Nº	T (°C)	$m_{tot}^S \cdot 10^3$ (kg)	$m_s^S \cdot 10^3$ (kg)	$m_{W^o}^L \cdot 10^3$ (kg)	$D^o \cdot 10^2$ (m)	$e^o \cdot 10^2$ (m)	$A_{tot}^o \cdot 10^4$ (m ²)	$V_{tot}^S \cdot 10^6$ (m ³)	ρ_{tot}^o (kg/m ³)	ε_{tot}^o
1	50	11.16	0.97	10.19	5.914	0.640	54.94	17.58	634.8	0.580
2		12.92	0.83	12.09	6.426	0.695	64.86	22.54	573.2	0.536
3		12.24	1.10	11.14	6.254	0.664	61.44	20.40	600.1	0.546
4		14.97	0.72	14.25	6.561	0.585	67.62	19.78	756.9	0.720
5		15.63	1.20	14.43	6.850	0.780	73.71	28.75	543.7	0.502
6		15.38	1.20	14.18	6.875	0.768	74.24	28.51	539.5	0.497
7		16.53	1.27	15.26	6.925	0.800	75.33	30.13	548.6	0.506
8		13.46	0.78	12.68	6.650	0.650	69.46	22.58	596.2	0.562
9	70	13.98	1.23	12.75	6.663	0.665	69.74	23.19	602.9	0.550
10		14.74	1.31	13.43	6.779	0.680	72.19	24.54	600.6	0.547
11		15.14	1.15	13.99	6.719	0.671	70.91	23.79	636.4	0.588
12		15.96	1.03	14.95	6.729	0.745	71.12	26.49	602.4	0.563
13		17.24	1.18	16.06	6.948	0.743	75.83	28.17	612.0	0.570
14		17.87	1.23	16.64	6.910	0.729	75.00	27.34	653.7	0.609
15		15.34	1.32	14.04	6.719	0.713	70.91	25.28	606.8	0.555
16		16.94	1.10	15.84	6.824	0.700	73.15	25.60	661.7	0.619
17	90	15.58	1.15	14.43	6.560	0.685	67.60	23.15	672.9	0.623
18		14.29	0.98	13.31	6.551	0.688	67.41	23.19	616.2	0.574
19		16.77	1.20	15.57	6.888	0.674	74.53	25.12	667.7	0.620
20		14.90	1.02	13.88	6.888	0.641	74.53	23.89	623.8	0.581
21		19.09	1.28	17.81	6.800	0.700	72.63	25.42	750.9	0.701
22		18.66	1.25	17.41	6.870	0.710	74.14	26.32	709.0	0.661
23		14.00	0.85	13.15	6.788	0.750	72.38	27.14	515.8	0.484
24		16.35	1.06	15.29	6.935	0.750	75.55	28.33	577.1	0.540

$A_{tot}^o = \frac{2\pi D^{o2}}{4}$, área total de superficie expuesta de una muestra vegetal húmeda tipo rodaja, expresada en: m².

$V_{tot}^S = \frac{\pi e^o D^{o2}}{4}$, volumen total inicial de una muestra vegetal húmeda tipo rodaja, expresado en: m³.

$\varepsilon_{tot}^o = \frac{V_{W^o}^S}{V_{tot}^S}$, porosidad inicial de la muestra vegetal húmeda tipo rodaja

$\rho_{tot}^o = \frac{m_{tot}^S}{V_{tot}^S}$, densidad total inicial de la muestra vegetal húmeda tipo rodaja, expresada en: kg/m³.

$V_{W^o}^S = \frac{m_{W^o}^L}{\rho_W}$, volumen inicial de agua de la muestra vegetal húmeda tipo rodaja, expresado en m^3 .

Analizando atentamente los datos de la Tabla 11.1, puede observarse que tanto las estimas de la densidad total inicial de la muestra vegetal, ρ_{tot}^o , como las de su porosidad, ε_{tot}^o , varían sensiblemente entre una muestra y otra. En efecto, por un lado se tiene que: $\rho_{tot}^{o(mín)} = 515.8 \text{ (kg/m}^3\text{)}$; mientras que por el otro: $\rho_{tot}^{o(máx)} = 750.9 \text{ (kg/m}^3\text{)}$. Esta variación que presenta ρ_{tot}^o entre ambos extremos, puede resumirse en la siguiente expresión:

$$\overline{\rho_{tot}^o} = 636 (1 \pm 0.18) \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Por consiguiente, para el conjunto de muestras empleadas, se debe esperar respecto de ρ_{tot}^o una variación del orden de: $\pm 18 \%$.

En tanto, se observa que: $\varepsilon_{tot}^{o(mín)} = 0.485$ y $\varepsilon_{tot}^{o(máx)} = 0.721$; pudiendo estas estimas resumirse en la siguiente expresión:

$$\overline{\varepsilon_{tot}^o} = 0.603 (1 \pm 0.196)$$

Es decir que debe esperarse para ε_{tot}^o una variación cercana a: $\pm 20 \%$.

Corresponde hacer notar que las variaciones que experimentan las estimas de ρ_{tot}^o y ε_{tot}^o , son aleatorias e independientes del estado inicial de los siguientes factores: 1) temperatura de secado, T; 2) masa total inicial de la muestra vegetal húmeda, m_{tot}^S ; 3) diámetro de la rodaja, D^o ; y, 4) espesor de la rodaja, e^o . Es decir que no se observa relación alguna que permita vincularlas con los mismos, ni entre ellas.

Esta observación parece totalmente lógica, por cuanto permite confirmar el hecho inferido a priori de que los valores de ρ_{tot}^o y ε_{tot}^o dependen intrínsecamente del estado inicial de las propiedades fisicoquímicas y biológicas que presenta cada muestra vegetal, cuyos valores cambian de una muestra a otra. Lo curioso hubiera sido observar que en todos los experimentos se hubiesen repetido las estimas de ρ_{tot}^o y ε_{tot}^o , o bien que hubiesen diferido con respecto de sus respectivos valores medios, con un error inferior a: $\pm 5\%$.

A través de esta observación se infiere claramente la heterogeneidad que presentan las muestras vegetales húmedas que se utilizaron durante la experimentación, y, a la vez, permite justificar por que se ha considerado conveniente hacer un tratamiento cinético independiente al conjunto de datos experimentales adjuntos a cada una de las muestras.

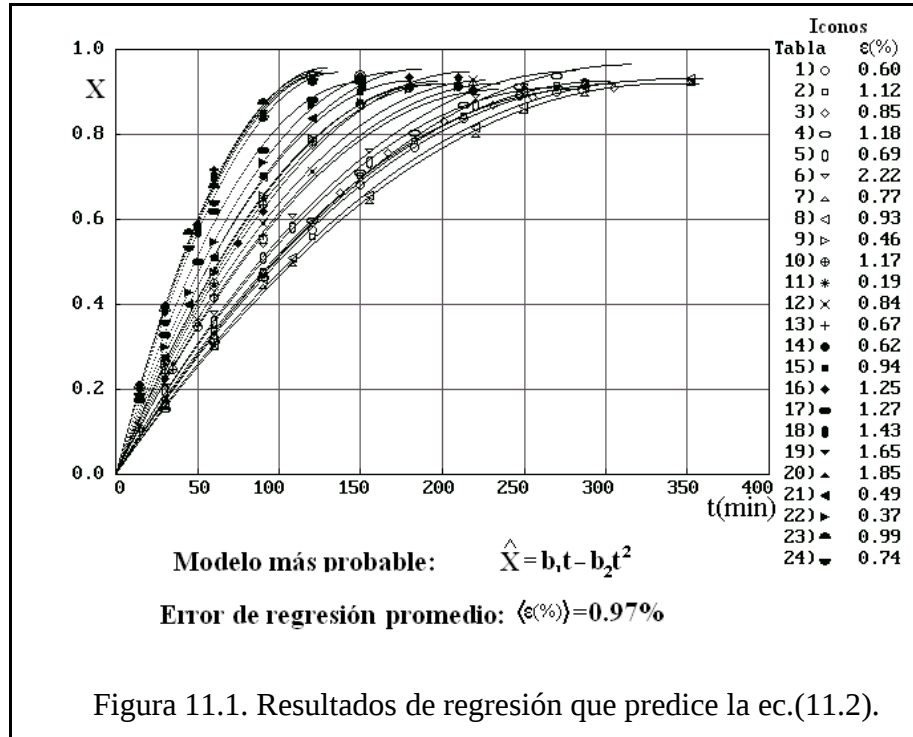
11.3 RESULTADOS DEL TRATAMIENTO CINETICO

11.3.1 Modelo de correlación más probable

Cada una de las tablas que contiene el conjunto de datos experimentales que fueron obtenidos a una misma temperatura y los demás factores a sus correspondientes niveles, fue procesada independientemente de las restantes. Como resultado del procesamiento de todas las tablas, se obtuvo el siguiente modelo como el más probable:

$$X = b_1t - b_2t^2 \quad (11.2)$$

El modelo formulado por la ec. (11.2), consta de dos coeficientes fenomenológicos, b_1 y b_2 . A través de ellos se toman en cuenta, implícitamente, los efectos combinados de la fuerza impulsora que da origen a la densidad de flujo másico, $n_w^{(m_i)}$, y a los cambios estructurales que experimenta la muestra vegetal durante el proceso de secado. Las unidades de ambos coeficientes son $[\text{min}^{-1}]$ y $[\text{min}^{-2}]$, respectivamente. En la Fig. 11.1 se presenta una gráfica que muestra los resultados de regresión que se obtuvieron aplicando el modelo dado por la ec.(11.2), al conjunto de datos experimentales adjuntos a cada muestra de vegetal húmedo. Como puede apreciarse a simple vista, los resultados de correlación son satisfactorios. Cabe acotar aquí, que este modelo fue seleccionado como más probable por dar una estima de error promedio de regresión de todas las tablas, inferior a 1%.



En las Tablas 11.2.1 a 11.2.24, se presenta un resumen de los resultados que se obtuvieron mediante el tratamiento cinético de cada conjunto de datos experimentales. Cada una de las tablas es inicializada con datos correspondientes al estado de inicial de los factores: T , m_{tot}^S , D^0 , e^0 y m_s^S , a los que se realizó el experimento. A renglón seguido de dan las estimas correspondientes a los coeficientes cinéticos b_1 y b_2 , expresados en $(1/\text{min})$ y $(1/\text{min}^2)$, respectivamente. Luego sigue la presentación de las columnas de datos experimentales, t y X , y en una última columna las estimas del error de correlación porcentual, $\varepsilon(\%)$, adjunto a cada uno de los datos. Cada una de las tablas finaliza con sus correspondientes estimas de $\langle \varepsilon(\%) \rangle$ y de Var .

El error de regresión promedio adjunto a cada Tabla, $\langle \varepsilon_j(\%) \rangle$, fue estimado como:

$$\langle \varepsilon_j(\%) \rangle = 100 \sqrt{\frac{\text{Var}_j}{N_j}} \quad (11.3)$$

con su correspondiente varianza, Var_j , estimada como:

$$\text{Var}_j = \sum_{i=1}^{N_j} (X_{j,i} - \hat{X}_{j,i})^2 \quad (11.4)$$

donde: N_j = número de datos experimentales de la j -ésima Tabla

Tabla 11.2.1	Tabla 11.2.2	Tabla 11.2.3	Tabla 11.2.4
T = 50 °C	T = 50 °C	T = 50 °C	T = 50 °C
$m_{\text{tot}}^S = 11.16 \text{ g}$	$m_{\text{tot}}^S = 12.92 \text{ g}$	$m_{\text{tot}}^S = 12.24 \text{ g}$	$m_{\text{tot}}^S = 14.97 \text{ g}$
$D^0 = 5.914 \text{ cm}$	$D^0 = 6.426 \text{ cm}$	$D^0 = 6.254 \text{ cm}$	$D^0 = 6.561 \text{ cm}$
$e^0 = 0.64 \text{ cm}$	$e^0 = 0.695 \text{ cm}$	$e^0 = 0.664 \text{ cm}$	$e^0 = 0.585 \text{ cm}$
$m_{s^0}^S = 0.97 \text{ g}$	$m_{s^0}^S = 0.83 \text{ g}$	$m_{s^0}^S = 1.1 \text{ g}$	$m_{s^0}^S = 0.72 \text{ g}$
$b_1 = 6.007 \cdot 10^{-3}$	$b_1 = 6.1187 \cdot 10^{-3}$	$b_1 = 6.2785 \cdot 10^{-3}$	$b_1 = 6.1012 \cdot 10^{-3}$
$b_2 = -0.9821 \cdot 10^{-5}$	$b_2 = -1.0103 \cdot 10^{-5}$	$b_2 = -1.0852 \cdot 10^{-5}$	$b_2 = -0.9650 \cdot 10^{-5}$
t(min) X $\epsilon(\%)$	t(min) X $\epsilon(\%)$	t(min) X $\epsilon(\%)$	t(min) X $\epsilon(\%)$
30 0.171 -0.938	30 0.174 0.153	30 0.179 -1.559	30 0.174 -2.035
60 0.325 -0.509	60 0.331 0.525	60 0.338 -1.264	60 0.331 -1.834
90 0.461 0.988	90 0.469 1.016	137 0.656 0.453	90 0.471 -0.895
120 0.579 -0.547	120 0.589 -2.875	167 0.746 1.015	120 0.593 0.381
150 0.680 0.186	150 0.690 1.233	201 0.824 0.646	150 0.698 1.193
183 0.770 -0.147	183 0.781 0.364	231 0.871 -0.325	183 0.793 1.063
213 0.834 0.198	213 0.845 0.010	255 0.895 -0.635	213 0.862 0.823
247 0.885 0.632	247 0.895 -0.091	285 0.908 -0.390	247 0.918 -0.529
270 0.906 -0.607	270 0.916 -0.050	305 0.905 0.359	270 0.944 -0.787
$\langle \epsilon(\%) \rangle = \pm 0.604$	$\langle \epsilon(\%) \rangle = \pm 1.119$	$\langle \epsilon(\%) \rangle = \pm 0.848$	$\langle \epsilon(\%) \rangle = \pm 1.182$
Var= $3.28 \cdot 10^{-4}$	Var= $1.13 \cdot 10^{-3}$	Var= $6.47 \cdot 10^{-4}$	Var= $1.26 \cdot 10^{-3}$

Tabla 11.2.5	Tabla 11.2.6	Tabla 11.2.7	Tabla 11.2.8
T = 50 °C	T = 50 °C	T = 50 °C	T = 50 °C
$m_{\text{tot}}^S = 15.63 \text{ g}$	$m_{\text{tot}}^S = 15.38 \text{ g}$	$m_{\text{tot}}^S = 16.53 \text{ g}$	$m_{\text{tot}}^S = 13.46 \text{ g}$
$D^0 = 6.85 \text{ cm}$	$D^0 = 6.875 \text{ cm}$	$D^0 = 6.925 \text{ cm}$	$D^0 = 6.65 \text{ cm}$
$e^0 = 0.78 \text{ cm}$	$e^0 = 0.768 \text{ cm}$	$e^0 = 0.8 \text{ cm}$	$e^0 = 0.781 \text{ cm}$
$m_{s^0}^S = 1.2 \text{ g}$	$m_{s^0}^S = 1.2 \text{ g}$	$m_{s^0}^S = 1.27 \text{ g}$	$m_{s^0}^S = 0.940 \text{ g}$
$b_1 = 6.6622 \cdot 10^{-3}$	$b_1 = 6.7452 \cdot 10^{-3}$	$b_1 = 5.4643 \cdot 10^{-3}$	$b_1 = 5.6119 \cdot 10^{-3}$
$b_2 = -1.2174 \cdot 10^{-5}$	$b_2 = -1.1989 \cdot 10^{-5}$	$b_2 = -0.81201 \cdot 10^{-5}$	$b_2 = -0.84868 \cdot 10^{-5}$
t(min) X $\epsilon(\%)$	t(min) X $\epsilon(\%)$	t(min) X $\epsilon(\%)$	t(min) X $\epsilon(\%)$
30 0.189 0.709	30 0.192 1.343	30 0.157 0.238	30 0.161 0.228
60 0.356 0.309	60 0.362 1.745	60 0.299 0.138	60 0.306 -0.016
90 0.501 0.901	90 0.510 2.804	90 0.426 1.899	90 0.436 2.367
108 0.578 0.247	108 0.589 1.836	108 0.495 0.257	108 0.507 0.290
155 0.740 -0.617	155 0.757 0.253	155 0.652 -0.687	155 0.666 -0.895
220 0.876 -0.849	220 0.904 -1.668	220 0.809 -0.812	220 0.824 -0.786
250 0.905 -0.571	250 0.937 -2.599	250 0.859 -0.356	250 0.873 -0.555
287 0.909 0.967	287 0.948 -2.736	287 0.899 -0.140	287 0.912 -0.057
	352 0.889 3.316	352 0.917 0.569	352 0.924 0.615
$\langle \epsilon(\%) \rangle = \pm 0.692$	$\langle \epsilon(\%) \rangle = \pm 2.215$	$\langle \epsilon(\%) \rangle = \pm 0.771$	$\langle \epsilon(\%) \rangle = \pm 0.934$
Var= $3.83 \cdot 10^{-4}$	Var= $4.42 \cdot 10^{-3}$	Var= $5.35 \cdot 10^{-4}$	Var= $7.85 \cdot 10^{-4}$

Tabla 11.2.9			Tabla 11.2.10			Tabla 11.2.11			Tabla 11.2.12		
T°= 70 °C			T°= 70 °C			T°= 70 °C			T°= 70 °C		
$m_{\text{tot}}^S = 13.98 \text{ g}$			$m_{\text{tot}}^S = 14.74 \text{ g}$			$m_{\text{tot}}^S = 15.14 \text{ g}$			$m_{\text{tot}}^S = 15.96 \text{ g}$		
$D^0 = 6.663 \text{ cm}$			$D^0 = 6.779 \text{ cm}$			$D^0 = 6.719 \text{ cm}$			$D^0 = 6.729 \text{ cm}$		
$e^0 = 0.665 \text{ cm}$			$e^0 = 0.68 \text{ cm}$			$e^0 = 0.671 \text{ cm}$			$e^0 = 0.745 \text{ cm}$		
$m_{s^0}^S = 1.23 \text{ g}$			$m_{s^0}^S = 1.31 \text{ g}$			$m_{s^0}^S = 1.15 \text{ g}$			$m_{s^0}^S = 1.03 \text{ g}$		
$b_1 = 9.5013 \cdot 10^{-3}$			$b_1 = 9.1282 \cdot 10^{-3}$			$b_1 = 9.3845 \cdot 10^{-3}$			$b_1 = 8.1950 \cdot 10^{-3}$		
$b_2 = -2.4608 \cdot 10^{-5}$			$b_2 = -2.2635 \cdot 10^{-5}$			$b_2 = -2.3811 \cdot 10^{-5}$			$b_2 = -1.8115 \cdot 10^{-5}$		
t(min)	X	$\varepsilon(\%)$	t(min)	X	$\varepsilon(\%)$	t(min)	X	$\varepsilon(\%)$	t(min)	X	$\varepsilon(\%)$
30	0.263	-0.389	30	0.253	-1.447	30	0.260	-0.111	15	0.119	-0.385
60	0.481	-0.649	60	0.466	-1.721	60	0.477	-0.035	35	0.265	-0.563
90	0.656	0.121	90	0.638	-0.319	90	0.652	-0.074	50	0.364	0.054
120	0.786	0.620	120	0.769	1.556	120	0.783	0.173	60	0.426	1.751
150	0.872	0.349	150	0.860	1.206	150	0.872	0.207	90	0.591	0.118
180	0.913	-0.593	180	0.910	-0.169	180	0.918	-0.374	120	0.723	-1.155
210	0.910	0.094	210	0.919	-0.771	210	0.921	0.131	219	0.926	0.209
$\langle \varepsilon(\%) \rangle = \pm 0.456$			$\langle \varepsilon(\%) \rangle = \pm 1.175$			$\langle \varepsilon(\%) \rangle = \pm 0.189$			$\langle \varepsilon(\%) \rangle = \pm 0.839$		
Var= $1.46 \cdot 10^{-4}$			Var= $9.66 \cdot 10^{-4}$			Var= $2.49 \cdot 10^{-5}$			Var= $4.93 \cdot 10^{-4}$		

Tabla 11.2.13			Tabla 11.2.14			Tabla 11.2.15			Tabla 11.2.16		
T°= 70 °C			T°= 70 °C			T°= 70 °C			T°= 70 °C		
$m_{\text{tot}}^S = 17.24 \text{ g}$			$m_{\text{tot}}^S = 17.87 \text{ g}$			$m_{\text{tot}}^S = 15.34 \text{ g}$			$m_{\text{tot}}^S = 16.94 \text{ g}$		
$D^0 = 6.948 \text{ cm}$			$D^0 = 6.91 \text{ cm}$			$D^0 = 6.719 \text{ cm}$			$D^0 = 6.824 \text{ cm}$		
$e^0 = 0.743 \text{ cm}$			$e^0 = 0.729 \text{ cm}$			$e^0 = 0.713 \text{ cm}$			$e^0 = 0.7 \text{ cm}$		
$m_{s^0}^S = 1.18 \text{ g}$			$m_{s^0}^S = 1.23 \text{ g}$			$m_{s^0}^S = 1.32 \text{ g}$			$m_{s^0}^S = 1.1 \text{ g}$		
$b_1 = 7.8103 \cdot 10^{-3}$			$b_1 = 7.7111 \cdot 10^{-3}$			$b_1 = 10.221 \cdot 10^{-3}$			$b_1 = 8.7372 \cdot 10^{-3}$		
$b_2 = -1.6573 \cdot 10^{-5}$			$b_2 = -1.6414 \cdot 10^{-5}$			$b_2 = -2.8197 \cdot 10^{-5}$			$b_2 = -2.0132 \cdot 10^{-5}$		
t(min)	X	$\varepsilon(\%)$	t(min)	X	$\varepsilon(\%)$	t(min)	X	$\varepsilon(\%)$	t(min)	X	$\varepsilon(\%)$
15	0.113	-0.343	15	0.112	-0.397	30	0.281	-0.726	30	0.244	-1.800
35	0.253	-0.506	35	0.250	-0.378	60	0.512	-0.176	60	0.452	-1.175
50	0.349	0.092	50	0.345	0.248	90	0.692	1.249	75	0.542	0.196
60	0.409	1.305	60	0.404	1.142	150	0.899	0.026	90	0.623	-0.528
90	0.569	-0.768	90	0.561	-0.805	180	0.926	-1.522	120	0.759	1.544
219	0.916	0.042	219	0.902	0.049	210	0.903	0.905	180	0.920	1.359
$\langle \varepsilon(\%) \rangle = \pm 0.668$			$\langle \varepsilon(\%) \rangle = \pm 0.621$			$\langle \varepsilon(\%) \rangle = \pm 0.936$			$\langle \varepsilon(\%) \rangle = \pm 1.245$		
Var= $2.69 \cdot 10^{-4}$			Var= $2.32 \cdot 10^{-4}$			Var= $5.25 \cdot 10^{-4}$			Var= $1.08 \cdot 10^{-3}$		

Tabla 11.2.17			Tabla 11.2.18			Tabla 11.2.19			Tabla 11.2.20		
T= 90 °C			T= 90 °C			T= 90 °C			T= 90 °C		
$m_{\text{tot}}^S = 15.58 \text{ g}$			$m_{\text{tot}}^S = 14.29 \text{ g}$			$m_{\text{tot}}^S = 16.77 \text{ g}$			$m_{\text{tot}}^S = 14.9 \text{ g}$		
$D^0 = 6.56 \text{ cm}$			$D^0 = 6.551 \text{ cm}$			$D^0 = 6.888 \text{ cm}$			$D^0 = 6.888 \text{ cm}$		
$e^0 = 0.685 \text{ cm}$			$e^0 = 0.688 \text{ cm}$			$e^0 = 0.674 \text{ cm}$			$e^0 = 0.641 \text{ cm}$		
$m_{s^0}^S = 1.15 \text{ g}$			$m_{s^0}^S = 0.98 \text{ g}$			$m_{s^0}^S = 1.2 \text{ g}$			$m_{s^0}^S = 1.02 \text{ g}$		
$b_1 = 12.312 \cdot 10^{-3}$			$b_1 = 14.514 \cdot 10^{-3}$			$b_1 = 14.753 \cdot 10^{-3}$			$b_1 = 14.972 \cdot 10^{-3}$		
$b_2 = -4.1082 \cdot 10^{-5}$			$b_2 = -5.5750 \cdot 10^{-5}$			$b_2 = -5.7589 \cdot 10^{-5}$			$b_2 = -5.9081 \cdot 10^{-5}$		
t(min)	X	$\varepsilon(\%)$	t(min)	X	$\varepsilon(\%)$	t(min)	X	$\varepsilon(\%)$	t(min)	X	$\varepsilon(\%)$
15	0.175	-0.043	15	0.205	0.083	15	0.208	-0.134	15	0.211	-0.128
30	0.332	-0.338	30	0.385	0.274	30	0.391	0.023	30	0.396	0.602
50	0.513	-1.288	50	0.586	-1.435	50	0.594	-1.159	50	0.601	-0.589
60	0.591	2.819	60	0.670	2.983	60	0.678	3.413	60	0.686	3.539
90	0.775	-1.129	90	0.855	-1.073	90	0.861	-1.032	90	0.869	-1.890
120	0.886	-0.383	120	0.939	-1.194	120	0.941	-1.910	120	0.946	-2.185
150	0.922	0.358	150	0.923	0.820	150	0.917	1.177	150	0.916	1.555
$\langle \varepsilon(\%) \rangle = \pm 1.269$			$\langle \varepsilon(\%) \rangle = \pm 1.429$			$\langle \varepsilon(\%) \rangle = \pm 1.652$			$\langle \varepsilon(\%) \rangle = \pm 1.852$		
Var= $1.13 \cdot 10^{-3}$			Var= $1.43 \cdot 10^{-3}$			Var= $1.91 \cdot 10^{-3}$			Var= $2.40 \cdot 10^{-3}$		

Tabla 11.2.21			Tabla 11.2.22			Tabla 11.2.23			Tabla 11.2.24		
T= 90 °C			T= 90 °C			T= 90 °C			T= 90 °C		
$m_{\text{tot}}^S = 19.09 \text{ g}$			$m_{\text{tot}}^S = 18.66 \text{ g}$			$m_{\text{tot}}^S = 14 \text{ g}$			$m_{\text{tot}}^S = 16.35 \text{ g}$		
$D^0 = 6.8 \text{ cm}$			$D^0 = 6.87 \text{ cm}$			$D^0 = 6.788 \text{ cm}$			$D^0 = 6.935 \text{ cm}$		
$e^0 = 0.7 \text{ cm}$			$e^0 = 0.71 \text{ cm}$			$e^0 = 0.75 \text{ cm}$			$e^0 = 0.75 \text{ cm}$		
$m_{s^0}^S = 1.28 \text{ g}$			$m_{s^0}^S = 1.25 \text{ g}$			$m_{s^0}^S = 0.85 \text{ g}$			$m_{s^0}^S = 1.06 \text{ g}$		
$b_1 = 10.187 \cdot 10^{-3}$			$b_1 = 11.036 \cdot 10^{-3}$			$b_1 = 14.761 \cdot 10^{-3}$			$b_1 = 13.924 \cdot 10^{-3}$		
$b_2 = -2.7198 \cdot 10^{-5}$			$b_2 = -3.2155 \cdot 10^{-5}$			$b_2 = -5.6922 \cdot 10^{-5}$			$b_2 = -5.1256 \cdot 10^{-5}$		
t(min)	X	$\varepsilon(\%)$	t(min)	X	$\varepsilon(\%)$	t(min)	X	$\varepsilon(\%)$	t(min)	X	$\varepsilon(\%)$
30	0.281	-0.614	30	0.302	-0.315	15	0.209	-0.661	15	0.197	-0.733
45	0.403	-0.435	45	0.432	-0.353	30	0.392	-0.860	30	0.372	-0.859
60	0.513	-0.033	60	0.546	0.057	45	0.549	1.803	45	0.523	1.321
90	0.697	0.345	90	0.733	0.018	60	0.681	-0.473	60	0.651	-0.692
120	0.831	0.717	120	0.861	0.666	90	0.867	0.559	90	0.838	0.502
150	0.916	-0.514	150	0.932	-0.397	120	0.952	-1.263	120	0.933	-0.179
						150	0.933	0.562	150	0.935	-0.033
$\langle \varepsilon(\%) \rangle = \pm 0.494$			$\langle \varepsilon(\%) \rangle = \pm 0.372$			$\langle \varepsilon(\%) \rangle = \pm 0.991$			$\langle \varepsilon(\%) \rangle = \pm 0.735$		
Var= $1.47 \cdot 10^{-4}$			Var= $8.29 \cdot 10^{-5}$			Var= $6.87 \cdot 10^{-4}$			Var= $3.78 \cdot 10^{-4}$		

11.3.2 Comentarios acerca del modelo de correlación más probable

Debe hacerse notar que como modelo equivalente al dado por la ec.(11.2), se tiene el Modelo de Wang y Singh (1978), el cual ha sido citado varias veces en la bibliografía relativa a secado de vegetales [ver por ej.: Midilli y col. (2002); Akpinar y col. (2003); Togrul y Pehlivan (2002); Ertekin y Yaldiz (2003); Long Wu y col.,(2007)]. Dicho modelo es comúnmente expresado como:

$$MR = 1 + At + Bt^2 \quad (11.5)$$

debiendo hacerse notar que las estimas del coeficiente cinético “A” resultaron siempre negativas. Es decir ($A < 0$), para el secado de cualquier tipo de vegetal.

En la ec.(11.5), la definición MR varía entre los distintos autores que han sido consultados. Por ejemplo, Ertekin y Yaldiz (2003), definen:

$$MR = \frac{M}{M^o} \quad (11.6)$$

En cambio, Diamante y Munro (1993), Yaldiz y Ertekin (2001), Yaldiz y col. (2001), adoptaron la siguiente definición:

$$Mr = \frac{M - M_{eq}}{M^o - M_{eq}} \quad (11.7)$$

donde: M, es el contenido de humedad de la muestra vegetal (masa de agua/masa de vegetal seco); MR, relación de humedad (masa de agua/masa inicial de agua que contiene la muestra vegetal húmeda); Mr, contenido de humedad libre de la muestra vegetal (masa de agua libre sin evaporar respecto de su masa de agua libre inicial); M_{eq} , contenido de humedad de equilibrio de la muestra vegetal (masa de agua de equilibrio/masa de sólido seco)

11.4 ANALISIS FENOMENOLOGICO DEL MODELO MÁS PROBABLE

En este párrafo se analizarán las principales características fenomenológicas que presenta el modelo cinético más probable, dado por la ec.(11.2).

11.4.1 Velocidad de secado en función del tiempo

En primer lugar, debe hacerse notar que derivando la ec.(11.2) con respecto del tiempo, t , y comparando la ecuación resultante con la ec.(8.19), se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{dX}{dt} = b_1 - 2b_2t = -\frac{n_W^{(m_i)} \Omega}{m_{tot}^S} \quad (11.8)$$

la cual, reordenada convenientemente, nos da que:

$$\frac{m_{tot}^S}{\Omega} \frac{dX}{dt} = -n_W^{(m_i)} \equiv r_{sec}$$

y, por consiguiente, se obtiene la siguiente ecuación para velocidad de secado de la muestra vegetal:

$$r_{sec} = \frac{m_{tot}^S}{\Omega} (b_1 - 2b_2t)$$

a través de la cual puede inferirse que la velocidad de secado de la muestra vegetal disminuye linealmente con el tiempo de procesamiento. Comparando este resultado con lo previsto en el Capítulo 3 (ver Fig. 3.2), podemos concluir que el modelo más probable no permite describir en detalle el conjunto de etapas en serie que se presenta durante el secado, y que ha sido señalado en la bibliografía. Esto puede justificarse por el hecho de que se ha procesado información experimental que ha sido obtenida en un sistema macroscópico.

Finalmente, se hace notar que la ec.(11.8) evaluada en $t = 0$, da el siguiente resultado:

$$\left. \frac{dX}{dt} \right|_{t=0} = b_1 = \frac{n_W^{(m_i)} \Omega^o}{m_{tot}^S} = \frac{w_{W^o}^G}{m_{tot}^S} \quad (11.9)$$

de la cual se deduce que a partir de datos experimentales del coeficiente b_1 , puede estimarse la velocidad inicial de secado: $w_{W^o}^G$.

11.4.2 Velocidad de secado en función del grado de secado

Otra variable que suele analizarse con bastante frecuencia en los procesos de secado de vegetales, es la velocidad del proceso en función del grado de secado de la muestra. Para ello se debe resolver en t la ec.(11.2), de la cual resulta:

$$t = \frac{b_1 - \sqrt{b_1^2 - 4b_2X}}{2b_2} \quad (11.10)$$

Finalmente, combinando las ecs.(11.8) y (11.10), se obtiene:

$$\frac{dX}{dt} = b_1 - 2b_2t = b_1\sqrt{1 - \beta X} \quad (11.11)$$

en la que el coeficiente β ha sido definido como:

$$\beta = \frac{4b_2}{b_1^2} \quad (11.12)$$

Debe hacerse notar que mediante la ec.(11.11) se toman en cuenta los cambios simultáneos, tanto, de la fuerza impulsora, como, estructurales que experimenta la muestra vegetal durante el proceso de secado, en función del grado de secado de la muestra con respecto de su correspondiente masa inicial. Es decir que en este caso, la velocidad de secado, resulta directamente proporcional a la raíz cuadrada de $(1 - \beta X)$.

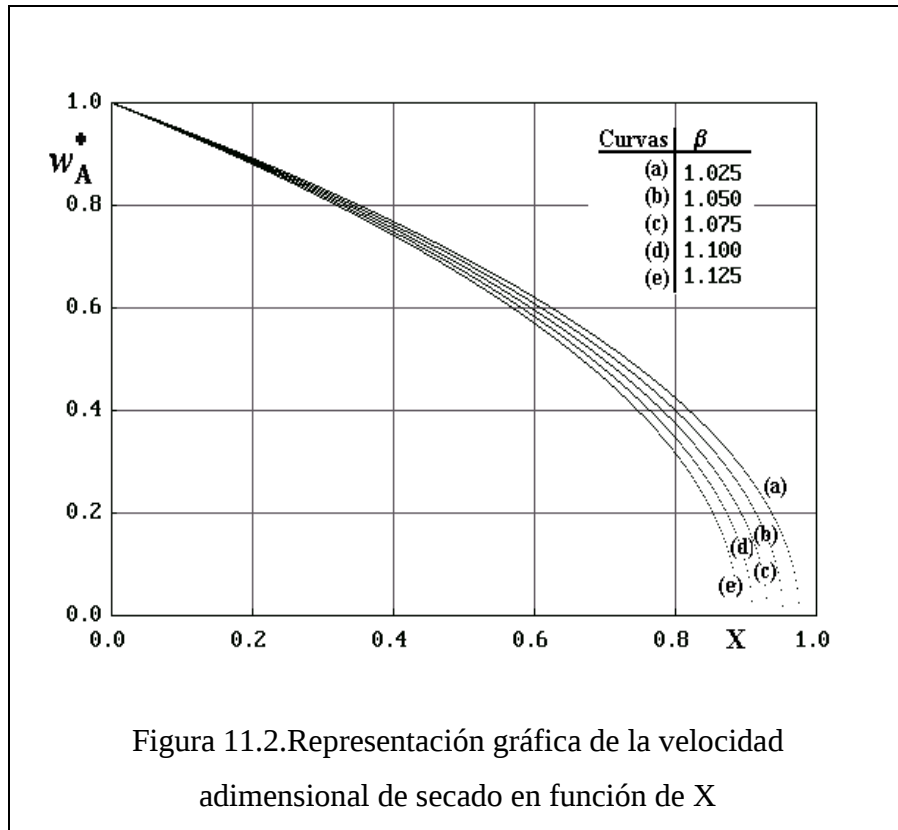
Dividiendo la ec. (11.11) por el coeficiente b_1 se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dX}{b_1 dt} = \sqrt{1 - \beta X} \equiv w_w^* \quad (11.13)$$

La ec.(11.13) expresa la velocidad adimensional de secado, w_w^* , en función del grado de secado de la muestra. De esta ecuación puede inferirse, a simple vista, que la velocidad del proceso se anula en el instante que X alcanza el valor de $1/\beta$.

Una representación gráfica de la ec. (11.13) se muestra en la Fig. 11.2, mediante una familia de curvas paramétricas en β .

Analizando la Fig. 11.2, se observa que la velocidad adimensional de secado, w_w^* , es máxima el inicio del proceso, y luego, a medida que aumenta X , disminuye con la raíz cuadrada de uno menos beta por X , de acuerdo con lo que predice el modelo más probable.



11.4.3 Análisis de los principales parámetros cinéticos del proceso

En la Tabla 11.3 se presenta un conjunto de datos relativos a las estimas de los coeficientes cinéticos y de los parámetros característicos del sistema experimental. Cada una de sus columnas tiene el significado siguiente:

Nº= número de la Tabla que identifica al conjunto de datos experimentales, X – t, que se obtuvieron a un mismo valor inicial de la temperatura y demás factores.

T = temperatura a la que se realizó el experimento, expresada en °C.

$\langle \varepsilon(\%) \rangle$ = Estima del error medio de regresión, expresado en: (%).

b_1 = estima adjunta a cada Tabla del coeficiente cinético b_1 , expresado en: min^{-1} .

b_2 = estima adjunta a cada Tabla del coeficiente cinético b_2 , expresado en: min^{-2} .

β = estima adjunta a cada Tabla del coeficiente β , calculado mediante la ec.(11.12).

$w_{w^0}^G$ = estima adjunta a cada Tabla del flujo de vapor de agua inicial, calculado mediante la ec.(11.9), y expresado en: kg/s.

$n_{W^o}^{(m_i)}$ = estima adjunta a cada Tabla de la densidad de flujo másico inicial, calculado mediante la ec.(11.9), expresada en unidades SI: kg/s m².

Tabla 11.3. Datos correspondientes a rodajas, coeficientes cinéticos y parámetros característicos del sistema							
Nº	T (°C)	$\langle \varepsilon(\%) \rangle$ (%)	$b_1 \cdot 10^3$ (1/min)	$b_2 \cdot 10^5$ (1/min ²)	β	$w_{W^o}^G \cdot 10^6$ (kg/s)	$n_{W^o}^{(m_i)} \cdot 10^4$ (kg/m ² s)
1	50	0.60	6.007	0.982	1.088	1.02	3.71
2		1.12	6.119	1.010	1.079	1.23	3.80
3		0.85	6.279	1.085	1.101	1.17	3.79
4		1.18	6.101	0.965	1.037	1.45	4.29
5		0.69	6.662	1.217	1.097	1.60	4.35
6		2.22	6.745	1.199	1.054	1.59	4.29
7		0.77	5.464	0.812	1.088	1.39	3.69
8		0.93	5.612	0.849	1.078	1.19	3.41
9	70	0.46	9.501	2.461	1.090	2.02	5.79
10		1.17	9.128	2.264	1.087	2.04	5.66
11		0.19	9.385	2.381	1.081	2.19	6.17
12		0.84	8.195	1.812	1.079	2.04	5.73
13		0.67	7.810	1.657	1.087	2.09	5.51
14		0.62	7.711	1.641	1.104	2.14	5.70
15		0.94	10.221	2.820	1.080	2.39	6.74
16		1.25	8.737	2.013	1.055	2.31	6.31
17	90	1.27	12.312	4.108	1.084	2.96	8.76
18		1.43	14.514	5.575	1.059	3.22	9.55
19		1.65	14.753	5.759	1.058	3.83	10.27
20		1.85	14.972	5.908	1.054	3.46	9.29
21		0.49	10.187	2.720	1.048	3.02	8.33
22		0.37	11.036	3.216	1.056	3.20	8.64
23		0.99	14.761	5.692	1.045	3.24	8.94
24		0.74	13.924	5.126	1.057	3.55	9.39

Con respecto de los datos que se presentan en la Tabla 11.3, debe hacerse notar que para calcular $n_{W^o}^{(m_i)}$, se ha supuesto que: $\Omega^o \approx A_{tot}^o$. En la misma, se observa claramente que el flujo de vapor de agua inicial, $w_{W^o}^G$, calculado mediante la ec.(11.9), incrementa con el aumento de temperatura de secado, T, como así también la densidad de flujo másico inicial $n_{W^o}^{(m_i)}$. También puede observarse que las estimas del parámetro β permanecen prácticamente invariables, resultando en consecuencia un parámetro característico del sistema, e independiente de la temperatura de secado, T. También se observa que las estimas de b_1 y b_2 incrementan a medida que aumenta la temperatura de secado.

11.4.4 Estimas del tiempo de secado

Otra propiedad importante que puede estimarse a partir de la ec. (11.11), es el tiempo de secado de la muestra. Este tiempo se alcanza en el instante en el que la velocidad del proceso se anula. Es decir:

$$\left. \frac{dX}{dt} \right|_{t=t_{\text{máx}}} = 0 = b_1 - 2b_2 t_{\text{máx}} \quad (11.14)$$

A partir de la ec.(11.14), se obtiene que el tiempo requerido para el secado de la muestra es:

$$t_{\text{máx}} = \frac{b_1}{2b_2} \quad (11.15)$$

En la Tabla 11.4 se presentan datos relativos a las estimas del tiempo final de secado para cada conjunto de datos experimentales. En dicha Tabla, cada una de sus columnas tiene el significado siguiente:

Nº= número de la Tabla que identifica al conjunto de datos experimentales, X – t, adjuntos a cada una de las muestras vegetales.

T= temperatura a la que se realizó el experimento, expresada en: °C.

t_{máx}= tiempo máximo estimado de secado adjunto a cada muestra vegetal, calculado mediante la ec. (11.15) y expresado en: min.

t_{máx}/m^S_{tot}° = tiempo máximo estimado de secado por unidad de masa inicial de la muestra, expresado en min/g.

t_{máx}/V^S_{tot}° = tiempo máximo estimado de secado por unidad de volumen inicial de la muestra, expresado en min/cm³.

t_{máx}/D° = tiempo máximo estimado de secado por unidad de diámetro inicial de la muestra, expresado en min/cm.

t_{máx}/e° = tiempo máximo estimado de secado por unidad de espesor inicial de la muestra, expresado en min/cm.

t_{máx}/A^o_{tot} = tiempo máximo estimado de secado por unidad de área inicial de la muestra, expresado en min/cm².

Tabla 11.4. Tiempo máximo de secado y su relación con algunos parámetros característicos de la muestra vegetal

Nº	T (°C)	$t_{\text{máx}}$ (min)	$t_{\text{máx}}/m_{\text{tot}}^S$ (min/g)	$t_{\text{máx}}/V_{\text{tot}}^S$ (min/cm ³)	$t_{\text{máx}}/D^0$ (min/cm)	$t_{\text{máx}}/e^0$ (min/cm)	$t_{\text{máx}}/A_{\text{tot}}^0$ (min/cm ²)
1	50	306	27.41	17.40	51.72	477.9	5.57
2		303	23.44	13.43	47.12	435.7	4.67
3		289	23.63	14.18	46.25	435.7	4.71
4		316	21.12	15.98	48.18	540.4	4.67
5		274	17.51	9.52	39.95	350.8	3.71
6		281	18.29	9.87	40.92	366.3	3.79
7		336	20.35	11.17	48.59	420.6	4.47
8		331	24.56	12.19	49.72	423.3	4.76
9	70	193	13.81	8.33	28.97	290.3	2.77
10		202	13.68	8.22	29.74	296.5	2.79
11		197	13.02	8.28	29.33	293.7	2.78
12		226	14.17	8.54	33.61	303.6	3.18
13		236	13.67	8.36	33.91	317.1	3.11
14		235	13.14	8.59	33.99	322.2	3.13
15		181	11.82	7.17	26.97	254.2	2.56
16		217	12.81	8.48	31.80	310.0	2.97
17	90	150	9.62	6.47	22.84	218.8	2.22
18		130	9.11	5.61	19.87	189.2	1.93
19		128	7.64	5.10	18.60	190.0	1.72
20		127	8.50	5.30	18.40	197.7	1.70
21		187	9.81	7.37	27.54	267.5	2.58
22		172	9.20	6.52	24.98	241.7	2.32
23		130	9.26	4.78	19.10	172.9	1.79
24		136	8.31	4.79	19.59	181.1	1.80

En la Tabla 11.4 puede observarse que el tiempo máximo de secado decrece con el aumento de la temperatura de secado, presentándose así éste último como uno de los principales factores del proceso.

Por otra parte, cabe acotar aquí la gran similitud hallada con los valores de $t_{\text{máx}}$ observados experimentalmente. (ver Tabla 3.1)

11.5 CINÉTICA DE LA EVAPORACIÓN DESDE UNA SUPERFICIE MOJADA

Los cambios fenomenológicos que experimenta una muestra vegetal cuando es sometida al proceso de secado, pueden explicarse por analogía con el efecto de enfriamiento adiabático que se observa por evaporación desde una superficie mojada.

Para analizar este caso se supondrá, en primer término, que alrededor de la muestra vegetal circula aire húmedo, el cual está constituido por una mezcla gaseosa de vapor de agua condensable, W , y aire seco no condensable, A_s . En segundo término, se supondrá que el agua líquida que contiene la muestra vegetal asciende desde su interior hasta su superficie interfacial por acción de la capilaridad.

Mediante un balance de calor sobre el área de la superficie interfacial de la muestra, Ω , se obtiene

$$n_W^{(m_i)} \lambda_W \Omega = q_c \Omega \quad (11.16)$$

donde: q_c , es la densidad de flujo de calor evaluado en la superficie interfacial; λ_W , es el calor latente de vaporización del agua

La ec.(11.16) ha sido deducida sobre la base de las siguientes hipótesis:

- H.1) El calor de mezcla de W y A_s en la fase gaseosa, es prácticamente despreciable.
- H.2) La transferencia de calor por radiación es despreciable, lo cual es admisible debido a que el sistema fue operado a temperaturas inferiores a 100 °C y en ausencia de fuentes internas radiantes.

Teniendo en presente el modelado de secado de una muestra vegetal húmeda que se presentó previamente en el Capítulo 8, los flujos de materia y calor, $n_W^{(m_i)}$ y q_c , en función de sus correspondientes fuerzas impulsoras pueden expresarse del modo siguiente:

$$n_W^{(m_i)} = k_c (\omega_{W\Omega} - \omega_{W\infty}) + n_W^{(m_i)} \omega_{W\infty} \quad (11.17)$$

$$q_c = h(T_\infty - T_\Omega) \quad (11.18)$$

donde: k_c , es el coeficiente de transferencia convectiva de masa; h , coeficiente de transferencia de calor por convección; $\omega_{W\Omega}$, fracción másica de vapor de agua evaluada en la superficie interfacial; $\omega_{W\infty}$, fracción másica de vapor de agua evaluada en el seno de la corriente gaseosa; T_Ω , temperatura evaluada en la superficie interfacial; T_∞ , temperatura evaluada en el seno de la corriente gaseosa.

Combinando las ecs. (11.17) y (11.18) con la ec.(11.16), luego de reordenar términos, se obtiene:

$$\frac{(\omega_{W\Omega} - \omega_{W\infty})}{(1 - \omega_{W\Omega})(T_{\infty} - T_{\Omega})} = \frac{h}{k_c \lambda_W} \quad (11.19)$$

Desde el punto de vista fenomenológico, el secado de un vegetal es un proceso lento. Por consiguiente existe una verdadera analogía entre los coeficiente fenomenológicos de transferencia de calor y de materia, asociados a sus respectivos fenómenos transporte por convección forzada que tienen lugar simultáneamente durante el proceso. Por tal motivo h y k_c pueden calcularse a partir de los factores j_H y j_D de Chilton – Colburn, sujetos a la restricción que: $j_H = j_D$, siendo ambos factores definidos, respectivamente, como:

$$j_H = \frac{h}{\rho_f c_{pf} v_{\infty}} Pr_f^{2/3} \quad (11.20)$$

$$j_D = \frac{k_c}{\rho_f v_{\infty}} Sc_f^{2/3} \quad (11.21)$$

donde: c_{pf} , calor específico por unidad de masa del fluido; v_{∞} , velocidad del fluido; ρ_f , densidad del fluido.

Si tenemos presente la restricción que establece que $j_H = j_D$, entonces por combinación de las ecs.(11.20) y (11.21) se obtiene:

$$\frac{h}{k_c} = c_{pf} \left(\frac{Sc}{Pr} \right)_f^{2/3} \quad (11.22)$$

cuya sustitución en la ec.(11.19) da:

$$\frac{(\omega_{W\Omega} - \omega_{W\infty})}{(1 - \omega_{W\Omega})} = \frac{c_{pf}}{\lambda_W} (T_{\infty} - T_{\Omega}) \left(\frac{Sc}{Pr} \right)_f^{2/3} = C \quad (11.23)$$

La ec.(11.23) establece una restricción que debe satisfacer el sistema durante el secado adiabático. A través de ella se puede justificar porqué el proceso de secado de rodajas de berenjenas resultó independiente del factor v_{∞} , dentro del rango de valores experimentados: 1 m/s; 2 m/s y 2.5 m/s.

Finalmente, debe hacerse notar que el valor de la constante C de la ec.(11.23), es específica del sistema líquido-sólido-gas que se encuentra en contacto, y de las variables independientes de las que dependen los coeficientes: c_{pf} , λ , y la relación de grupos adimensionales: $(Sc/Pr)_f$.

Capítulo 12

CONCLUSIONES

12.1. GENERALIDADES

El propósito general que guió el desarrollo del presente Trabajo de Tesis Doctoral, fue recabar información básica preliminar respecto del aprovechamiento de frutos de berenjena (*Solanum melongena* L. var. *Sanata*); y, de este modo, contribuir a la formulación de una tecnología de producción alternativa de aprovechamiento para los productores de la Región del Nordeste de la República Argentina.

Para lograr dicho propósito se estudió, como tema principal, la cinética del secado de frutos de berenjena, a partir de datos experimentales previamente programados, provenientes de ensayos realizados en el Laboratorio de Tecnología Química “Dr. Jorge Ramón Avanza”, (Fa.C.E.N.A, UNNE) Ciudad de Corrientes; y en los Laboratorios del Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA), Ciudad de La Plata.

El tratamiento de los datos experimentales de cinética de secado fue realizado en dos etapas significativas. En un primer momento, el mismo fue realizado mediante uso de la metodología clásica y ampliamente difundida en el área de secado de alimentos (Capítulo 9). En segunda instancia, se estimó conveniente replantear el problema de modelado del proceso de secado y el tratamiento de los datos experimentales, tarea que fue desarrollada a lo largo de los años 2008 y 2009 en el “Instituto para la Industria Química” (INIQUI), institución técnica-científica dependiente de: UNSa - CONICET. (Capítulo 11).

Además de los estudios de modelado cinéticos, se trataron otros temas importantes vinculados con la preparación, conservación y consumo de alimentos deshidratados, como por ej.: escaldado; pardeamiento; variación del contenido de nutrientes; envasado; desarrollo de microorganismos; almacenamiento; rehidratación. Mayores detalles acerca de estos temas, pueden verse en los Capítulos 4 a 7, del presente Trabajo de Tesis Doctoral.

Por último, se debe destacar que se ha realizado una profunda revisión de la bibliografía existente, sobre la totalidad de los temas tratados. Como resultado de esta tarea se recopilaron y analizaron alrededor de 280 publicaciones científicas y técnicas.

12.2. DESHIDRATACION MEDIANTE SECADO

Se estudió el proceso de deshidratación mediante secado de dos tipos de corte de muestras vegetales: una tipo rodaja y otra tipo lonja. En ambos tipos de muestras, la piel

del fruto fue conservada, procurando de este modo que la misma actuase como una membrana muy poco permeable al flujo difusivo de agua.

Para evaluar el efecto de la forma de las muestras vegetales y de sus longitudes características adjuntas sobre la velocidad de secado, se utilizaron muestras diferentes, en lo que se refiere a sus correspondientes factores. La velocidad de secado fue seguida a partir de la variación que experimenta la variable intensiva M en función del tiempo, t . Como puede verse en el Capítulo 3, la variable M , es definida como el contenido de humedad en base seca de la muestra vegetal y es muy utilizada en el área de secado de alimentos.

Mediante un conjunto de ensayos experimentales previos, se observó que la velocidad de secado por convección forzada, tanto de rodajas como de lonjas de berenjena, no estaba influenciada por la velocidad del aire de secado (al menos dentro del rango de valores experimentados del factor: v_{∞}); pero sí de su temperatura (ver Figs. 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6). A su vez se notó que el tiempo total de secado de rodajas de berenjena a cada condición ensayada, se incrementa con la disminución de la temperatura de secado y con el aumento del espesor de la muestra inicial (ver Tabla 3.1), independientemente del diámetro inicial. Además se observó que los valores del tiempo total de secado de rodajas y lonjas de berenjena de espesor análogo, fueron muy similares. También pudo observarse, a todas las condiciones ensayadas, que la velocidad de secado no presenta las etapas correspondientes a los periodos inicial y de velocidad constante que se indican en el Capítulo 3; y que todo el proceso transcurre durante el período de velocidad decreciente (ver Figs. 3.13 a 3.16), encontrándose en casi todos los casos que el mismo se desarrolla en dos sub-períodos. El primero denominado zona de alta humedad, y el segundo zona de baja humedad. El valor de humedad crítica, M^* , corresponde al punto de intersección de las dos zonas. El mismo fue determinado por regresión lineal de los datos experimentales correspondientes a cada sub-período, como se muestra en la Fig. 3.17.

12.3. CAMBIOS ESTRUCTURALES OBSERVADOS Y CUANTIFICADOS

Simultáneamente con el estudio de la velocidad de secado, se estudiaron los cambios de las dimensiones características de la muestra vegetal: espesor y diámetro; o bien espesor, eje mayor y eje menor, según el tipo de muestra que corresponda.

A todas las condiciones ensayadas pudo observarse a simple vista que a medida que transcurre el proceso de secado, las muestras vegetales (rodaja y lonja) presentan una disminución de sus correspondientes dimensiones características.

Por otra parte, a partir de un cierto contenido de humedad, las muestras iniciaban un proceso de deformación o alabeo, el cual dependía principalmente de las dimensiones iniciales de la muestra, o bien de las características intrínsecas de las mismas y en menor proporción, de la temperatura de operación del sistema. Al mismo tiempo, se observó que el espesor de las muestras tipo lonjas presentaba mayor grado de contracción respecto de las rodajas, y a su vez, en ambos casos, el espesor siempre disminuía más que las otras longitudes características. Es decir, que en la dirección axial de la muestra se producía el mayor porcentaje de contracción. (ver Tablas 4.1 y 4.2)

La variación de la longitud característica de cada una de las muestras vegetales (rodaja y lonja) presenta una relación de tipo lineal con su correspondiente fracción de humedad residual adjunta, M/M^o , respondiendo a una ecuación del tipo:

$$\frac{\ell}{\ell^o} = A + \frac{B M}{M^o} \quad (4.2)$$

siendo los coeficientes **A** y **B** estimados por regresión lineal de datos experimentales (ver Figs. 4.5, 4.6 y 4.7). No se encontró una relación definida de las pendientes con la temperatura de secado ni con las dimensiones iniciales de la muestra vegetal (ver Tablas 4.3 y 4.4)

La relación entre la variación del volumen adimensional de rodajas y lonjas de berenjena con la fracción de humedad remanente durante el secado de las mismas a las temperaturas ensayadas, es una función de tipo lineal, hasta el inicio del alabeo, como la expresada por la ec. (4.5), similar a la ec. (4.2) (ver Figs. 4.8 y 4.9; Tabla 4.7). Por otra parte, se encontró que es independiente de la temperatura de secado, encontrándose una única expresión que describe la contracción volumétrica para cada tipo de corte.

Además pudo observarse el cambio de la microestructura, mediante las micrografías electrónicas.

Por otra parte, pudo observarse que, luego de deshidratadas, las muestras tipo rodaja resultaban más fáciles de preparar, se aprovechaba mucho más el fruto, daban productos

menos frágiles y quebradizos, y, por consiguiente, eran más fáciles de manipular durante los procesos de empaquetado y de almacenamiento, que las muestras tipo lonja.

12.4. CAMBIOS QUIMICOS ESTUDIADOS

Las muestras vegetales utilizadas corresponden a rodajas con las siguientes dimensiones: diámetro inicial 6.637 (1 ± 0.040) cm y espesor inicial de 0.684 (1 ± 0.064) cm.

El fruto de berenjena contiene una elevada cantidad de agua (92,6%), mientras su porcentaje de hidratos de carbono (4.63%), proteínas (0.91%) y grasas (0.09%); carece de fibra, excepto una pequeña cantidad que se encuentra en la piel y en las semillas (Tabla 5.1).

La variación de la fracción remanente de azúcares durante el secado presenta una relación de tipo lineal con el tiempo de secado y es dependiente de la temperatura del aire de secado, siendo mayor para rodajas secadas a 90°C. El porcentaje total de disminución es superior al 60% en todos los casos. (Fig. 5.1)

La variación del pH de rodajas de berenjena durante el secado a 50°C, 70°C y 90°C no presentó un comportamiento definido a lo largo del mismo, como puede observarse en la Fig. 5.3, sin embargo el pH a tiempo final de secado a 70°C y 90°C fue menor al alcanzado por las rodajas secadas a 50°C.

El pardemiento de las rodajas de berenjena durante el secado fue evidente a las diferentes temperaturas ensayadas, como puede observarse en las Figs. 4.2, 4.3 y 4.4. Debe hacerse notar que la metodología propuesta en el ítem 2.4.d del Capítulo 2 relativa a la preparación de las muestras vegetales para luego evaluar el pardeamiento, sorteó el inconveniente de carecer del instrumental específico en Corrientes. Estudios futuros podrían realizarse para validar dicha metodología.

El valor “L” de la pulpa de rodajas liofilizadas disminuyó en un valor cercano al 7% respecto del obtenido para rodajas frescas (recién cortadas) y el valor de BI se incrementó en un valor cercano al 20%.

A todas las temperaturas ensayadas se observa un incremento lineal de $\Delta A_{420-550}$ con el tiempo de secado, (ec. 5.7). Las pendientes halladas, presentan una relación tipo Arrhenius con la temperatura de secado de las rodajas (Tabla 5.3).

El tratamiento de las muestras por inmersión en soluciones de metabisulfito de sodio 0.5% p/v durante tres minutos resultó ser el más efectivo para disminuir el pardeamiento de las rodajas de berenjena durante el secado, a todas las temperaturas ensayadas. El porcentaje de disminución del pardeamiento respecto de las rodajas sin tratar fue del orden de 70% a 50°C, 60°C y 70°C; y del 55% a 90°C (Fig. 5.15 y 5.16). A 60°C y 70°C, se observa que el tratamiento por inmersión en soluciones de metabisulfito de sodio 0.5% p/v disminuye la velocidad de secado, mientras que a 80 °C y 90°C no hay diferencias significativas entre las rodajas tratadas y no tratadas.

12.5. GRADO DE REHIDRATACION O REHIDRATABILIDAD

Se estudió el grado de rehidratación, RR, de las muestras tipo rodajas en función del tiempo. Se trabajó con muestras que presentaban un espesor inicial de 0.684 (1 ± 0.064) cm y 1.275 (1 ± 0.094) cm; en ambos casos el diámetro de las mismas fue del orden de 6.637 (1 ± 0.04) cm. Las temperaturas de rehidratación ensayadas fueron: 25°C y 100°C.

Además, se incluyó el estudio de la rehidratabilidad de rodajas de espesor menor tratadas por inmersión durante tres minutos en soluciones de metabisulfito de sodio 0.5% p/v previo al secado.

También se estudiaron: a) el grado de rehidratación máxima que se alcanzó en cada caso, RR_{max} ; b) el porcentaje de recuperación de agua con respecto al producto fresco, COR; y, c) la capacidad de retención de materia seca, CRS.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de RR en función del tiempo (Fig.6.1 y 6.2), se observó que independientemente del tratamiento previo al secado y de la temperatura del proceso de secado, las rodajas presentan un periodo de reconstitución inicial relativamente rápido seguido de un incremento gradual de su peso con tendencia a una tasa máxima de rehidratación (RR_{max}).

a) Rehidratación de rodajas no tratadas antes del secado

La velocidad de rehidratación de rodajas de berenjena deshidratadas no tratadas fue mayor a 100°C que a 25°C, independientemente de la temperatura de secado y de las dimensiones iniciales de las muestras vegetales, alcanzándose los valores máximos en menor tiempo (excepto aquellas que fueron secadas a 50°C y espesor inicial 0.684 (1 ± 0.064) cm, cuya capacidad de sorción máxima fue mayor a 25°C que a 100°C). Esta dependencia de la temperatura es mayor al inicio del proceso de rehidratación. Las rodajas de espesor menor presentan una mayor velocidad de rehidratación a 25°C, excepto para aquellas secadas a 80°C (Fig. 6.5 y 6.6).

La rehidratación máxima, RR_{max} , alcanzada por rodajas de espesor inicial 0.684 (1 ± 0.064) cm, es mayor a 100°C que a 25°C, excepto en el caso de rodajas secadas a 50°C. Un comportamiento similar presentan las rodajas de espesor mayor, con la diferencia que las rodajas secadas a 90°C alcanzan un RR_{max} a 25°C. Por otra parte, se observa que a las dos temperaturas de rehidratación ensayadas, las rodajas de espesor inicial 0.684 (1 ± 0.064) cm, alcanzaron mayores grados de rehidratación que las de espesor mayor.

El grado de recuperación de peso inicial de las rodajas secadas a 60°C, 70°C y 80°C, fue mayor a 100°C que a 25°C ($p < 0.05$), encontrándose además que las rodajas de espesor inicial 0.684 (1 ± 0.064) cm presentaron valores superiores al de las rodajas de espesor 1.275 (1 ± 0.094) cm. En cambio, los valores COR obtenidos para rodajas secadas a 50°C y 90°C, no presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los dos espesores y las dos temperaturas de rehidratación ensayados. Se observa además que el grado de recuperación del peso inicial alcanzado no presenta una relación definida con la temperatura de secado de las rodajas.

La capacidad de retención de materia seca (CRS) de las rodajas deshidratadas es mayor a 25°C que a 100°C, independientemente de la temperatura de secado y del espesor inicial de la muestra. (excepto a 60°C y $e^o = 1.291 \pm 0.112$ cm), presentando una mayor variabilidad las rodajas rehidratadas a 100 °C.

b) Rehidratación de rodajas tratadas antes del secado

La temperatura de secado presenta influencia sobre el grado de rehidratación alcanzado por las rodajas pretratadas, ya que RR_{max} se incrementa con la misma, no ocurre

así en el caso de la rehidratación a 100°C, probablemente debido al hecho de que las rodajas se desarman y hay mayor error en la determinación (Tabla 6.4). Además, el grado de rehidratación alcanzado por las rodajas tratadas a 25°C es superior al de las no tratadas, lo que indicaría que el tratamiento con metabisulfito de sodio favorecería la rehidratación de éstos productos.

La temperatura de rehidratación no presenta una influencia significativa sobre los valores COR de rodajas tratadas, excepto a 60°C donde el COR es mayor a 100°C que a 25°C.

Los valores COR obtenidos para rodajas tratadas (ver Tabla 6.6) no presentan diferencias significativas con los valores hallados para rodajas no tratadas y secadas a las distintas temperaturas ensayadas, excepto a 60°C, donde el COR de la tratada es mayor de la no tratada.

Los valores de capacidad de retención de materia seca obtenidos no se ven afectados por la temperatura de rehidratación, salvo en el caso de las rodajas secadas a 90°C. Únicamente en las rodajas tratadas y luego secadas a 60°C presentan mayor grado de retención de materia seca que su par no tratado.

12.6 ISOTERMAS DE ADSORCION Y ALMACENAMIENTO

El modelo propuesto por Gab (van den Berg, 1981) es el que proporciona el mayor grado de ajuste de los datos experimentales, con un error promedio de %P = 4.3, lo que permitiría determinar el comportamiento de las rodajas de berenjenas deshidratadas cuando son expuesta a entornos con diferentes temperaturas (5°C a 30°C) y humedad relativa. No se encontraron diferencias significativas entre las isotermas de adsorción a 5°C y 30°C de rodajas secadas a 50°C, 70°C y 90°C.

12.7 TRATAMIENTO CINETICO

12.7.1 Modelado del sistema experimental

En el Capítulo 8 se analizó y modeló el sistema experimental, y como resultado de ello se obtuvieron las siguientes ecuaciones:

Para la fase gaseosa:

$$\begin{aligned}\frac{dm_A^G}{dt} &= F_{mA1}^G - F_{mA2}^G + w_{tot}^G \\ &= \rho_{A1}^G F_{VA1}^G - \rho_{A2}^G F_{VA2}^G + w_{tot}^G\end{aligned}\quad (8.11)$$

$$\begin{aligned}\frac{dm_W^G}{dt} &= F_{mW1}^G - F_{mW2}^G + w_W^G \\ &= \rho_{W1}^G F_{VW1}^G - \rho_{W2}^G F_{VW2}^G + w_W^G\end{aligned}\quad (8.12)$$

$$F_{mAs1}^G = F_{mAs2}^G = \rho_{As1}^G F_{VAs1}^G = \rho_{As2}^G F_{VAs2}^G \quad (8.13)$$

Para la muestra vegetal húmeda:

$$\begin{aligned}\frac{dX}{dt} &= -\frac{w_W^G}{m_{tot}^S} \\ &= -\frac{n_W^{(m_i)} \Omega}{m_{tot}^S} \quad \text{negativa}\end{aligned}\quad (8.19)$$

En el Capítulo 8 se demostró que para modelar la velocidad de secado, sólo basta con seguir el cambio que experimenta la masa de la muestra vegetal en función del tiempo, manteniendo constante el resto de los factores. La variable intensiva X , fue definida del modo siguiente:

$$X = \frac{m_{tot}^S - m_{tot}^L}{m_{tot}^S} = \frac{m_{W^o}^L - m_W^L}{m_{tot}^S} \quad (8.20)$$

Donde: X , es masa de agua evaporada con respecto de la masa total inicial de la muestra vegetal húmeda. También puede interpretarse como “grado de secado de la muestra vegetal húmeda con respecto de su masa inicial”.

Como se dijo en el Capítulo 8, la ec.(8.19) es *fundamental* para el modelado de secado de vegetales, por los siguientes motivos: 1º) porque describe la velocidad de cambio macroscópico que experimenta la variable intensiva: X ; 2º) porque ha sido

deducida independientemente de las fuerzas impulsoras que puedan hallarse involucradas en la densidad de flujo másico de vapor de agua: $n_w^{(m_i)}$; 3º) porque ha sido deducida independientemente de los cambios estructurales que pueda experimentar el área de la superficie interfacial de la muestra vegetal húmeda: Ω .

12.7.2 Modelos cinéticos aplicados al secado individual de rodajas y lonjas de berenjena

La aplicación de diferentes modelos a los datos experimentales de secado persigue diversos fines entre ellos la comprensión del proceso de secado propiamente dicho, la predicción de perfiles de humedad, así como el pronóstico del tiempo total de secado para una muestra dada. Lógicamente que se hace necesario el planeamiento de la mínima cantidad de rutinas experimentales que luego permitan, predecir las curvas de secado.

Modelo Basado en la Segunda Ley de Fick

Teniendo en cuenta el modelo cinético tradicionalmente utilizado en el área de secado, se aplicó dicho modelo a los datos experimentales de secado de rodajas y lonjas de berenjena. Se consideraron a las mismas como finas láminas infinitas, donde la pérdida de agua se produce solamente en sentido axial, es decir por ambas caras, entonces la solución de la segunda ley de Fick se reduce a la siguiente expresión:

$$\ln Mr = \ln \left(\frac{M - M_{eq}}{M^o - M_{eq}} \right) = - \frac{\pi^2 \mathcal{D}_{ef} t}{e^2} \quad (9.5)$$

El coeficiente de difusividad efectiva asociado a cada muestra, $\mathcal{D}_{ef}$, fue calculado teniendo en cuenta el espesor instantáneo experimental y la contracción volumétrica, tanto para las muestras tipo rodajas y tipo lonjas. Los valores obtenidos se encuentran dentro del rango de valores informados para otros vegetales (ver Tablas 9.1, 9.2, 9.3 y 9.4). En el primer caso, si bien el grado de ajuste a los datos experimentales es inferior (error porcentual comprendidos entre un 15 % y 20 %) que al tener en cuenta la contracción volumétrica (error porcentual varía entre 1 y 8 %, excepto a 80°C para muestras tipo lonjas donde es del orden del 16%), presenta la ventaja de cubrir completamente el proceso de secado; no ocurre lo mismo si se tiene en cuenta la contracción volumétrica, ya que el mismo es efectivo hasta el momento del alabeo de las muestras vegetales. Es recomendable

tener en cuenta que los valores de RMSE, MBE y %E fueron calculados en base a la variable M_r , tal y cual es frecuentemente calculado en la bibliografía consultada, encontrándose éstos en el orden de los valores hallados por otros investigadores para diversos productos frutihortícolas, incluida la berenjena. También se verificó que los valores de D_{ef} , siguen un comportamiento tipo Arrhenius con la variación de la temperatura.

En las Tabla 12.1 y 12.2 se presentan los resultados derivados del cálculo del tiempo máximo de secado (hasta un contenido de M aproximado a 0.3) de rodajas de berenjena de, $D^o=6.637 (1 \pm 0.04)$ cm y $e^o=0.684 (1 \pm 0.064)$ cm y lonjas de berenjena de espesor inicial, $e^o= 0.664 (1 \pm 0.086)$ secadas individualmente, empleando la ec. (9.5).

En la Tabla 12.1 se utilizaron los coeficientes de difusividad, D_{ef} , obtenidos a partir de espesores medidos experimentalmente durante el proceso de secado, tanto para la muestra tipo rodaja y tipo lonja (ver tablas 9.1 y 9.2). En primera instancia se consideró el espesor inicial e^o y luego el valor de e' , que corresponde al valor teórico calculado a partir de la expresión que describe la contracción del espesor respecto del contenido en humedad residual, a cada temperatura de secado. [ver ec. (4.2); tablas 4.3 y 4.5]. En la Tabla 12.2 se utilizaron los valores de D_{ef} logrados a partir de los espesores calculados teniendo en cuenta la contracción volumétrica, tanto para la muestra tipo rodaja y tipo lonja. (Tablas 9.3 y 9.4), utilizando el valor medio de e^o para el cálculo.

Tabla 12.1: Estimaciones de tiempo máximo de secado calculados a partir de valores de D_{ef} obtenidos a partir de valores de espesores medidos experimentalmente

Tipo de muestra	T (°C)	$D_{ef} (m^2/s) \times 10^{10}$	$t_{m\acute{a}x} (min)$	
			e^o	e'
Rodajas	50	2.96	1264.3	415.7
	60	3.38	992.0	453.4
	70	4.69	774.7	344.8
	80	5.21	664.2	295.6
	90	7.69	456.5	207.1
Lonjas	50	1.72	2075.9	341.3
	70	2.33	1242.5	217.8
	80	3.30	1153.8	167.8
	90	3.47	869.8	138.9

Tabla 12.2: Estimaciones de tiempo máximo de secado calculados a partir de valores de D_{ef} obtenidos a partir de valores de espesores calculados a partir de la contracción volumétrica

Tipo de muestra	T (°C)	D_{ef} (m ² /s) $\times 10^{10}$	$t_{m\acute{a}x}$ (min)
Rodajas	50	3.73	1001.5
	60	4.66	719.7
	70	4.93	737.5
	80	6.17	560.9
	90	7.95	441.8
Lonjas	50	1.69	2110.3
	70	2.32	1243.5
	80	4.11	925.6
	90	5.73	526.5

Se hace notar que mediante este procedimiento, se predicen valores de tiempo máximo de secado a partir de e° muy superiores a los que se obtuvieron experimentalmente (ver Tabla 3.1). Por otra parte, si bien los $t_{m\acute{a}x}$ de secado calculados a partir de e' , son más próximos que los anteriores, se hace necesario, para su cálculo, el conocimiento de la variación del espesor de las muestras vegetales durante el proceso de secado a cada temperatura ensayada.

Modelo cinético propuesto en el presente Trabajo de Tesis Doctoral

En el Capítulo 11 de este Trabajo de Tesis Doctoral, para el procesamiento de los datos experimentales de secado individual de rodajas de berenjena se utilizó un software que fue originalmente desarrollado por Quiroga y col. (2000), para el tratamiento cinético específico de *transformaciones fluido-sólido reactivo*; basado en la monografía: “*Modelado cinético de las transformaciones fluido-sólido reactivo*”, de Quiroga, Avanza y Fusco (1996).

El software actúa como un simulador del proceso de secado. En este caso, la resolución del problema consiste en integrar la ec. (8.19) con 110 modelos diferentes que se han propuesto para $n_w^{(m_i)}$ y Ω , ya sea en función de X y/o de t ; y, simultáneamente, estimar del mejor modo posible los parámetros cinéticos y geométricos correspondientes a cada uno de los modelos.

La heterogeneidad que presentan las muestras vegetales húmedas que se utilizaron durante la experimentación fue evidente y, a la vez, permitió justificar porqué se ha considerado conveniente hacer un tratamiento cinético independiente al conjunto de datos experimentales adjuntos a cada una de las muestras. (ver Tabla 11.1)

Cada una de las corridas experimentales que fueron obtenidos a una misma temperatura y los demás factores a sus correspondientes niveles, fue procesada independientemente de las restantes. Como resultado del procesamiento de todas las tablas, se obtuvo el siguiente modelo como el más probable:

$$X = b_1t - b_2t^2 \quad (11.2)$$

El modelo formulado por la ec. (11.2), consta de dos coeficientes fenomenológicos: b_1 y b_2 . A través de ellos se toman en cuenta, implícitamente, los efectos combinados de la fuerza impulsora que da origen a la densidad de flujo másico, $n_w^{(m_i)}$, y a los cambios estructurales que experimenta la muestra vegetal durante el proceso de secado. Las unidades de ambos coeficientes son $[\text{min}^{-1}]$ y $[\text{min}^{-2}]$, respectivamente. Este modelo fue seleccionado como más probable por dar una estima de error promedio de regresión de todas las tablas, inferior a 1% (ver Fig. 11.1).

En las Tablas 11.2.1 a 11.2.24, se presentó un resumen de los resultados que se obtuvieron mediante el tratamiento cinético de cada conjunto de datos experimentales, correspondientes al secado individual de las rodajas de berenjena. Cada una de las tablas es inicializada con datos correspondientes al estado de inicial de los factores: T , m_{tot}^S , D^0 , e^0 y m_s^S , a los que se realizó el experimento.

A renglón seguido se dieron las estimas correspondientes a los coeficientes cinéticos b_1 y b_2 , expresados en $(1/\text{min})$ y $(1/\text{min}^2)$, respectivamente. A partir de las estimas de b_1 y b_2 se calculó el tiempo máximo de secado, $t_{\text{máx}}$, mediante la ec. (11.15), los cuales fueron detallados en la Tabla 11.4, que se transcribe a continuación.

$$t_{\text{máx}} = \frac{b_1}{2b_2} \quad (11.15)$$

Se observa que el tiempo máximo de secado decrece con el aumento de la temperatura de secado, presentándose así éste último como uno de los principales factores

del proceso. Por otra parte, cabe acotar aquí la gran similitud hallada con los valores de $t_{\max}$ observados experimentalmente. (ver Tabla 3.1)

Nº	T (°C)	$t_{\max}$ (min)	$t_{\max}/m_{\text{tot}}^S$ (min/g)	$t_{\max}/V_{\text{tot}}^S$ (min/cm ³)	$t_{\max}/D^0$ (min/cm)	$t_{\max}/e^0$ (min/cm)	$t_{\max}/A_{\text{tot}}^0$ (min/cm ²)
1	50	306	27.41	17.40	51.72	477.9	5.567
2		303	23.44	13.43	47.12	435.7	4.669
3		289	23.63	14.18	46.25	435.7	4.708
4		316	21.12	15.98	48.18	540.4	4.675
5		274	17.51	9.52	39.95	350.8	3.712
6		281	18.29	9.87	40.92	366.3	3.789
7		336	20.35	11.17	48.59	420.6	4.467
8		331	24.56	12.19	49.72	423.3	4.760
9	70	193	13.81	8.33	28.97	290.3	2.768
10		202	13.68	8.22	29.74	296.5	2.793
11		197	13.02	8.28	29.33	293.7	2.779
12		226	14.17	8.54	33.61	303.6	3.180
13		236	13.67	8.36	33.91	317.1	3.107
14		235	13.14	8.59	33.99	322.2	3.132
15		181	11.82	7.17	26.97	254.2	2.556
16		217	12.81	8.48	31.80	310.0	2.967
17	90	150	9.62	6.47	22.84	218.8	2.217
18		130	9.11	5.61	19.87	189.2	1.931
19		128	7.64	5.10	18.60	190.0	1.719
20		127	8.50	5.30	18.40	197.7	1.700
21		187	9.81	7.37	27.54	267.5	2.578
22		172	9.20	6.52	24.98	241.7	2.315
23		130	9.26	4.78	19.10	172.9	1.791
24		136	8.31	4.79	19.59	181.1	1.798

Posteriormente, se estimaron nuevamente los valores de los parámetros b_1 y b_2 , mediante una regresión no lineal (polinómica, grado 2), utilizando software Excel de Microsoft (2003), a partir de los datos experimentales de M en función del tiempo de secado, a cada temperatura ensayada. Y luego se calculó el $t_{\max}$ utilizando la ec. (11.15) Los resultados promedios obtenidos se detallan a continuación, presentando los mismos bastante similitud a los hallados experimentalmente.

Tabla 12.3: Tiempo máximo de secado de rodajas secadas individualmente, calculado por aplicación de la ec.(11.15)

T (°C)	$b_1 \times 10^2$	$b_2 \times 10^4$	$t_{\text{máx}} \text{ (min)}$	
			cal	exp
50	7.59	1.27	298.8	294
60	6.96	1.28	271.9	300
70	13.3	3.33	199.7	230
80	11.9	2.85	208.8	210
90	19.9	7.55	131.8	150

Tabla 12.4: Tiempo máximo de secado de lonjas secadas individualmente, calculado por aplicación de la ec. (11.15)

T (°C)	$b_1 \times 10^2$	$b_2 \times 10^4$	$t_{\text{máx}} \text{ (min)}$	
			cal	exp
50	5.76	0.66	436.4	360
70	10.9	2.40	227.1	230
80	11.6	2.65	218.8	200
90	16.3	5.77	141.2	150

12.7.3 Modelos cinéticos aplicados al secado en bandejas de rodajas de berenjena

Teniendo en cuenta el grado de ajuste a los datos experimentales y la simplicidad del modelo, el modelo de Wang y Singh (1978) sería el más adecuado para describir el secado de rodajas de berenjena en bandejas, tratadas previamente por inmersión en soluciones de metabisulfito de sodio 0.5% p/v durante tres minutos, sin por ello dejar de tener en cuenta que los modelos de Page, logarítmico y de Midilli presentaron valores promedio de R^2 del orden de 0.99. Por otra parte las rodajas no mostraron una variación significativa en el valor del índice de pardeamiento, BI, durante todo el proceso.

En la Tabla 12.5 se presentan los resultados obtenidos del cálculo del $t_{\text{máx}}$ de secado de rodajas en bandejas, realizado en base a los valores obtenidos de las constantes del modelo de Page.

Tabla 12.5: Tiempo máximo de secado de rodajas secadas en bandejas, calculado a partir del modelo de Page

Modelo	T (°C)	MR a $t_{\max}$ experimental	$t_{\max}$ experimental (min)	Constantes modelo		$t_{\max}$ calculado (min)
				$k \times 10^3$	n	
Page	50	0.020	400	1.942	1.225	467.2
	60	0.017	300	2.099	1.295	346.5
	70	0.014	270	2.375	1.322	317.8
	80	0.015	195	2.138	1.409	220.1

En la Tabla 12.6 se presentan los resultados obtenidos del cálculo del tiempo máximo de secado para rodajas de berenjena tratadas y luego secadas en bandejas, mediante la ec. (11.15) a partir de las estimas de b_1 y b_2 mediante regresión polinómica de grado 2 de las curvas de secado representadas como $M = F(t)$, utilizando la ec. (11.2).

Tabla 12.6: Tiempo máximo de secado de rodajas secadas en bandejas, calculado por aplicación de la ec. (11.15)

T (°C)	$b_1 \times 10^2$	$b_2 \times 10^4$	$t_{\max}$ (min)
50	5.49	0.595	460.7
60	7.69	1.18	325.6
70	9.51	1.87	254.0
80	12.5	2.89	216.3

Nuevamente los valores de tiempo máximo de secado obtenidos mediante la ec. (11.15) fueron más próximos a los resultados obtenidos experimentalmente, que los logrados a partir del modelo de Page.

Finalmente, cabe destacar aquí que el modelo cinético encontrado ajusta a los datos experimentales de secado individual de rodajas de berenjena a las distintas temperaturas ensayadas con un error promedio menor al 1%, utilizando la variable X , definida anteriormente. Y a su vez permitió el cálculo del tiempo máximo de secado de rodajas y lonjas de berenjena secadas individualmente y en bandejas, a partir de datos experimentales de secado expresados como $M = F(t)$.

BIBLIOGRAFÍA

1. Afzal, T.M. y Abe, T. (1999). Some fundamental attributes of far infrared radiation drying of potato. *Drying Technol.*, 17, 137–155.
2. Aguerre, R. J.; Suarez, C. y Viollaz, P. E. (1989a). New Bet type multilayer sorption isotherm. Part I: Theoretical derivation of the model. *Lebensm. Wiss. Technol.*, 22, 188-191.
3. Aguerre, R. J.; Suarez, C. y Viollaz, P. E. (1989b). New Bet type multilayer sorption isotherm. Part II: Modelling water sorption in foods. *Lebensm. Wiss. Technol.*, 22, 192-195.
4. Ajibola, O. (1989). Thin-layer drying of melon seed. *J. Food Eng.*, 9, 306 – 320.
5. Akanbi, Charles T.; Adeyemi, R. S.; Ojo, A. (2006). Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices. *J. Food Eng.* 73, (2), 157-163.
6. Akpinar, E. K. y Bicer, Y. (2005). Modelling of the drying of eggplants in thin-layers. *Int. J. Food Sci. Technol*, 40, 273–281.
7. Akpinar, E. K. & Dincer, I. (2005) Moisture transfer models for slabs drying. *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 32, 80-93.
8. Akpinar, E. K.; Bicer, Y.; Yildiz, C. (2003a). Thin layer drying of red pepper. *J. Food Eng.*, 59, 99-104.
9. Akpinar, E., Midilli, A. y Bicer, Y. (2003b). Single layer drying behaviour of potato slices on a convective cyclone dryer and mathematical modeling. *Energy Convers. Manage.*, 44(10), 1689-1705.
10. Alzamora, S. T. (2002). Preservación I: Alimentos conservados por factores combinados. *Temas en Tecnología de alimentos*. CYTED. Ed. Alfaomega. México. vol.1, 45-47.
11. Anet, E. (1964). 3-Deoxyglycosuloses (3-Deoxyglycosones) and the degradation of carbohydrates. *Adv. Carbohydr. Chem.* 19:181.
12. AOAC, 1990. Official Methods of Analysis, 15th Edition. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC
13. Ayensu, A. (1997). Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *Sol. Energy*, 59 (4–6), 121–126.
14. Azzouz, S.; Guizani, A.; Jomaa, W.; Belghith, A. (2002). Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. *J. Food Eng.*, 55, 323-330.
15. Badger, Walter L. & Banchero, Julius. (1964). *Introducción a la Ingeniería Química*. Mc Graw Hill-Book Company, Inc. España. Ed. Castilla.

16. Bai Yan, Rabman, M.S., Perera, C.O.; Smith, B. and Melton, L. (2002). Structural changes in apple rings during air-drying with controlled temperature and humidity. *J. Agric. Food. Chem.*, 60, 3179-3185.
17. Balaban, M., y Pigott, G. M. (1988). Mathematical model of simultaneous heat and mass transfer in food with dimensional changes and variable transport parameters. *J. Food. Sci.*, 53 (3), 935-939.
18. Baloch, W. A., Khen, S., y Baloch, A. K. (1997). Influence of chemical addition on the stability of dried tomato powder. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 32, 117–120.
19. Banjongsinsiri, P.; Shields, J.; Wicker, L. (2004). Vacuum infusion of plant or fungal pectinmethylesterase and calcium affects the texture and structure of eggplant. *J. Agric. Food Chem*, 52, 8214-8223.
20. Barbosa-Cánovas, G. & Vega-Mercado, H. (2000). *Deshidratación de alimentos*. Ed. Acribia. Zaragoza. España.
21. Bartolomé, L. G. & Hoff, J. E. (1972). Firming of potatoes: Biochemical effects of preheating. *J. Agric. Food. Chem.*, 20, 266-270.
22. Belitz, H. y Grosh, W. (1988). Hortalizas, verduras y productos hortícolas. *Química de los alimentos*. Ed. Acribia, S.A. 2^{da} edición Zaragoza, España.
23. Bolin, H. R., y Huxsoll, C. C. (1987). Scanning electron microscope image analyzer determination of dimensional postharvest changes in fruit cells. *J. Food. Sci.*, 6 (52), 1649–1650.
24. Bon, J.; Simal, S.; Roselló, C. y Mulet, A. (1997). Drying characteristics of hemispherical solids. *J. Food Eng.* 34, 109-122.
25. Boquet R., Chirife J., Iglesias, H. (1978). Equations of fitting water sorption isotherms of foods. II. Evaluation of various two parameters models. *J. Food Technol.*, 13, 329-327.
26. Bourne, M. C. (1989). Applications of chemical kinetic theory to the rate of thermal softening of vegetable tissue. In: Jen, J. J. (Ed.), *Quality Factors of Fruits and Vegetables: Chemistry and Technology*. American Chemical Society, Washington, D.C, pp. 98–110.
27. Brennan, J. G.; Butters, J. R.; Cowell, N. D. y Lilly, A. E. V. (1981). *Food engineering operations* (2nd ed.). London: Applied Sciences Publishers.
28. Brown, George G. (1955). Transferencia de calor y materia. Dsecación. *Operaciones básicas de la Ingeniería Química*. Manuel Maríán & Cía Editores. Barcelona. 585-601.

29. Bruce, D. M. (1985). Exposed layer barley drying-three model fitted to new data up to 150 C. *J. Agric. Eng. Res.*, 32, 337–347.
30. Brunauer, S., Emmett, P. H., y Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layer. *J. Am. Chem. Soc.*, 60, 309-319
31. Buera, M. P., Chirife, J., Resnik S.L. and Wetzler, G. (1987) Nonenzymatic browning in liquid model systems of high water activity. Kinetics of color changes due to Maillard's reaction between different single sugars and glycine and comparison with caramelization browning. *J. Food Sci.* 52, 1063-1067.
32. Buera, M.P., Lozano, R.D., & Petriella, C. (1986). Definition of colour in the non enzymatic browning process. *Die Farbe* 32/33, 318-322.
33. Buescher, R.W. & Hobson, G. E. (1982). Role of calcium and chelating agents on regulating the degradation of tomato fruit tissue by polygalacturonase. *J. Food Biochem.* 6,147–160.
34. Bunauer, S.; Emmett, P.H.; Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. *J. Am. Chem. Soc.*, 60, 309-319.
35. Cao, G.; Sofic, E.; Prior, R. L. (1996). Antioxidant capacity of tea and common vegetables. *J. Agric. Food Chem.* 44, 3426- 3431.
36. Casp, A. & Abril, J. (1999). *Procesos de conservación de alimentos*. Colección: Tecnología de alimentos. Ediciones Mundi-Prensa. AMV. Madrid. España.325-345.
37. Castañón, X., López-Malo, A., and Argáiz, A. (1999). Effect of storage temperature on the microbial and color stability of banana purees prepared with the addition of vanillin or potassium sorbate. *Food Sci. Technol.* 5 (1), pp. 51–58.
38. Cheftel, J.C.; Cheftel, H. (1992). *Introducción a la Bioquímica y Tecnología de los alimentos*. Vol I y II. Editorial Acribia. Zaragoza, España.
39. Chen, C.S. & Johnson, W. H. (1969). Kinetics of moisture movement in hygroscopic materials. I. Theoretical consideration of drying phenomena. *Trans. ASAE.* 12:109-113.
40. Chen, S. C., Collins, J. L., McCarty, I. E., y Johnston, M. R. (1971).Blanching of white potatoes by microwave energy followed by boiling water. *J. Food. Sci.*, 36 (5), 742–743.
41. Chirife, J. (1969). El encogimiento y su influencia en la interpretación del mecanismo de secado. *Ind. y Quím.*, 27, 145.

42. Chirife, J. (1983). Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. *Mujumdar. Advances in drying*. Hemisphere Publishing Corporation, Washington/New York.
43. Código Alimentario Argentino. (2002) disponibles en el sitio www.mundohelado.com. Capítulo III, artículos 167 y 168.
44. Comaposada, J.; Gou, P.; Arnau, J. (2000). The effect of sodium chloride content and temperature on pork meat isotherms. *Meat Sci.*, 55, (3), p. 291-295.
45. Concellón, Analía; Añón, María C.; Chaves, Alicia R. (2004). Characterization and changes in polyphenol oxidase from eggplant fruit (*Solanum melongena* L.) during storage at low temperature. *Food Chem.*, 88, 17–24.
46. Cunningham, S.E.; Mcminn, W. A. M.; Magee, T. R. A.; Richardson, P.S. (2008). Experimental study of rehydration kinetics of potato cilindres. *Food and Bioprod. Process.* 86, 15 –24.
47. Daniele, M & Urfalino, D. (2005). Estudio de la utilización de metabisulfito de sodio como inhibidor del pardeamiento en duraznos deshidratados al sol. *X Congreso de Ciencia y Tecnología de alimentos. CYTAL*. Mar del Plata. Argentina
48. Desrosier, N. W. (1985). Principios de la conservación de alimentos por secado. En *Conservación de alimentos*. Segunda edición. Editorial CECSA. México.
49. Diamante, L. M., y Munro, P. A. (1991). Mathematical modelling of hot air drying of sweet potato slices. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 26 (1), 99-109.
50. Diamante, L. M., y Munro, P. A. (1993). Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Sol. Energy*, 51(4), 271–276.
51. Dincer, I & Dost, S. (1995). An analytical model for moisture diffusion in solid objects during drying. *Drying Technol.*, 13 (1 and 2), 425-435.
52. Disa, A. O.; Desmorieux, H.; Bathiebo, J.; Koulidiati, J. (2008). Convective drying characteristics of Amelie mango (*Mangifera Indica* L. cv. ‘Amelie’) with correction for shrinkage. *J. Food Eng.*, 88 429–437.
53. Doymaz, İ. & Pala, M. (2002a). Hot-air drying characteristics of red pepper. *J. Food Eng.*, 55, 331-335.
54. Doymaz, I., y Pala, M. (2002b). The effects of dipping pretreatments on air-drying rates of seedless grapes. *J. Food Eng.*, 52(4), 413–417.
55. Doymaz, Ibrahim. (2004). Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *J. Food Eng.* 61, 359–364.

56. Doymaz, Ibrahim. (2007). The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *J. Food Eng.* 79 243–248
57. Doymaz, Ibrahim. (2008). Influence of blanching and slice thickness on drying characteristics of leek slices. *Chem. Eng. Process.* 47, 41–47.
58. Eichner, K. (1981). Antioxidative effect of Maillard reaction intermediates. *Prog. Food Nutr. Sci.*, 5, 44-51.
59. Eichner, K. & Karel, M. (1972). The influence of water content and water activity on the sugar-amino browning reaction in model systems under various conditions. *J. Agric. Food Chem.*, 20, 218 – 223.
60. Ertekin. C.; Yaldiz O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *J. Food Eng.* 63, 349–359.
61. Ferro Fontán C., Chirife J., Sancho, E. e Iglesias, H.A. (1982). Analysis of a model for water sorption phenomena in foods. *J. Food Sci.*, 47, 1590-4.
62. Flick, G. J.; Burnette, F. S.; Aung, L. H.; Ory, R. L.; Angelo, A. J. (1978). Chemical composition and biochemical properties of mirlitons (*Sechium edue*) and purple, green and white eggplants (*Solanum melongena*). *J. Agric. Food. Chem.*, 26, p. 1000-1005.
63. Fox, M.; Loncin, M. y Weiss, M. (1983). Investigations into the influence of water activity, pH and heat treatment on the velocity of the Maillard reaction in foods. *J. Food Qual.*, 6, 103-118.
64. Frazier, W.C. & Westhoff, D. C. (1993). Microorganismos importantes en microbiología de los alimentos. En *Microbiología de alimentos*. Editorial Acribia S.A. 4^{ta} edición, 23
65. Fusco, A. J. V.; Avanza, J. R.; Aguerre, R. J. y Gabitto, J. F. (1991) A diffusional model for drying with volume change. *Drying Technol.* 9(2), 197-417.
66. Gabas, A.; Telis-Romero, Javier; Menegalli, Florencia. (1998). Influencia de la temperatura en la humedad de equilibrio y calor de porción de la cáscara y de la pulpa de uva Italia. *II Congreso Iberoamericano de Ingeniería de alimentos*. CIBIA “Tecnología para el procesamiento y conservación de alimentos”. Bahía Blanca, Argentina.
67. Gabitto, J. F. & Aguerre, R. J. (1985). Numerical solution of the drying process with volume change. *Latinoamerican J. heat and mass transfer.* 9, 231-240.
68. Gal, S. (1987). The need for, and practical applications of sorption data. In Jowit, R.; Escher, F.; Hallstrom, B.; Mefert, H.; Spiess, W. and Vos, G. *Physical properties of foods*. London: Elsevier Applied Science. (second edition). 13-25. XC1XX

69. García, Luis A.; Kabylański, José; Pilosof, Ana. (1998). Isotermas de sorción de agua y calor isostérico de sorción de okara. *II Congreso Iberoamericano de Ingeniería en Alimentos*. CIBIA. “Tecnología para el procesamiento y conservación de alimentos”. Bahía Blanca, Argentina.
70. Garcia-Pascual, P.; Sanjuan, N.; Bon, J.; Carreres, J. and Mulet, A. (2005). Rehydration process of *Boletus edulis* mushroom: characteristics and modelling. *J Sci Food Agric*, 85, 1397–1404.
71. Geankoplis, C. J. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias. CECSA. Tercera Edición.
72. Ghannam, N. and McKenna, B. (1997). Hydration kinetics of red kidney beans (*Phaseolus vulgaris*, L.) *J. Food. Sci.*, 62 (3), 520-523.
73. Giovanelli, G.; Zanoni, B.; Lavelli, V.; Nani, R. (2002) Water sorption, drying and antioxidant properties of dried tomato products. *J. Food Eng.*, 52, 135-141.
74. Greenspan, L. (1977). Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *J. Res. Nat. Bureau of stand.*, 81a, 89-112.
75. Guerrero, S., Alzamora, S.M., and Gerschenson, L.N. (1996). Optimization of a combined factors technology for preserving banana puree to minimize colour changes using response surface methodology. *J. Food Eng.*, 28: 307-322.
76. Haas, G.J., Prescott, H.E. y Cante, C.J. (1974) On the rehydration and respiration of dried and partially dried vegetables. *J. Food Sci.*, 39, 681-684.
77. Halsey, G. (1948). Physical adsorption on non-uniform surfaces. *J. Chem. Phys.*, 16, 931-937.
78. Hanson, P. M.; Ray-Yu, Yang; Tsou, S.C.S.; Ledesma, D.; Engle, L.; Lee, T. (2006). Diversity in eggplant (*Solanum melongena*) for superoxide scavenging activity, total phenolics, and ascorbic acid. *J. Food Compos. Anal.* 19, 594–600.
79. Hart y Fisher. (1971). *Análisis Moderno de los Alimentos*. Editorial Acribia. Zaragoza, España.
80. Hawlader, M.N.A.; Ho, J.C.; Qing, Zhang. (1999). A mathematical model for shrinking materials. *Drying Technol.*, 17 (1&2), 27-47.
81. Hawlader, M.S.; Uddin, J.C.; Ho, J. C. y Teng, A. B. W. (1991). Drying characteristics of tomatoes. *J. Food Eng.* 14, 259-268.
82. Heiss, R. (1977). Exigencias en el envasado de productos alimenticios. En *Principios de envasado de los alimentos. Guía Internacional*. Editorial Acribia. Zaragoza, España.

-
83. Henderson, S. M. & Pabis, S. (1961). Grain drying theory. I. Temperature effect on drying coefficient. *J. Agric. Eng. Res.*, 6 (3), 169-174.
84. Henderson, S.M. (1952). A basic concept of equilibrium moisture. *Agric. Eng.* 33, p. 29.
85. Hernández Rodríguez, J. y Quinto Diez, P. (2005). Secado de medios porosos: Una revisión a las teorías actualmente en uso. *Científica* 9 (2), 63-71.
86. Hernández, J. A.; Pavón, G.; García M. A. (2000). Analytical solution of mass transfer equation considering shrinkage for modelling food-drying kinetics. *J. Food Eng.* 45, 1-10.
87. Hodge, J. (1953) Dehydrated foods. Chemistry of browning reactions in model systems. *J. Agr. Food Chem.* 1:928.
88. Hossain, M.A. y Bala, B.K. (2002). Thin layer drying characteristics for green chilli. *Drying Technol.*, 20, 489–505.
89. Hossain, Mohammed Ayub; Woods, James Lyn y Bala, Bilash Kanti. (2007) Single-layer drying characteristics and colour kinetics of red chilli. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 42, 1367–1375.
90. Huang, H. Y.; Chang, C. K.; Tso, T. K.; Huang, J. J.; Chang, W.; Tsai, W. C. (2004). Antioxidant activities of various fruits and vegetables produced in Taiwan. *Int. J. Food Sci. Nutr.* 55(5), 423-429.
91. Husain, A., Chen, C. S., Clayton, J. T., y Whitney, L. F. (1972). Mathematical simulation of mass and heat transfer in high moisture foods. *Trans. ASAE*, 15, 732-736.
92. Hyun Ku Kim, Yoonseok Song and Kit L. Yam. (1991). Water sorption characteristic of dried red peppers (*Capsicum annum* L.). *Int. J. Food Sci. Technol.* 29, 339-345.
93. ICMSF. International Commission on Microbiological Specifications for foods. (1982). *Microorganismos de los alimentos. Técnicas de análisis microbiológico* Editorial Acribia. Zaragoza. España. Segunda edición. Vol. 1.
94. Iglesias, H. A. y Chirife, J. (1976a) BET monolayer values in dehydrated foods and food components. *Lebensm. Wiss. Technol.*, 9, 107-113.
95. Iglesias, H. A., y Chirife, J. (1976b). Prediction of effect of temperature on water sorption isotherms of food materials. *J. Food Technol.*, 11, 109–116.
96. Iglesias, H.A. y Chirife, J. (1995). An alternative to de Guggenheim, Anderson and De Boer model for the mathematical description of moisture sorption isotherms of foods. *Food Res. Int.*, 28, (3), pp 317-321.

-
97. Iguaz, A., San Martín, M. B., Maté, J. I., Fernandez, T., y Vírveda, P. (2003). Modelling effective moisture diffusivity of rouge rice (*Lido cultivar*) at low drying temperatures. *J. Food Eng.*, 59, 253–258.
98. Jackman, R. L. & Stanley, D. W. (1995). Perspectives in the textural evaluation of plant foods. *Trends Food Sci. Technol.* 6, 187–194.
99. Jayaraman, K. S. & Das Gupta, D. K. (1995). Drying of fruits and vegetables. En *Handbook of Industrial drying*. Edited by Arun S. Mujumdar. Marcel Dekker, Inc. 2nd Edition. pp. 643-644.
100. Jayaraman, K. S. & Das Gupta, D. K. (1992). Dehydration of fruits and vegetables-Recent developments in principles and techniques. *Drying Technol.*, 10 (1), 1-50.
101. Jayaraman, K. S., Gupta, D. K., y Babu Rao, N. (1990). Effect of pretreatment with salt and sucrose on the quality and stability of dehydrated cauliflower. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 25(1), 47–60.
102. Jha, S. N. & Matsuoka, T. (2001). Determination of freshness of eggplant using some physical parameters. *ASAE. Paper N°*. 901–6096
103. Jha, S.N.; Matsuoka, T.; Miyauchi, K. (2002). Surface gloss and weight of eggplant during storage. *Biosystems Eng.*, 81(4), 407-412.
104. Jiang, Fu, Zauberman, & Fuchs (1999). Purification of polyphenol oxidase and the browning control of litchi fruit by glutathione and citric acid. *J. Sci. Food Agric.*, 79, 950-954.
105. Jorge, P. A. R.; Neyra, L. C.; Osaki, R. M; Almeida, E.; Bragagnolo, N. (1998) Efeito da berinjela sobre os lípidos plasmáticos, a peroxidação lipídica e a reversão da disfunção endotelial na hipercolesterolemia experimental. *Arquivos Brasileiros de Cardiologia*, 70, (2), 87-91.
106. Karathanos, V. T., y Belessiotis, V.G. (1997). Sun and artificial air drying kinetics of some agricultural products. *J. Food Eng.*, 31 (1), 35-46.
107. Karathanos, V. T., Kanellopoulos, N. K., y Belessiotis, V. G. (1996). Development of porous structure during air drying of agricultural plant products. *J. Food Eng.*, 29, 167–183.
108. Karathanos, V.; Ângela, S.; Karel, M. (1992) Collapse of structure during drying of celery. *Drying Technol.*, 11 (5), 1005-1023.

109. Karathanos, V.T., Villalobos, G. and Saravacos, G.D. (1990) Comparison of two methods of estimation of the effective moisture diffusivity from drying data. *J. Food. Sci.*, 55, (1), 218-223.
110. Karel, M. (1984). Chemical effects in food stored at room temperature. *J. Chem. Educ.* 61, 335-339.
111. Kashyap, V.; Kumar, S.V.; Collonnier, C.; Fusari, F.; Haicour, R.; Rotino, G.L.; Sihachakr, D.; Rajam, M.V. (2003). Biotechnology of eggplant. Review. *Sci. Horticul.* 97, 1-25.
112. Kaymak-Ertekin, F. & Gedik, A. (2004). Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots and potatoes. *Lebensm. Wiss. Technol.*, 37 (4), 429-438
113. Kaymak-Ertekin, F. & Sulatanoglu, M. (2001). Moisture sorption isotherms of peppers. *J. Food Eng.*, 47 (3), 225-231.
114. Kidmose, U. y Martens, H. J. (1999). Changes in texture, microstructure and nutritional quality of carrot slices during blanching and freezing. *J. Sci. Food Agric.*, 79(12), 1747-1753.
115. King, A. & Young, G. (1999). Characteristics and occurrence of phenolic phytochemicals. *J. Am. Diet. Assoc.* 99, 213-218.
116. Kingsly, R. P.; Goyal, Raj K.; Manikantan, Musuvodi R. y Ilyas, Syed M. (2007) Effects of pretreatments and drying air temperature on drying behavior of peach slice. *Int. J. Food Sci. Technol.* 42, 65-69.
117. Kiranoudis, C.T., Maroulis, Z.B., Tsami, E. y Mavinos-Kouvis, D. (1997). Drying kinetics of some fruits. *Drying Technol.*, 15 (5), 1399-1418.
118. Kowalski, S. J. y Strumillo, C. (1997). Moisture transport, thermodynamics, and boundary conditions in porous materials in presence of mechanical stresses. *Chem. Eng. Sci.*, 52 (7), 1141-1150.
119. Krokida M. K. & Marinos-Kouris D. (2003b). Rehydration kinetics of dehydrated products. *J. Food Eng.*, 57, 1-7.
120. Krokida, M. K. & Philippopoulos, C. (2005). Rehydration of dehydrated foods. *Drying Technol.*, 23, 799-830.
121. Krokida, M. K.; Karathanos, V. T., Maroulis Z. B.; Marinos-Kouris, D. (2003a) Drying kinetics of some vegetables. *J. Food Eng.*, 59, (4), 391-403.

122. Labuza, T. & Saltmarch, M. (1981). The nonenzymatic browning reaction as affected by water in foods. En *Water activity: Influences on food quality*. Academic Press: San Francisco. pp. 605-649.
123. Labuza, T. P. (1984). Moisture sorption: Practical aspects of isotherm measurement and use. *Am. Assoc. Cereal Chem.*. St Paul Mn.
124. Labuza, T. P., Lillemo, J. H., y Taoukis, P. S. (1992). Inhibition of polyphenol oxidase by proteolytic enzymes. *Fruit Process.*, 2, 9–13.
125. Labuza, T.P. (1968) Sorption phenomena in foods. *Food Technol.* 23, 15-19
126. Lamberg, Ingrid. (1989). Studies of water transport phenomena during potato drying. *J. Food Process Eng.*, 10, 285-299.
127. Lang, W., Sokhansanj, S., y Rohani, S. (1994). Dynamic shrinkage and variable parameters in Bakker-Arkemaos mathematical simulations of wheat and canola drying. *Drying Technol.*, 12 (7), 1687-1708.
128. Langdon, T. T. (1987). Preventing of browning in fresh prepared potatoes without the use of sulfiting agents. *Food Technol.*, 41, 64–67.
129. Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum, *J. Am. Chem. Soc.* 40, pp. 1362–1403.
130. Lee, Y. & Howard, L. (1999). Firmness and phytochemical losses in pasteurized yellow banana peppers (*Capsicum annuum*) as affected by calcium chloride and storage. *J. Agric. Food. Chem.*, 47, 700-703.
131. Legault, R.; Hendel, C. and Talburt, W. (1954). Retention of quality in dehydrated vegetables through in-package desiccation. *Food Technol.*, 8:143-149.
132. Levenspiel, O. (1988). *Omnilibro de los Reactores Químicos*, Ed. Reverté.
133. Levenspiel, O. (2002). Modeling in chemical engineering, *Chem. Eng. Sci.*, 57, pp. 4691 – 4696.
134. Lewicki Piotr P. (1997). The applicability of the Gab model to food water sorption isotherms. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 32, 553-557.
135. Lewicki Piotr P., Hoa Vu Le, Wanda Pomara, _Nska-Łazuka. (2002). Effect of pre-treatment on convective drying of tomatoes. *J. Food Eng.* 54, 141–146.
136. Lewicki, P. (1998a). Effect of pre-drying treatment, drying and rehydration on plant tissue properties: A review. *Int. J. Food Prop.*, 1, 1-22.
137. Lewicki, Piotr. (1998b). Some remarks in rehydration of dried foods. *J. Food Eng.*, 36, 81-87.

138. Liu, Q., y Bakker-Arkema, F. W. (1997). Stochastic modelling of grain drying: Part 2. Model development. *J. Agric. Eng. Res.*, 66, 275–280.
139. Lomauro, C. J., Bakshi, A. S., y Labuza, T. P. (1985). Moisture transfer properties of dry and semi moist foods. *J. Food. Sci.*, 50, 397-400.
140. Long Wu, Takahiro Orikasa, Yukiharu Ogawa, Akio Tagawa. (2007). Vacuum drying characteristics of eggplants. *J. Food Eng.* 83, 422–429.
141. Long Wu, Takahiro Orikasab, Ken Tokuyasub, Takeo Shiinab, Akio Tagawac. (2008). Applicability of vacuum-dehydrofreezing technique for the long-term preservation of fresh-cut eggplant: effects of process conditions on the quality attributes of the samples. *J. Food Eng.* 91, 560–565.
142. Long Wu, Yukiharu Ogawa, Akio Tagawa. (2009). Electrical impedance spectroscopy analysis of eggplant pulp and effects of drying and freezing–thawing treatments on its impedance characteristics. *J. Food Eng.* 87, 274–280.
143. Lopez, A., Virseda, P., y Abril, J. (1995). Influence of dry matter content and drying conditions on effective diffusion coefficient of onion (*Allium cepa*, L.). *Drying Technol.*, 13 (8/9), 2181-2190.
144. Lozano, J. E., Rotstein, E., y Urbicain, M. J. (1983). Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuff at changing moisture contents. *J. Food. Sci.*, 48, 1497-1553.
145. Madamba, P. S., Driscoll, R. H., y Buckle, K. A. (1996). The thin layer drying characteristics of garlic slices. *J. Food Eng.*, 29, 75–97.
146. Madero C. F., Finne G. (1982). Properties of polyphenoloxidase isolated from gulf shrimp. *Proceedings of the Seventh Annual Tropical and Subtropical Fisheries Technological Conference of the Americas*. 328-339. New Orleans.
147. Maestrelli, A.; Lo Scalzo, R.; Rotino, G.L.; Acciarri, M.; Spena, A.; Vitelli, G.; Bertolo, G. (2003). Freezing effect on some quality parameters of transgenic parthenocarpic eggplants. *J. Food Eng.*, 56, 285-287.
148. Maldonado, S., Arnau, E. M. ; Bertuzzi, M.A.; Santapaola, J.; Singh, J. (2007). Efecto de la temperatura sobre la transferencia de masa durante la rehidratación de mango (*Mangifera indica*). CYTAL AATA. Buenos Aires, Argentina.
149. Mangione, J. L. y Sanchez, M. G. (1999). Cultivo y manejo postcosecha de berenjena. *Gacetilla informativa de la Corporación del Mercado Central de Buenos Aires*.

150. Marinos-Kouris, D. & Maroulis, Z. B. (1995). Transport properties in the drying of solids. *Handbook of Industrial drying*. Edited by Arun Mujumdar. Marcel Dekker, Inc. 2nd edition. Vol. 1.113-116.
151. Maroulis, Z.B.; Kiranoudis, C.T.; Marinos Kouris, D. (1995) Heat and mass transfer modeling in air drying of foods. *J. Food Eng.*, 26, 113-130.
152. Maroulis, Z.B.; Tsami, E.; Marinos Kouris, D. (1988). Application of the GAB model to the moisture sorption isotherms for dried fruits. *J. Food Eng.*, 7, pp 63-78.
153. Martínez Pavez, C. (2002). Secado de sólidos. Transferencia de materia. Aspectos teóricos. Universidad Mayor.
154. Maskan M. (2001a). Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *J. Food Eng.* 48, 177-182.
155. Maskan, M. (2001b). Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *J. Food Eng.* 48, 169-175.
156. Mayor, L & Sereno, A. M. (2004) Modeling shrinkage during convective drying of food materials: A review. *J. Food Eng.* 61, 373-386.
157. Mc Cabe, Warren L.; Smith, Julian C. (1968). *Operaciones básicas de Ingeniería química*. Editorial Reverte, S. A. Buenos Aires, Argentina. Vol. I y II. 1048.
158. Mc Inn, W.A. M. & Magee, T.R.A. (1996). Air drying kinetics of potato cylinders. *Drying Technol.*, 14 (9), 2025-2040.
159. McLaughlin, C. P. y Magee, T. R. A. (1998). The Determination of Sorption Isotherm and the isosteric heats of sorption for potatoes. *J. Food Eng.* 35, 267-280.
160. McMinn, W. A. M., y Magee, T. R. A. (1997). Quality and Physical Structure of dehydrated starch based system. *Drying Technol.*, 15(6-8), 49-55.
161. McMinn, W. A. M., y Magee, T. R. A. (1997a). Physical characteristics of dehydrated potatoes. Part I. *J. Food Eng.*, 33, 37-48.
162. McMinn, W. A. M., y Magee, T. R. A. (1997b). Physical characteristics of dehydrated potatoes. Part II. *J. Food Eng.*, 33, 49-55.
163. Midilli, A., Kucuk, H. y Yapar, Z. (2002). A new model for single layer drying. *Drying Technol.*, 20(7) pp. 1503-1513.
164. Midilli, A., Olgun, H., y Ayhan, T. (1999). Experimental studies of mushroom and pollen drying. *Int. J. Energy Res.*, 23, 1143-1152.
165. Montes, Adolfo L. (1964). Bromatología. Tomo I y II. Editorial Universitaria de Buenos Aires. Argentina.

166. Moretti, C. L.; Livia, L.; Pineli, O. (2005). Qualidade química e física de berinjelas submetidas a diferentes tratamentos pós-colheita. *Ciênc. Tecnol. Aliment.* Campinas. 25(2): 339-344.
167. Mousa, M., Sagar, V.R., Khurdiya, D.S. (2004). Studies on preparation of dehydrated brinjal slices. *J. Food. Sci. and Technol.*, 41(4), 423-426.
168. Mujumdar, A.S. y Menon, A.S. (1995). Drying of solids: Principles, classifications and selection of dryers. In: Handbook of Industrial Drying (edited by A.S. Mujumdar). Pp. 1–40. New York: Marcel Dekker.
169. Mulet, A. (1994). Drying modeling and water diffusivity in carrots and potatoes. *J. Food Eng.*, 22, 329-348.
170. Mulet, A.; Berna, A.; Rosello, C. (1989). Drying of carrots I. Drying models. *Drying Technol.*, 7, 537-557.
171. Mulet, A.; Berna, A.; Rosello, C.; Pinaga, F. (1989). Drying of carrots II. Evaluation of drying models. *Drying Technol.*, 7, 641-661.
172. Muller, Gunther. (1992). *Microbiología de los alimentos*. Acribia. Zaragoza, España. pp. 291.
173. Nellist, M. E. (1987). Modeling the performance of a cross-flow grain dryer. *J. Agric. Eng. Res.*, 37, 43–57.
174. Neubert, A. M., Wilson, C. W. & Miller, W. H. (1968) Studies on celery rehydration. *Food Technol.*, 22, 94-99.
175. Noda, Y.; Kneyuki, T.; Igarashi, K.; Mori, A. (2000). Antioxidant activity of nasunin, an anthocyanin in eggplant Peels. *Toxicology*, 148, 119–123.
176. Noomhorm, A., y Verma, L. R. (1986). Generalized single-layer rice drying models. *Trans. ASAE*, 29(2), 587-591.
177. Nuñez, J. M. & Laencina, J. (1990). Reacción de Maillard en alimentos. *Alimentación equipos y tecnología*. Abril, 103-109.
178. O'Callaghan, J. R., Menzies, D. J., y Bailey, P. H. (1971). Digital simulation of agricultural dryer performance. *J. Agric. Eng. Res.*, 16, 223–244.
179. O'beirne, D. (1986). Effects of pH on non-enzymic browning during storage in apple juice concentrate prepared from Bramley's Seedling Apples. *J. Food Sci.* 51, 1073-1074.
180. Ocón-García, J.; Tojo Barreiro, G. (1968). *Problemas de Ingeniería Química. Operaciones básicas*. Tomo I y II. 3ª edición.

181. Okos, M. R., Narsimhan, G., Singh, R. K. & Weitnauer, A. C. (1992). Food dehydration. En *Handbook of Food Engineering*. Eds. D.R. Heldman & D.B.Lund. Marcel Dekker Inc. New York.437-562.
182. Olorunda, A. O., Aworh, O. C., y Onucha, C. N. (1990). Upgrading quality of dried tomato: effects of drying methods, conditions and pre-drying treatments. *J. Sci. Food Agric.*, 52(4), 447–454.
183. Oswin, C. R. (1946). The kinetics of packing life. III. The isotherm. *J. Chem. Ind.*, 65, 419-423.
184. Overhults, D. G., White, H. E., Hamilton, H. E. y Ross, I. J. (1973). Drying soybeans with heated air. *Trans. ASAE*, 16, 112–113.
185. Ozdemir, M., y Devres, Y. O. (1999). The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *J. Food Eng.*, 42, 225–233.
186. Özoglu, H. & Bayındırlı, A. (2002). Inhibition of enzymatic browning in cloudy apple juice with selected antibrowning agents. *Food Control* 13, 213-221.
187. Pabis, S. & Jaros, M. (2002). The first period of convection drying of vegetables and the effect of shape-dependent shrinkage. *Biosystems Eng.*81, (2), 201-211.
188. Pabis, S. (1999). The initial phase of convection drying of vegetables and mushrooms and effect of shrinkage. *J. Agric. Eng. Res.* 72, 187-195.
189. Page, G. (1949). Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. M.S. Thesis, Purdue University.
190. Pala, M., Mahmutoglu, T., y Saygi, B. (1996). Effects of pretreatments on the quality of open-air and solar dried apricots. *Nahrung*, 40(3), 137–141.
191. Palipane, K. B. and Driscoll, R. H. (1993). Moisture sorption characteristics of in-shell macadamia nuts. *J. Food Eng.* 18, pp. 63–76.
192. Palou, E., Lopez-Malo, A., Barbosa-Canovas, G. V., Welti-Chanes, J., y Swanson, B. G. (1999). Polyphenoloxidase activity and colour of blanched and high hydrostatic pressure treated banana puree. *J. Food. Sci.*, 64, 42-45.
193. Panchariya, P.C., Popovic, D. y Sharma, A.L. (2002). Thin layer modeling of black tea drying process. *J. Food Eng.*, 52, 349–357.
194. Park, K. J., Vohnikova, Z., y Brod, F. P. R. (2002). Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). *J. Food Eng.*, 51, 193–199.

195. Peleg, Y.; Mannheim, C. and Berk, Z. (1970). Changes in quality of dehydrated kibbled onions during storage. *J. Food Sci.*, 35:513-517.
196. Perez, P. M.; Germani, R. (2007).Elaboração de biscoitos tipo salgado, com alto teor de fibra alimentar, utilizando farinha de berinjela (*Solanum melongena*, L.). *Ciênc. Tecnol. Aliment.*, Campinas, 27(1): 186-192.
197. Pezzutti, A. & Crapiste, G.H. (1997). Color changes during dehydration of onion (*Allium Cepa*) and garlic (*Allium Sativum*). *Acta Hort.* (ISHS) 433:455-462. http://www.actahort.org/books/433/433_48.htm
198. Pizzocaro, F., Torreggiani, D., y Gilardi, G. (1993). Inhibition of apple polyphenol oxidase (PPO) by ascorbic acid, citric acid and sodium chloride. *J. Food Process. Preserv.*, 17, 21–30.
199. Poovaiah, B.W.(1986). Role of calcium in prolonging storage life of fruits and vegetables. *Food Technol.* 40, 86–89.
200. Portillo, José; Ramonda, Gladis; De Simona, Carla. Área de Análisis Económico de la Dirección de Economía Agropecuaria. Subsecretaría de Economía Agropecuaria. Censo Nacional Agropecuario 2002. Hortalizas y Legumbres.
201. Prabhanajan, D. G.; Ramaswamay, H. S. & Raghavan, G. S.V. (1995). Microwave-assisted air drying of thin layer carrots. *J. Food Eng.*, 25, 283-293.
202. Prestamo, G.; Fuster, C.; Risueno, M. C. (1998) Effect of blanching and freezing on the structure of carrots cells and their implications for food. *J. Sci. Food Agric.*, 77, 223-229.
203. Queiroz, M.R.; Nebra, S. A. (2001). Theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of bananas. *J. Food Eng.* 47, 127-132.
204. Quiroga, O. D., Avanza, J. R. y Fusco, A. J. (1996). Modelado cinético de las transformaciones fluido-sólido reactivo. *EUDENE*, ISBN 950-656-014-5.
205. Quiroga, O. D., Morales, G. V., Villa, L. T. y Vicente M. S. (2000). Tratamiento cinético de reacciones fluido-sólido reactivo. I) Análisis de los elementos básicos para el desarrollo de un software. *Actas de VI Jornadas Argentinas de Tratamiento de Minerales. Salta (Argentina)*, pp. 399-404.
206. Quiroga, O. D., Morales, G. V., Villa, L. T. y Vicente M. S. (2000). Tratamiento cinético de reacciones fluido-sólido reactivo. II) Desarrollo de un software y ejemplo de aplicación. *Actas de VI Jornadas Argentinas de Tratamiento de Minerales. Salta (Argentina)*, pp. 405-410.

207. Rahman, M. S.; Al-Amri, O. S.; Al-Bulushi, I. M. (2002). Pores and physico-chemical characteristics of dried tuna produced by different methods of drying. *J. Food Eng.*, 53 (4), pp. 301-313.
208. Ramaswamy, H., y Van de Voort, F. R. (1990). Microwave application in food processing. Canadian. Institute. *J. Food. Sci. Technol.*, 23(1), 17-2
209. Ramos, I. N.; Silva, C. L. M.; Sereno, A. M.; Aguilera, J. M. (2004). Quantification of microstructural changes during first stage air drying of grape tissue. *J. Food Eng.* 62, 159-164.
210. Rapusas, R. S., y Driscoll, R. H. (1995). The thin-layer drying characteristics of white onion slices. *Drying Technol.*, 13(8 y 9), 1905-1931
211. Reynolds, T. (1963). Chemistry of nonenzymatic browning. 2. *Adv. Food Res.* 14:168.
212. Rodríguez, Silvia del Carmen. (2000). Cambios fisiológicos en berenjenas (*Solanum melongena*) relacionados con el daño por frío. Efecto de la aplicación de tratamientos físicos. *Tesis doctoral*. UNLP. Facultad de Ciencias Exactas. La Plata. Argentina.
213. Rovedo, C. O.; Suarez, C. & Viollaz, P.E. (1995) Drying of foods: evaluation of a drying model. *J. Food Eng.*, 26, 1-12.
214. Ruiz-Lopez, I.I.; Cordova, A.V.; Rodriguez-Jimenes, G.C.; Garcia-Alvarado, M.A. (2004). Moisture and temperature evolution during food drying: effect of variable properties. *J. Food Eng.* 63 117-124
215. Ryall, y Lipton (1983). Solanaceous Crops: Potato, Tomato, Pepper, Eggplant. *Handling, Transportation and Storage of fruits and vegetables*. AVI Publishing, Westport, Conn., 2d.ed.Vol.1, pp. 240-247.
216. SAGPYA. (2007). Dirección de Mercados Agroalimentarios. Berenjena: Situación de Mercado. *Gacetilla Informativa del Sector Agroalimentario*. www.sagpya.mecon.gov.ardimeagro
217. Salas, F. y Labuza, T. (1968). Surface active agents effects on drying characteristics of model food systems. *Food Technol.*, 22, 1576-1580.
218. Samaru, Y. (1989) Anticarcinogenic effects of green or yellow vegetables. *Japan Food Sci.* 3, 76-81.
219. San Juan, N.; Lozano, M.; García-Pascual, P.; Mulet, A. (2003). Dehydration kinetics of red pepper. (*Capsicum annuum* L. var Jaranda). *J. Sci. Food Agric.*, 83. (7), pp. 697-701.

220. San Juan, N.; Simal, S.; Bon, J.; Mulet, A. (1999). Modelling of broccoli stems rehydration process. *J. Food Eng.*, 42, 27-31.
221. Saravacos and Charm, G. D. (1962). A Study of the mechanism of fruit and vegetable dehydration. *Food Technol.* 6, pp. 78–82.
222. Saravacos, G. D. (1995). Transport properties in processing of fruit and vegetables. *Food Technol.*, 49, 99-105.
223. Saravacos, G.D; Tsiouvas, D.A. and Tsami, E. (1986). Effect of temperature on the water adsorption isotherms of Sultana raisins. *J. Food Sci.*, 51 pp. 381–383.
224. Sarsavadia, P. N., Sawhney, R. L., Pangavhane, D. R., y Singh, S. P. (1999). Drying behaviour of brined onion slices. *J. Food Eng.*, 40, 219–226.
225. Schaer, W. & Ruegg, M. (1988). The evaluation of GAB constants from water sorption data. *Lebensm. Wiss. Technol.*, 18, 225-229.
226. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. (2001). *Abriendo surcos*. Agosto. México, D.F. Talleres Gráficos de México. pp. 3-25
227. Senadeera, W., Bhandari, B. R., Young, G., y Wijesinghe, B. (2003). Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying. *J. Food Eng.*, 58(3), 277–283.
228. Sereno, A.M. & Medeiros, G.L. (1990) A simplified model for the prediction of drying rates for foods. *J. Food Eng.* 12, 1-11.
229. Severini, C.; Baiano, A.; De Pilli, T.; Romaniello, R.; Derossi, A. (2003) Prevention of enzymatic browning in sliced potatoes by blanching in boiling saline solutions. *Lebensm. Wiss. Technol.*, 36, 657-665.
230. Severini, C.; De Pilli, T.; Baiano, A.; Carbone, B. y Derossi, A. (2005). Combined treatments of blanching and dehydration: study on potato cubes. *J. Food Eng* 68, 289–296.
231. Sgroppo, S. C.; Fusco, A.J.V.; Avanza, J. R. (2000). Algunos aspectos del secado de pimientos en trozos. Reuniones de Comunicaciones Científicas de la UNNE.
232. Sgroppo, S.; Gabitto, J.; Aguerre, R.; Fusco, A.J.V.; Avanza, J.R. (1990) Transferencia de masa de sólidos con cambio de volumen. Aplicación al secado de la mandioca. *FaCENA*. Vol. 8, 131-146.
233. Sgroppo S.; Avanza J.R.. (2002). Secado de berenjenas en rodajas. Actas de Reuniones de Comunicaciones y Científicas de la UNNE.
234. Shei, H.J. y Chen, Y.L. (1998). Intermittent drying of rough rice. *Drying Technol.*, 16, 839–851.

235. Sigge, G. O.; Hansmann, C. F.; Joubert, E. (1998). Effect of temperature and relative humidity on the drying rates and drying times of green bell peppers. (*Capsicum annum* L.). *Drying Technol.* 16 (8) 1703-1714.
236. Simal, A.; Femenia, M.C.; Garau, C.; Rosselló, C. (2005). Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *J. Food Eng.*, 66 323–328.
237. Simal, S.; Rossello, C.; Berna, A. y Mulet, A. (1998). Drying of Shrinking Cylinder-shaped Bodies. *J. Food Eng.* 37, 423-435.
238. Singh, A.P., Luthria, D., Wilson, T., Vorsa, N., Singh, V., Banuelos, G.S., Pasakdee, S. (2009). Polyphenols content and antioxidant capacity of eggplant pulp. *Food Chem.*, 114, 955–961.
239. Singh, B., Dean, G. and Cantor, S. (1948). The role of 5-HMF in the discoloration of sugar solutions. *J. Am. Chem. Soc.* 70:517.
240. Singh, R. P. & Heldman, D. R. (1998). *Introducción a la Ingeniería de los alimentos*. Ed. Acribia. S.A. Zaragoza. España. pp. 456-458.
241. Singh, S.; Raina, C.S.; Bawa, A.S.; Saxena, D.C. (2006). Effect of pretreatments on drying and rehydration kinetics and color of sweet potato slices. *Drying Technol.* 24 1487–1494.
242. Sjöholm, I. & Gekas, V. (1995) Apple shrinkage upon drying. *J. Food Eng.* 25, 123-130.
243. Sokhansanj, S. & Jayas, D.(1995). Drying of foodstuffs. *Handbook of Industrial drying*. Edited by Arun S. Mujumdar. Marcel Dekker, Inc. 2nd edition. 589-590.
244. Son, S. M.; Moon, K. D.; Lee, C. Y. (2001). Inhibitory effects of various antibrowning agents on apple slices. *Food Chem.* 43, 23-30.
245. Souci-Fachmann-Krant. *Tablas de composición de alimentos*. (1987). Editorial Acribia. Zaragoza. España. Editorial Deutsche Forschungsanstalt für Lebensmittel Chemie Garching bei München.
246. Southgate, P. (1976). Chapter 8: Selected Methods in Determination of food carbohydrates. D.A.T. London. Applied Science Publishers. P108.
247. Sudheesh, S.; Presannakumar, G.; Vijayakumar, S.; Vijayalakshmi, N. R. (1997). Hypolipidemic effect of flavonoids from *Solanum melongena*. *Plant Foods Hum. Nutr.*, 51, 321-330.

248. Suzuki, K.; Kubota, K.; Hasegawa, T. y Hosaka, H. (1976). Shrinkage in dehydration of root vegetables. *J. Food. Sci.*, 41, 1189-1193.
249. Thompson, D. R. (1982). The challenge in predict nutrient changes during food processing. *Food Technol.*, (2), 97-115.
250. Throller, J. A. y Christian, J. H. B. (1978). Water activity and Food. *Food Science and Technology*. A series of monographs. Academia Press. New York.
251. Timmermann, E.O; Chirife, J.; Iglesias, H.A.(2001). Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters? *J. Food Eng.* 48, 19-31.
252. Tiris, C., Ozbalta, N., Tiris, M., y Dincer, I. (1994). Experimental testing of a new solar dryer. *Int. J. Energy Res.*, 18, 483-490.
253. Togrul I. T. & Phelivan, D. (2002). Mathematical modeling of solar drying of apricots in thin layers. *J. Food Eng.*, 55, 209-216.
254. Togrul, I. T. & Phelivan, D. (2003). Modelling of drying of single apricot. *J. Food Eng.* 58, 23-32.
255. Togrul, I. T. & Phelivan, D. (2004) Modeling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *J. Food Eng.* 65, 413-425.
256. Tripathi, R. N. y Nath, N. (1989). Effect of starch dipping on quality of dehydrated tomato slices. *J. Food. Sci. Technol., India*, 26, 137-141.
257. Tulasidas, T. (1995). Combined convective and microwave drying of grapes. *Drying Technol.*, 13, 1029-1031.
258. Uddin, M.S., Hawlader, M.N.A. & Rahman, M.S. (1990) Evaluation of drying characteristics of pineapple in the production of pineapple powder. *J. Food Process. Preserv.*, 14, 375-391.
259. Vaccarezza, L. M.; Lombardi, J. L.; Chirife, J. (1974). Kinetics of moisture movement during air drying of sugar beet roots. *J. Food Technol.*, 9, 317-324.
260. Vámos-Vigyázó, L. (1981) Polyphenol oxidase and peroxidase in fruits and vegetables. *Crit Rev. Food Sci. Nutr.*, 15, 49-127.
261. Van den Berg, C. (1981) Vapor sorption equilibria and other water-starch interactions; a physico-chemical approach. Doctoral Thesis. Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
262. Vega A.; Andrés A.; Fito P. (2001). Cinética de secado por aire caliente de dados de pimiento (*Capsicum annum* L.). III Congreso Iberoamericano de Ingeniería en Alimentos. Tomo II, Cap. 2, 228-234.

263. Vega-Gálvez, A.; Lemus-Mondaca, R.; Bilbao-Sáinz C.; Fito, P.; Andrés, A. (2008). Effect of air drying temperature on the quality of rehydrated dried red bell pepper (var. *Lamuyo*). *J. Food Eng.* 85, 42–50.
264. Vega-Mercado, H.; Góngora-Nieto, Marcela M.; Barbosa-Cánovas, G.V. (2001). Advances in dehydration of foods. *J. Food Eng.* 49, 271-289.
265. Viollaz, P. & Robedo, C. O. (2002) A drying model for a three-dimensional shrinking bodies. *J. Food Eng.*, 52, 149-153.
266. Viswanathan, R.; Jayas, D.S.; Hulasare, R.B. (2003). Sorption isotherms of tomato slices and onion shreds. *Biosystems Eng.*, 86 (4), 465-472.
267. Walter J.R.L. (1977). Enzymatic browning in foods, its chemistry and control. *Food Technol. in New Zealand* 12, 19-25.
268. Wang N; Brennan (1991). Moisture isotherm characteristics of potatoes at four temperatures. *J. Food Eng.*, 14(4), 269–287
269. Wang, C. Y., y Singh, R. P. (1978). A single layer drying equation for rough rice. ASAE Paper No: 78-3001, St. Joseph, MI.
270. Wang, J.; Chao, Y. (2002). Drying characteristics of irradiated apple slices. *J. Food Eng.*, 52, (1), pp.83-88.
271. Wang, N., y Brennan, J. G. (1995a). Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. *J. Food Eng.*, 24, 61–76.
272. Wang, N., y Brennan, J. G. (1995b). A mathematical model of simultaneous heat and mass transfer during drying of potato. *J. Food Eng.*, 24, 47-60.
273. Whitaker, B. D. & Stommel, J. R. (2003). Distribution of Hydroxycinnamic Acid Conjugates in Fruit Commercial Eggplant (*Solanum melongena*, L.) Cultivars. *Agric. Food Chem.* 51. pp. 3448-3454.
274. Wolfrom, M.; Schuetz, R. and Cavalieri, L., 1948. Chemical interactions of amino compounds and sugars. 3. The conversion of D-glucose to 5-HMF. *J. Am. Chem. Soc.* 70:514.
275. Yaldiz, O., y Ertekin, C. (2001). Thin layer solar drying of some different vegetables. *Drying Technol.*, 19(3), 583–596.
276. Yaldiz, O., Ertekin, C., y Uzun, H. I. (2001). Mathematical modelling of thin layer solar drying of Sultana grapes. *Energy*, 26(5), 457–465.
277. Yapar, S.; Helvacı, S. S.; Peker, S. (1990). Drying behavior of mushroom slices. *Drying Technol.*, 8, 77-99.

-
278. Yoshikawa, K.; Inagaki, K.; Terashita, T; Shishiyama, J.; Kuo, S.; Shankel, D.M. (1996). Antimutagenic activity of extracts from Japanese eggplant. *Mutation Res.* 371, 65-71.
279. Zhang, Q., y Litchfield, J. B. (1991). An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. *Drying Technol.*, 9, 383–395.
280. Zhang, x.; Xie Liu, De-Xiang Gu, Wei Zhou, Ren-Li Wang, Pen Liu. (1996). Desorption isotherms of some vegetables. *J. Sci. Food Agric.*, 70, (3), p. 303-306.
281. Zhang, Z. S., Li, R. Q., y Wang, J. B. (2001). Effects of oxalate treatment on the membrane permeability and calcium distribution in pepper leaves under heat stress. *Acta Phytophysiologica*, 27, 109–113.
282. Zogzas, N. P., y Maroulis, Z. B. (1996). Effective moisture diffusivity estimation from drying data. A comparison between various methods of analysis. *Drying Technol.*, 14 (7/8), 1543-1573.

*Una búsqueda comienza siempre con la suerte del principiante
y termina siempre con la prueba del conquistador.*
P. Coelho