

ESCALDADO DE HONGOS (*AGARICUS BISPORUS*). SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS UTILIZANDO GEOMETRÍAS 2D AXISIMÉTRICA Y 3D, CON Y SIN MALLA MÓVIL

Alejandro R. Lespinaud, Sandro M. Goñi y Rodolfo H. Mascheroni

Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA), CONICET – Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Calle 47 y 116 S/Nº, 1900 La Plata, Buenos Aires, Argentina, alespinaud@cidca.org.ar, <http://www.cidca.org.ar>

Palabras claves: Escaldado, Modelado, Transferencia de Calor, Contracción de tamaño, Método de Elementos Finitos.

Resumen. En este trabajo se simuló la evolución de la temperatura de hongos durante el escaldado para un amplio rango de temperaturas del baño (50, 60, 70, 80 y 90°C). Para esto se empleó el método de elementos finitos (MEF) (COMSOL 3.2) con propiedades termofísicas constantes, dominio 2D axisimétrico y 3D, sin considerar contracción volumétrica (malla fija) y considerándola (malla móvil). La generación de malla móvil, en la resolución del sistema, se obtuvo a través de un sistema de visión computacional y posterior procesamiento de imágenes. Se determinó con esto una cinética de cambio de tamaño en función de la temperatura del baño. Las temperaturas simuladas por el modelo 2D axisimétrico y 3D, fueron validadas exitosamente con las medidas experimentales, no encontrándose, en cada caso, diferencias significativas entre los resultados obtenidos para malla fija y móvil. Del análisis comparativo de las distintas soluciones se puede concluir que las diferencias fueron favorables a los modelos que consideran la contracción de tamaño (malla móvil), particularmente cuando las temperaturas del medio de calentamiento son altas y la velocidad de contracción de tamaño es mayor. El modelo de simulación 2D axisimétrico con malla móvil, resultó ser el más adecuado para el caso estudiado, presentando una buena concordancia con los datos experimentales, comparable a la obtenida con el modelo 3D malla móvil, y con un tiempo de procesamiento computacional inferior.

1 INTRODUCCIÓN

Dentro del proceso de producción de conservas de hongos el escaldado constituye una importante operación unitaria. El mismo tiene por objetivos: (i) reducir el pardeamiento enzimático por inactivación térmica de la enzima polifenoloxidasa (PFO); (ii) inducir la contracción de tamaño evitando que ocurra durante la esterilización; (iii) hacer el producto más flexible para facilitar la operación de llenado (Biekman, et al., 1995). Por su parte, la simulación computacional es una valiosa herramienta para optimizar procesos y condiciones de almacenamiento en la industria alimenticia. La ventaja de su utilización radica en la minimización de los procedimientos experimentales de prueba y error, reduciendo los costos y tiempos de desarrollo (Martins, 2005). La contracción del hongo, durante el tratamiento con calor, representa el mayor inconveniente en el desarrollo de modelos matemáticos que describan la distribución de temperaturas en el mismo (Biekman et al., 1997). El modelado de la contracción de tamaño, como también la simulación de temperaturas en el hongo resulta de gran importancia para el diseño y optimización del proceso. En bibliografía se encuentran pocas referencias sobre el modelado de la transferencia de calor y la variación de tamaño de hongos durante el escaldado. Konanayakam y Sastry (1988) describieron la contracción del hongo como tres reacciones aparentes de primer orden, siendo la duración de cada fase dependiente de la temperatura. Biekman et al. (1997) mostraron que la velocidad de contracción durante el escaldado es función de la temperatura del baño y la masa del hongo, y que esta actúa en forma sinérgica con el incremento de la velocidad de calentamiento. McArdle y Curwen (1962) han reportado que la mayor parte de esta contracción (25% promedio) ocurre durante el escaldado, y que la pérdida de peso que ocurre durante el procesamiento térmico (escaldado y esterilización) se encuentra en el rango de 30-40%. Sheen y Hayakawa (1990) han desarrollado un modelo de transferencia de calor incluyendo el cambio de volumen durante el congelado de hongos. Para la optimización del proceso, es importante investigar y cuantificar los efectos de la contracción en la temperatura del hongo durante el escaldado.

Los objetivos de este estudio fueron: (1) determinar experimentalmente una cinética de cambio de tamaño en función de la temperatura de escaldado, (2) modelar la transferencia de calor a través del hongo, utilizando dominios de simulación tridimensionales (3D) y bidimensionales (2D) axisimétricos de forma irregular, considerando los casos de malla fija y malla móvil, (3) evaluar las bondades de las distintas soluciones con los datos experimentales.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Tratamientos Térmicos

Los hongos (*Agaricus bisporus*) fueron sumergidos completamente en un baño de agua termostatzado (HAAKE F3, Germany). Se diseñaron cinco procesos de escaldado equivalentes, a diferentes temperaturas del medio de calentamiento: 50, 60, 70, 80 y 90°C, a fin de obtener la misma contracción del tamaño del producto. Los tiempos de proceso fueron estimados, para alcanzar una contracción del 18% en el tamaño (80% de la máxima reducción de tamaño). Luego de transcurridos los tiempos de proceso estimados, las muestras fueron retiradas del baño y enfriadas en un mezcla agua-hielo durante dos minutos.

2.2 Adquisición de Temperaturas Experimentales

La temperatura del baño y del centro térmico del hongo (centro geométrico de la cabeza del hongo, aproximadamente) se midieron utilizando termocuplas T cobre-constantan (Cu-

CuNi), cada 15 segundos. El registro de las historias térmicas se obtuvo utilizando un adquisidor multicanal KEITHLEY modelo AS-TC.

2.3 Adquisición de Imágenes y Determinación de Tamaños

Se empleó un sistema de visión computacional formado por una cámara digital (Professional Series Network IP Camera Model 550710, Intellinet Active Networking) conectada a una PC (AMD Sempron 2200+, 768 MB RAM). La cámara digital fue montada, por medio de un soporte, en forma perpendicular al baño termostatzado (Figura 1).

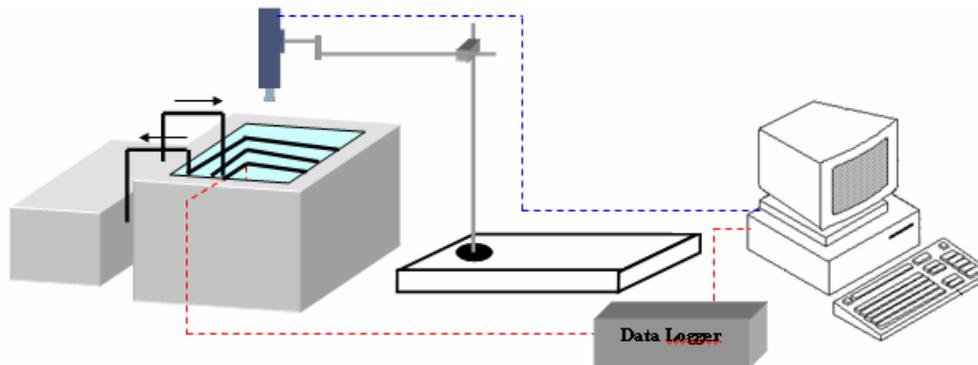


Figura 1: Esquema de la disposición del sistema empleado para la adquisición de imágenes

Un segundo soporte fue construido para inmovilizar las muestras dentro del baño termostatzado, y evitar de esta manera el movimiento de las mismas. Los hongos se colocaron en forma vertical u horizontal, para medir la contracción del diámetro y la altura, respectivamente, y además se inmovilizó un objeto patrón, de dimensiones conocidas, para utilizarlo como referencia. Las imágenes de los hongos durante el proceso de escaldado fueron obtenidas a intervalos de tiempo de 30 segundos y 2 minutos, para la etapa inicial y final del proceso, respectivamente. Posteriormente se realizó un procesamiento de las imágenes adquiridas para obtener las dimensiones características L y A de las muestras (ver Figura 2) en función del tiempo.

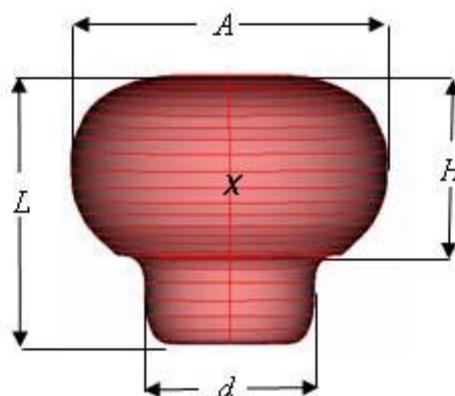


Figura 2: Geometría del hongo mostrando las dimensiones características y la localización (x) del punto de medición experimental de la temperatura

El procesamiento de imágenes se implementó en la Image Processing Toolbox de MATLAB® (MathWorks, Nantick, Massachusetts), cuyos pasos fueron: se leyeron todas las secuencias de imágenes grabadas, en formato RGB. Se transformó cada imagen de RGB a escala de grises. Se segmentó cada imagen utilizando un valor de umbral obtenido del

histograma de niveles de grises. El resultado fue una imagen binaria donde el fondo es de color negro y la muestra es de color blanco, de la cual se calculó el ancho y la altura (en píxeles) de la muestra. Se transformaron estas medidas a unidades SI utilizando las medidas del objeto patrón. A su vez también se midieron con calibre todas las dimensiones características (A , L , H y d) de tres muestras, antes y después del escaldado.

La variación de los tamaños A y L , en forma adimensional, fue ajustada con un modelo exponencial decreciente (ecuación 1), donde D_t es la dimensión característica instantánea (A o L) a un tiempo t (min); D_0 es la dimensión inicial; D_e la dimensión de equilibrio, luego de un tiempo prolongado de proceso, y K_l es la constante de velocidad dependiente de la temperatura con una relación tipo Arrhenius.

$$\frac{D_t - D_e}{D_0 - D_e} = \exp(-K_l * t) \quad (1)$$

2.4 Construcción 2D y 3D de la Geometría del Hongo

Las geometrías 2D y 3D de los hongos se construyeron a partir de imágenes de cortes transversales de las muestras (Figura 3a). Estas imágenes fueron procesadas como se indicó anteriormente, para obtener una imagen binaria (Figura 3b), cuyos bordes fueron aproximados con una curva *B-Spline* (Figura 3c), que fue usada como base para la construcción del dominio de simulación. Para las geometrías 2D axisimétricas, la curva *B-Spline* obtenida fue transformada en un sólido, el cual fue utilizado como dominio; para las geometrías 3D, el sólido 2D anterior es utilizado para obtener un sólido de revolución (Figura 3d).

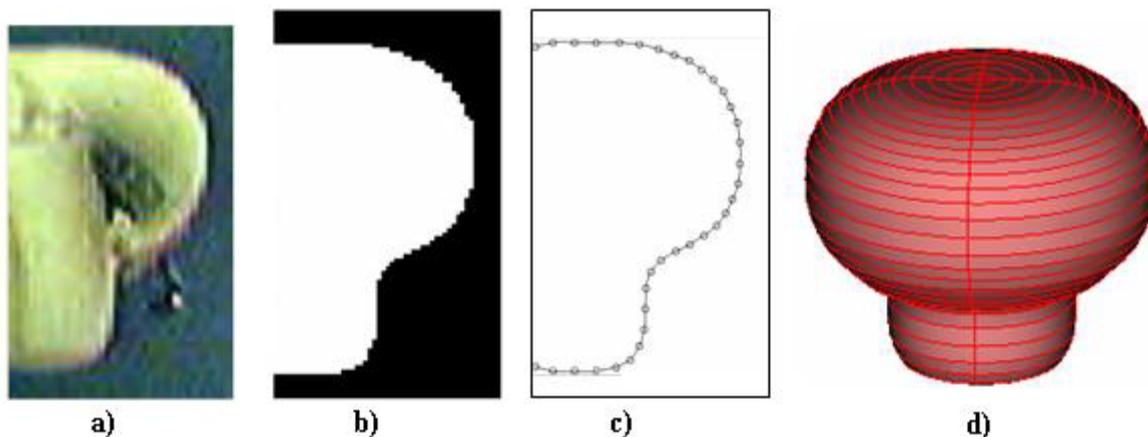


Figura 3: Secuencia de la construcción bidimensional y tridimensional de la geometría del hongo. a) imagen de corte transversal, b) imagen binaria, c) Curva *B-Spline*, d) sólido de revolución

2.5 Modelado de la Penetración de Calor

Un modelo matemático fue desarrollado para describir la transferencia de calor conductiva a través del vegetal (ecuación 2) con condiciones de contorno convectivas (ecuación 3) y considerando una distribución uniforme de temperatura en el producto en el inicio de las experiencias (ecuación 4). En los casos que se utilizó malla móvil, la ecuación 1 fue acoplada al modelo de transferencia de calor.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (k \nabla T) \quad (2)$$

$$k \nabla T = h (T_\infty - T) \quad (3)$$

$$T(x, y, z, t = 0) = T_0 \quad (4)$$

El modelo desarrollado fue resuelto por medio del método de elementos finitos (COMSOL™ Multiphysics, version 3.2) con las siguientes propiedades termo físicas constantes: $C_p=3965 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $k=0.35 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Akterian et al. 1995). La densidad fue determinada experimentalmente midiendo la masa del hongo y el volumen inicial del hongo.

El coeficiente de transferencia de calor $h=130 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ fue obtenido minimizando el residuo entre los valores de temperatura experimentales y los predichos por el modelo.

Los elementos de malla utilizados son tetraedros distorsionados que pueden aproximar mejor la curvatura del contorno irregular del dominio (Figura 4).

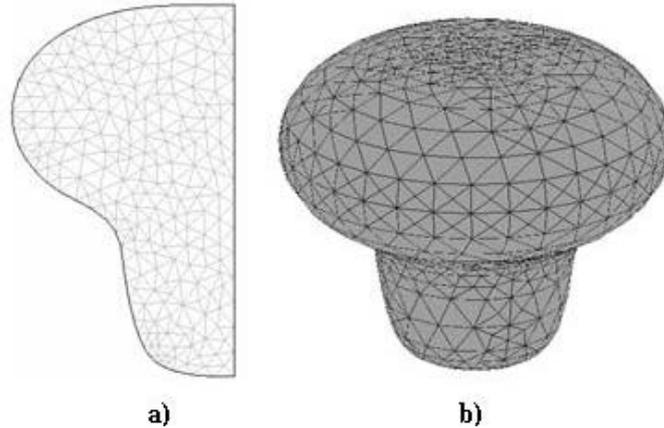


Figura 4: Mallado computacional del hongo a) geometría 2D axisimétrica discretizada en 341 elementos y b) geometría 3D discretizada en 8508 elementos

2.6 Validación del modelo

El modelo descrito fue validado comparando las temperaturas simuladas con las obtenidas experimentalmente. Esas comparaciones fueron realizadas por medio del cálculo de las diferencias relativas medias (Ecuación 5):

$$D_{rm} = \frac{100}{m} \sum_{i=1}^m \frac{|T_s - T_e|}{T_e} \quad (5)$$

2.7 Evaluación de índices de calidad

Se evaluaron como índices de calidad el valor de cocción medio (C_{medio}) y el valor de cocción superficial (C_{sup}), determinados por integración numérica de las ecuaciones 6 y 7, respectivamente, utilizando los perfiles de temperatura simulados para cada muestra. Se consideró una temperatura de referencia (T_{ref}) de 100 °C y un valor de z (z_c) de 25 °C . El valor de z_c fue tomado sobre la base de un promedio de los valores correspondientes a la cinética de deterioro de componentes químicos (Lau y Tang, 2002).

$$C_{medio} = \int_0^{t_f} \frac{\int_{\Omega} 10^{\frac{T(t,\Omega)-T_{ref}}{z_c}} \partial\Omega}{\int_{\Omega} \partial\Omega} \partial t \quad (6)$$

$$C_{\text{sup}} = \int_0^{t_f} \frac{\int_{\Gamma} 10^{\frac{T(t,\Gamma)-T_{\text{ref}}}{z_c}} \partial\Gamma}{\int_{\Gamma} \partial\Gamma} dt \quad (7)$$

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Variación de Tamaño

Una secuencia de imágenes obtenidas con el sistema de visión computacional e imágenes binarias obtenidas por el tratamiento de las mismas, para un proceso de escaldado a una temperatura de 70 °C, son mostradas en la [Figura 5](#). En esta se puede observar una rápida disminución del tamaño en la etapa inicial, haciéndose más lenta a tiempos largos, hasta alcanzar un tamaño constante.

En la [Figura 6](#) se muestra una curva típica obtenida de la variación del tamaño adimensional del diámetro de la cabeza del hongo (A). La dimensión longitudinal (L) exhibió una tendencia similar en todos los casos. Los valores de las constantes de velocidad (K_l) obtenidas para A y L para cada proceso fueron similares, implicando aproximadamente igual grado de contracción radial y longitudinal. Por esto, las mismas fueron promediadas obteniéndose así una constante de velocidad media (K_m) para cada proceso, la cual representa la contracción global ([Tabla 1](#)). Los valores de K_m muestran un aumento con la temperatura del baño, lo que indica un aumento de la velocidad de contracción con la temperatura.

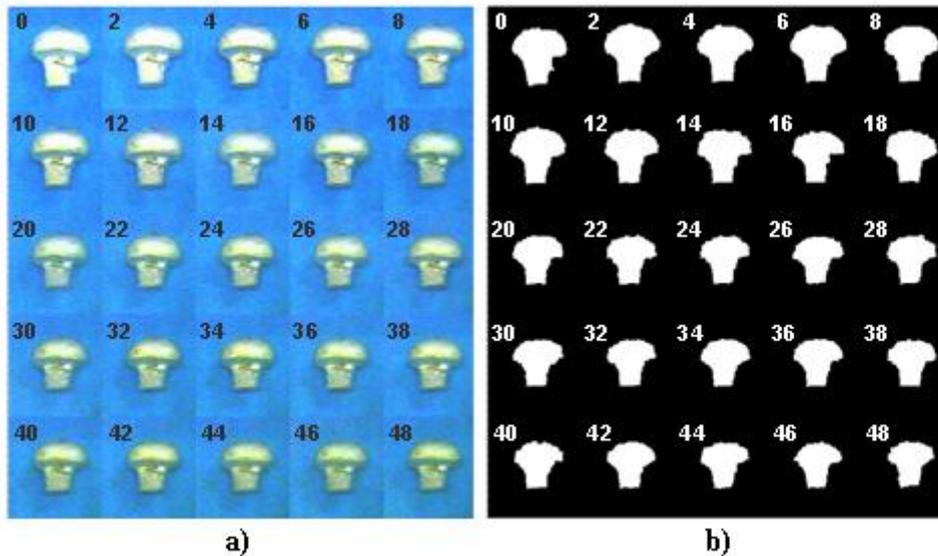


Figura 5: Secuencia de imágenes, cada 2 minutos, mostrando el cambio de tamaño del hongo durante el escaldado a 70°C, durante 48 minutos de proceso. a) Imagen original, b) imagen binaria (procesada)

La dependencia de K_m con la temperatura es representada por la ecuación de Arrhenius (ecuación 8):

$$K_m = A_1 * \exp(-E_a / RT) \quad (8)$$

donde A_1 es el factor pre-exponencial (min^{-1}), E_a es la energía de activación (Kcal/mol), R es la constante de los gases (1,98 cal/mol K) y T la temperatura del baño (K). La energía de activación y el factor pre-exponencial fueron determinados por medio de una regresión lineal de $\log(K_m)$ vs. $1/T$, siendo $-E_a/R$ la pendiente y $\log(A_1)$ la ordenada al origen. Del análisis de

esta regresión se obtuvieron valores de 14.19 kcal/mol y $1.40 \cdot 10^6 \text{ min}^{-1}$ para los parámetros E_a y A_I , respectivamente, y un valor R^2 de 0.9953. Similares valores fueron encontrados por [Konanayakam y Sastry \(1988\)](#) para la reducción de volumen ($E_a = 16.80 \text{ kcal/mol}$ y $A_I = 4 \cdot 10^7 \text{ min}$).

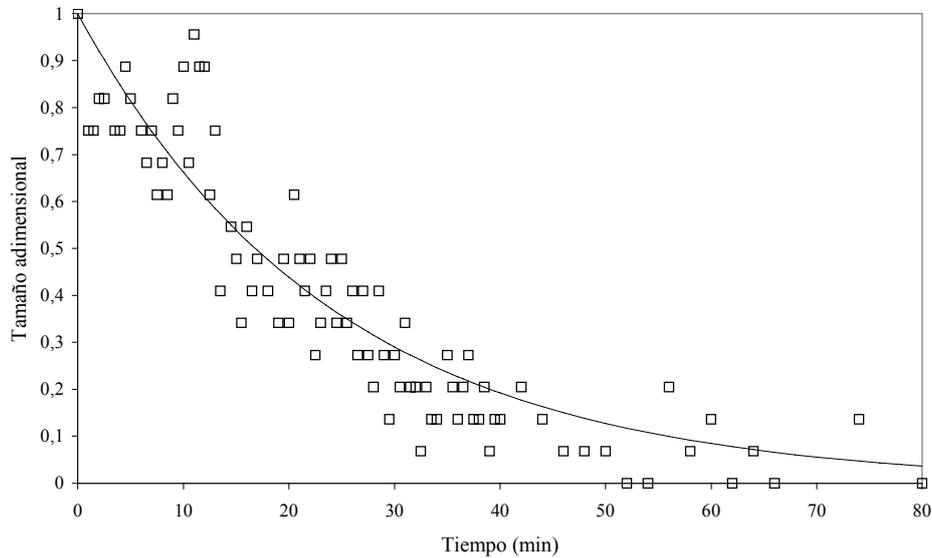


Figura 6: Variación del tamaño adimensional de A con el tiempo de proceso, durante a el escaldado a 60 °C.

T baño (°C)	n° de muestras	$K_m (\text{min}^{-1})$	S.D. (min^{-1})
50	7	0,01965	0,0141
60	6	0,04123	0,0074
70	6	0,06448	0,0083
80	8	0,13105	0,0561
90	3	0,23253	0,0114

Tabla 1: Constantes de velocidad media de contracción para cada proceso

En la [Figura 7](#) se muestra la variación de la dimensión característica A simulada por medio de los parámetros obtenidos del modelo de regresión ([Tabla 1](#)), para las distintas temperaturas del baño. De la observación de la misma se consideró adecuado, a los efectos de determinar los tiempos de escaldado, tomar como parámetro de finalización del proceso una contracción del 18%, ya que contracciones mayores a este valor tornan impráctico (tiempos demasiado largos) el proceso para bajas temperaturas del baño. De esta manera se obtuvieron para las temperaturas del medio de calentamiento de 50, 60, 70, 80 y 90°C tiempos de 77.0, 37.0, 23.0, 12.0 y 7.0 minutos, respectivamente.

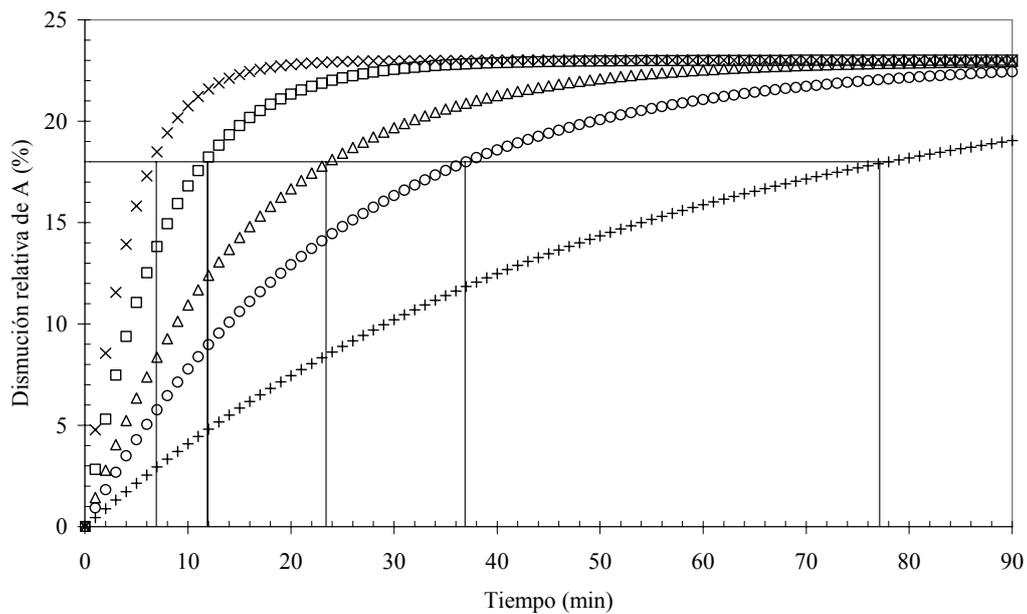


Figura 7: Variación simulada de la disminución relativa porcentual de A y estimación del tiempo de proceso a diferentes temperaturas de escaldado: (x) 90 °C, (□) 80 °C, (Δ) 70 °C, (○) 60°C, (+) 50 °C.

4.2 Simulación de la Distribución de Temperaturas y Variación de Tamaños

En la [Figura 8](#) se muestra a modo de ejemplo un gráfico 3D del hongo, presentando la distribución de la temperaturas en dos planos: uno longitudinal y otro transversal (que pasa por el punto más frío), luego de 7.00 min. de escaldado a 90°C. En el mismo también se observa la geometría inicial (ejes de geometría) y final del hongo mostrando la contracción del tamaño a dicho tiempo. En esta se comprueba además que el punto más frío del hongo se encuentra en el centro geométrico de la cabeza del mismo y que el tallo es la región que alcanza mayores temperaturas.

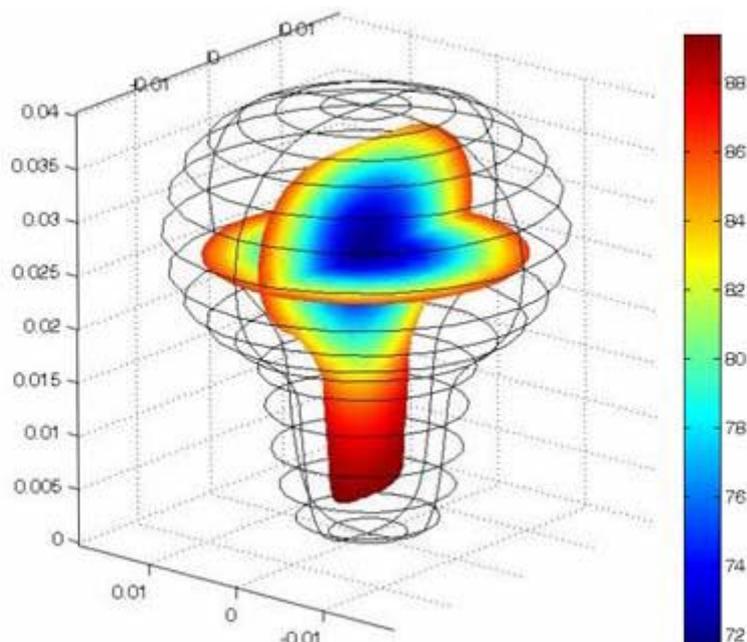


Figura 8: Distribución de temperaturas y contracción de tamaño luego de 7 minutos de escaldado a 90 °C

En la [Figura 9](#) se presenta una secuencia de imágenes mostrando la distribución de temperaturas y variación de tamaño del hongo, simuladas por el modelo 2D axisimétrico, a intervalos de 2 minutos, durante el escaldado a 70°C. En la misma se observa una temperatura uniforme en todo el dominio del hongo al inicio del proceso (condición inicial). En los minutos iniciales del escaldado se presenta una gran diferencia de temperatura entre la superficie y el centro del mismo, la cual va disminuyendo con el transcurso del proceso. Por su parte el tamaño se reduce rápidamente en la etapa inicial, haciéndose más lenta al final del proceso, correspondiéndose con el comportamiento observado previamente. Similares patrones de temperatura y contracción del tamaño se obtuvieron para los restantes procesos.

Como se puede observar en la [Figura 10](#) las temperaturas predichas, por el modelo de simulación 3D con malla móvil, para el centro térmico mostraron mayor retardo que las experimentales. Este comportamiento puede explicarse por la gran diferencia de conductividad térmica y calor específico, entre la termocupla y el hongo, siendo 400 veces mayor y 50 veces menor respectivamente ([Akterian et al., 1995](#)). En este caso, debido al gran contacto entre el hongo y la termocupla, se consideró que la temperatura adquirida experimentalmente se corresponde con la temperatura media simulada del hongo.

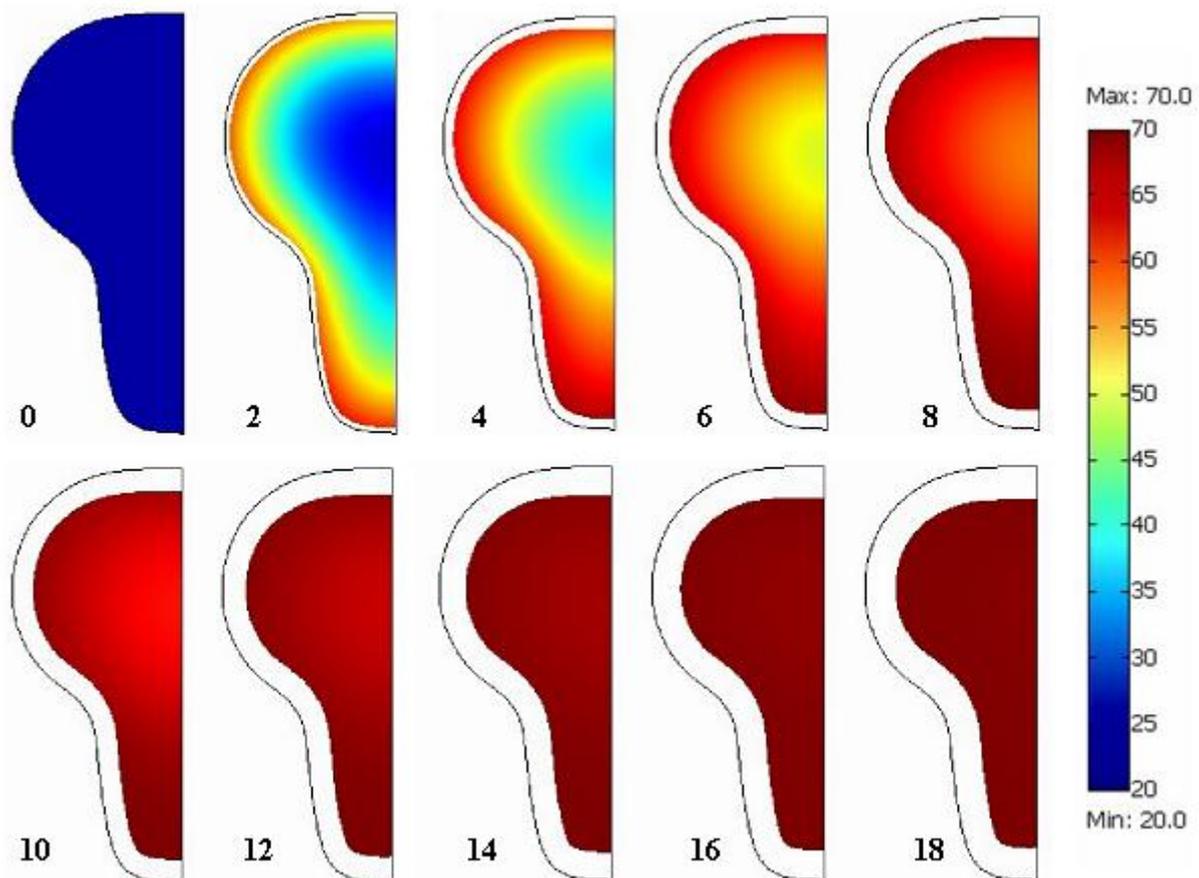


Figura 9: Secuencia de imágenes simuladas, a intervalos de 2 minutos, mostrando la distribución de temperaturas y contracción del tamaño durante el escaldado a 70°C.

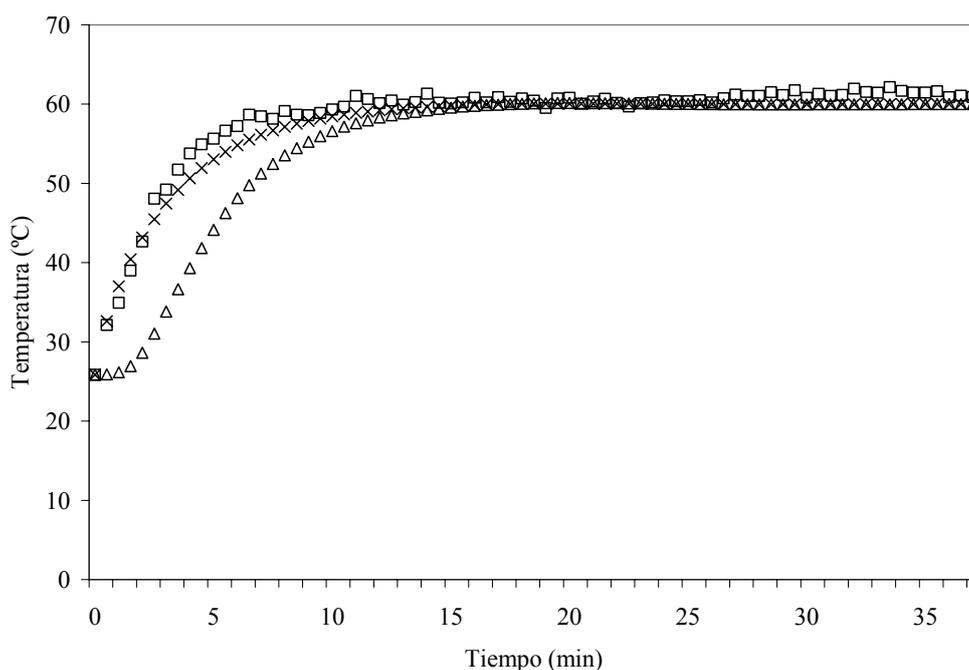


Figura 10: Evolución de la temperatura del hongo durante el escaldado a 60 °C. □ experimental en el centro térmico, Δ simulada en el centro térmico, x simulada media.

En la [Tabla 2](#) se presentan las diferencias relativas medias obtenidas para todos los procesos y modelos de simulación. En esta se observan que las temperaturas medias tienen mayor concordancia, con las temperaturas experimentales, que las simuladas para el centro térmico, lo cual valida la consideración asumida anteriormente. Por otra parte las D_{rm} aumentaron con la temperatura del medio externo (baño termostatizado), esto se debe a que las diferencias de temperaturas son mayores al inicio, disminuyendo a medida que transcurre el escaldado (ver [Figura 10](#)), al aumentar la temperatura del medio externo se acortan los tiempos de procesamiento y con ello las diferencias relativas medias son mayores.

Temperatura	Modelo de simulación	Diferencias relativas medias (D_{rm}) (%)				
		50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
Media	2D - malla fija	2.56	2.24	4.68	5.47	14.64
	2D - malla móvil	2.49	2.02	4.57	5.32	12.69
	3D - malla fija	2.54	2.23	4.64	5.46	14.63
	3D - malla móvil	2.50	2.02	4.57	5.35	12.78
En el centro Térmico	2D - malla fija	2.61	6.84	15.31	19.07	32.63
	2D - malla móvil	2.42	6.30	14.00	17.23	29.32
	3D - malla fija	2.53	6.85	15.29	19.09	32.66
	3D - malla móvil	2.41	6.29	14.08	16.95	29.14

Tabla 2: Diferencias relativas medias entre las temperaturas simuladas y experimentales, para los distintas temperaturas de escaldado y modelos de simulación.

Del análisis comparativo entre los modelos de simulación con malla fija y malla móvil se puede concluir que, si bien las D_{rm} fueron favorables a este último, no se presentaron diferencias considerables entre ambos. Lo anterior podría deberse a que la contracción de tamaño se produce, en este caso, en forma relativamente lenta, y a medida que aumenta la

temperatura del baño y por consiguiente la velocidad de reducción de tamaño, las diferencias entre las temperaturas predichas por modelos con malla fija y móvil aumentan.

En cuanto a los tiempos de procesamiento computacional fueron aumentando con el grado de complejidad del modelo de simulación (ver [Tabla 3](#)). Si bien el tiempo necesario para obtener la solución del modelo tridimensional con malla móvil, fue mayor que los restantes, este no resultó ser excesivo a los fines prácticos. No obstante, en este caso, donde la geometría del hongo se puede considerar simétrica, el modelo de simulación 2D axisimétrico con malla móvil, resulta ser el más adecuado para el caso presentado.

Modelo de simulación		Tiempo medio de procesamiento computacional (s)
Geometría	Tipo de malla	
2D axisimétrico	fija	0.46
2D axisimétrico	móvil	9.38
3D	fija	13.02
3D	móvil	1401.38

Tabla 3: Tiempos medio de procesamiento computacional para los distintos modelos de simulación

En la [Tabla 4](#) se presentan los valores de cocción obtenidos para las distintas temperaturas de proceso y modelos de simulación. Como se puede observar en la misma las diferencias entre los valores de cocción medio y superficial se acentúan a altas temperaturas del baño, lo que se corresponde con las diferencias de temperaturas entre la superficie y el centro del mismo, mostradas en la [Figura 9](#).

Modelo de simulación	Valores de cocción (minutos)									
	50°C		60°C		70°C		80°C		90°C	
	C _{medio}	C _{sup}	C _{medio}	C _{sup}	C _{medio}	C _{sup}	C _{medio}	C _{sup}	C _{medio}	C _{sup}
2D - malla fija	0.719	0.740	0.791	0.847	0.847	1.169	0.961	1.265	0.512	1.108
2D - malla móvil	0.721	0.741	0.800	0.849	0.849	1.170	1.045	1.282	0.530	1.036
3D - malla fija	0.720	0.741	0.792	0.847	0.847	1.170	0.962	1.260	0.512	1.109
3D - malla móvil	0.722	0.742	0.800	0.849	0.849	1.171	1.031	1.272	0.525	1.032

Tabla 4: Valores de cocción medio y superficiales para todos los procesos y modelos de simulación.

Los valores de cocción obtenidos para los modelos con malla móvil resultaron ligeramente mayores que los de malla fija, lo cual indica un calentamiento levemente mayor del hongo cuando se considera la contracción volumétrica.

5 CONCLUSIONES

Se obtuvo una cinética simple de cambio de tamaño del hongo, que permite determinar de manera práctica y sencilla los tiempos de escaldado necesarios para alcanzar una determinada reducción de tamaño. Todos los modelos de simulación desarrollados predijeron

satisfactoriamente la evolución térmica del hongo durante el proceso de escaldado, permitiendo a su vez calcular índices de calidad cinéticos como el valor de cocción.

Del análisis comparativo de las distintas soluciones se puede concluir que las diferencias fueron favorables a los modelos que consideran la contracción de tamaño (malla móvil), especialmente cuando las temperaturas del medio de calentamiento son altas y la velocidad de contracción de tamaño es mayor. El modelo de simulación 2D axisimétrico con malla móvil, resultó ser el más adecuado para el caso estudiado, presentando una buena concordancia con los datos experimentales y un breve tiempo de procesamiento computacional.

NOMENCLATURA

A	diámetro del botón (cabeza) (m)
A_I	factor pre-exponencial (min^{-1})
C	valor de cocción (min)
C_p	capacidad calorífica ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
d	diámetro del tallo del hongo (m)
D_e	dimensión característica de equilibrio (m)
D_{rm}	diferencia relativa media entre las temperaturas simuladas y experimentales (%)
D_t	dimensión característica instantánea (m)
E_a	energía de activación (kcal/mol)
h	coeficiente de transferencia de calor convectivo ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
H	largo del botón (cabeza) (m)
k	conductividad térmica del hongo ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
K_I	constante de velocidad de cambio de dimensión característica (A o L) (min^{-1})
K_m	constante de velocidad media de cambio de dimensión característica (min^{-1})
L	tamaño longitudinal del hongo (m)
m	número de valores experimentales
r	coeficiente de correlación
R	constante universal de los gases ($\text{cal K}^{-1} \text{mol}^{-1}$)
T	temperatura ($^{\circ}\text{C}$ o K)
t	tiempo (min)
$T(x, y, z, t)$	temperatura del hongo a una dada localización y tiempo ($^{\circ}\text{C}$)
T_{∞}	temperatura del medio de calentamiento ($^{\circ}\text{C}$)
V	volumen del hongo (m^3)
x, y, z	coordenadas (m)
z_c	temperatura de reducción decimal ($^{\circ}\text{C}$)
ρ	densidad (kg m^{-3})
Γ	superficie del dominio
Ω	dominio
<i>Subíndices</i>	
e	experimental
f	final
ref	referencia
s	simulada
sup	superficie

REFERENCIAS

- Akterian, S. G. (1995). Numerical simulation of unsteady heat transfer in canned mushrooms in brine during sterilization processes. *Journal of Food Engineering* 25 45-53.
- Biekman, E. S. A., Kroese-Hoedeman, H. I. & Schijvens, E. P. H. M (1995). Loss of solutes during blanching of mushrooms (*Agaricus bisporus*) as a result of shrinkage and extraction. *Journal of Food Engineering* 28 139-152.
- Biekman, E. S. A., van Remmen, H. H. J., Kroese-Hoedeman, H. I., Oginkf, J. J. M. & Schijvens, E. P. H. M. (1997). Effect of shrinkage on the temperature increase in evacuated mushrooms (*Agaricus bisporus*) during blanching. *Journal of Food Engineering* 33 87-09.
- COMSOL AB. *COMSOL Multiphysics User's Guide*. Version: September 2005, COMSOL 3.2.
- Devece, C., Rodríguez-López, J. N., Fenoll, J. T., Catalá, J. M., De los Reyes, E. & García-Cánovas, F. (1999) Enzyme inactivation analysis for industrial blanching applications: comparison of microwave, conventional, and combination heat treatments on mushroom polyphenoloxidase activity. *J. Agric. Food Chem*, 47 4506-4511.
- Goñi, S., Purlis, E. & Salvadori, V. (2007). Three-dimensional reconstruction of irregular foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, 82 536-547.
- Konanayakam, M. & Sastry, S.K. (1988). Kinetics of shrinkage of mushroom during blanching. *Journal of Food Science*, 53, 5 1406- 1411.
- Kotwaliwale, N., Bakane, P. & Verma, A. (2007). Changes in textural and optical properties of oyster mushroom during hot air drying. *Journal of Food Engineering* 78 1207-1211.
- Lau, M.H., Tang, J. (2002). Pasteurization of pickled asparagus using 915 MHz microwaves. *Journal of Food Engineering* 51 283-290.
- Martins, R. C. (2006). Simple finite volumes and finite elements procedures for food quality and safety simulations. *Journal of Food Engineering* 73 327-338.
- Matser, A. M., Knott, E. R., Teunissen, P. G. M., Bartels, P. V. (2000). Effects of high isostatic pressure on mushrooms. *Journal of Food Engineering* 45 11-16.
- Mathworks, 2005. Image processing toolbox for use with Matlab, The Mathworks Inc., Natick, USA.
- McArdle, F.J. & Curwen, D. (1962). Some factors influencing shrinkage of canned mushrooms. *Mushroom Science* 5:547.
- McCord, J.D. & Kilara, A. (1983). Control of enzymatic browning in processed mushrooms (*Agaricus bisporus*). *Journal of food science* 48 1479 -1483.
- Shiowshuh, S. & Hayakawa K. (1991). Finite difference simulation for heat conduction with phase change in an irregular food domain with volumetric change. *Int. J. Heat Mass Transfer* 34 1337-1346.
- Wen-Ching Ko, Wen-Chian Liu b, Yu-Ting Tsang b, Chang-Wei Hsieh. (2007). Kinetics of winter mushrooms (*Flammulina velutipes*) microstructure and quality changes during thermal processing. *Journal of Food Engineering* 81 587-598.
- Yadav, B.K. & Jindal, V.K. (2007). Dimensional changes in milled rice (*Oryza sativa* L.) kernel during cooking in relation to its physicochemical properties by image análisis. *Journal of Food Engineering* 81 710-720.