

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DEL AGUA DURANTE EL SALADO DE TROZOS DE CARNE CAPRINA USANDO EL PROBLEMA INVERSO

Determining the Water Diffusion Coefficient During Salting Goat Meat Slices Using Inverse Problem

Otoniel Corzo^{1*}, Nelson Bracho² y Jaime Rodríguez³

¹Departamento de Tecnología de Alimentos. Universidad de Oriente. Guatamare. Venezuela. Fax: 0295-4006571.

E-mail: otocorzo@cantv.net. ²Programa de Estadística. Universidad de Oriente. Guatamare. Venezuela.

³Programa de Ingeniería Pesquera. Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda. Punto Fijo. Venezuela.

RESUMEN

Se determinó el coeficiente de difusión del agua (D) durante el salado en pila de trozos de carne caprina utilizando diferentes sales. Los trozos tenían $4,0 \times 10^{-2}$ m; $4,0 \times 10^{-2}$ m y $1,0 \times 10^{-2}$ m de longitud, ancho y espesor, respectivamente. Los trozos fueron salados durante seis días (d) utilizando NaCl y mezclas de NaCl, KCl, CaCl₂ and MgCl₂. Cada d se removieron muestras y se determinó su humedad. El problema inverso de la determinación de D fue resuelto utilizando los algoritmos de Levenberg-Marquardt y Silva y col. Valores altos del coeficiente de determinación ($R^2 > 0,91$) y valores bajos del ji-cuadrado ($\chi^2 < 5,0$) sugirieron que ambos algoritmos eran aprovechables para estimar D durante el salado en pila. Los valores de D estimados por el logaritmo de Levenberg-Marquardt variaron desde $1,61 \times 10^{-10}$ m²/s a $2,33 \times 10^{-10}$ m²/s, mientras que los determinados por el de Silva y col. lo hicieron desde $1,46 \times 10^{-10}$ m²/s a $2,44 \times 10^{-10}$ m²/s. Los valores calculados por los dos métodos diferían entre 3,01 y 10,68%.

Palabras clave: Coeficiente de difusión, problema inverso, algoritmos de optimización, mezclas de salado.

ABSTRACT

The water diffusion coefficient (D) of goat slices during pile salting using different salts was determined. Slices have 4.0×10^{-2} m; 4.0×10^{-2} m and 1.0×10^{-2} m of length, width and thickness, respectively. Slices were salting during six days (d) using NaCl y mixtures of NaCl, KCl, CaCl₂ and MgCl₂. Samples were removed

each d and their moisture was determined. The inverse problem of determining D was solved using the Levenberg-Marquardt and Silva et al. algorithms. High values of coefficient of determination ($R^2 > 0.91$) and low values of chi-squared ($\chi^2 < 5.0$) suggested that both of algorithms are suitable for estimate D during pile salting. D values estimated by Levenberg-Marquardt algorithm ranged from 1.61×10^{-10} m²/s to 2.33×10^{-10} m²/s while those estimated by Silva et al. algorithm ranged from 1.46×10^{-10} m²/s to 2.44×10^{-10} m²/s. The values calculated by both methods differed between 3.01 to 10.68%.

Key words: Diffusion coefficient, inverse problem, optimization algorithms, salting mixture.

INTRODUCCIÓN

El salado es uno de los métodos utilizados en la conservación de los alimentos de origen animal. Hay tres tipos de salado: salado seco, salado húmedo y una combinación de estos dos métodos. Los cambios en la composición del alimento durante el salado, consisten no sólo en la ganancia de sal, sino también en la pérdida de humedad, de ciertos componentes solubles y proteínas [32], lo que contribuye a obtener un sabor y textura completamente diferente en los productos cocidos o sometidos a cocción, cuando se comparan con los preparados a partir de los alimentos crudos. En los estados Lara y Falcón, se acostumbra tradicionalmente salar la carne caprina (*Capra hircus*) con NaCl, pero debido a la correlación de esta sal con la hipertensión arterial, se han realizado estudios de su sustitución parcial con otras sales [20], modelando la transferencia de masa [8] y analizando su efecto en los contenidos de sodio y agua [9] del producto salado. La transferencia de agua involu-

crada en el salado es un aspecto importante en el diseño de un proceso industrial que sea factible económicamente y a la vez elabore un producto de buena aceptación por el consumidor y adecuada estabilidad. La transferencia de agua durante el salado se puede describir por un modelo matemático adecuado como, por ejemplo, el modelo de difusión de líquidos que involucra la ecuación de difusión [10]. Las técnicas numéricas y analíticas se aplican generalmente para la determinación del coeficiente de difusión del agua durante el proceso. La ecuación de difusión se ha resuelto numéricamente para sólidos con diferente geometría y con parámetros termo-físicos variables [2, 3, 7, 12, 14, 17, 18, 26, 27, 33], utilizando condiciones de borde de primera clase en la superficie externa de los alimentos para la descripción del proceso [13, 24]. Los métodos numéricos, tales como el de diferencias finitas [15, 30] y el de los elementos finitos [4, 34] se utilizan preferentemente para resolver modelos matemáticos complejos, que consideren simultáneamente los mecanismos de transferencia de masa y calor. El problema inverso es el conjunto de métodos usados para extraer información útil de un proceso a partir de medidas físicas o datos, y su objetivo en el salado es determinar el contenido de humedad en el alimento, usando soluciones de la ecuación de difusión. Para el problema inverso, el coeficiente de difusión del agua en el alimento se considera como un parámetro conocido y en este sentido se ha usado generalmente, un algoritmo de optimización [19, 24, 26]. El método de Levenberg-Marquardt [21] es un algoritmo bastante estable y potente, que se ha aplicado a una variedad de problemas inversos [16, 22, 23, 26]. Asumiendo condiciones de borde de primera y tercera clase, se propusieron optimizadores que escanean el dominio del coeficiente de difusión para encontrar el mínimo de una función objetivo, utilizando un software para diversas geometrías [25]. Los objetivos de este estudio fueron estimar el D durante el salado seco de trozos de carne caprina, utilizando los algoritmos de Levenberg-Marquardt y de Silva y col. [25], e investigar los efectos de la composición de la mezcla de salado, en el coeficiente de difusión.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima

La carne caprina se compró en un mercado de Punta Cardón, estado Falcón, Venezuela. La carne se fileteó manualmente y luego los filetes se cortaron en trozos de $4,0 \times 10^{-2}$ m de largo, $4,0 \times 10^{-2}$ m de ancho y $1,0 \times 10^{-2}$ m de espesor usando un molde metálico. El peso promedio de cada trozo (23,6 g) fue determinado en una balanza Sartorius, modelo AZ3102 (Sartorius mechatronics, EUA). Los contenidos de humedad, NaCl y cenizas, el pH y la actividad de agua en la carne fresca fueron determinados previamente [9].

Salado

Los trozos se dividieron aleatoriamente en seis grupos que contenían 36 trozos cada uno, y fueron salados en

pila con diferentes mezclas y proporciones de NaCl, KCl, CaCl_2 y MgCl_2 (TABLA I). Todas las sales eran polvos blancos cristalinos. Se añadieron agentes de curado (150 ppm de KNO_3 y 150 ppm de NaNO_2) a cada mezcla. El salado en pila fue realizado cubriendo los trozos con la mezcla salina (1,7 g mezcla/g de carne), a temperatura ambiente ($29 \pm 0,5^\circ\text{C}$). En un recipiente plástico con drenaje, se colocó una capa de mezcla salina en el fondo, dos capas de carne de 18 trozos cada una, con una capa de mezcla entre ellas y otra en la parte superior de la pila. A intervalos de un d, durante seis d, se sacaron tres trozos de cada capa, se removió el exceso de mezcla y se determinó el contenido de agua [1] en cada uno de ellos. El salado se repitió dos veces, utilizando cada una de las mezclas salinas, por lo cual, los resultados reportados corresponden al promedio de doce réplicas.

TABLA I
COMPOSICIÓN DE LAS DIFERENTES MEZCLAS SALINAS

Mezcla	NaCl (%)	KCl (%)	CaCl_2 (%)	MgCl_2 (%)
1	100	-	-	-
2	75	25	-	-
3	65	35	-	-
4	50	50	-	-
5	55	25	15	5
6	45	25	20	10

Ecuación de difusión

Para el problema directo de transferencia de masa en el interior de los alimentos sometidos al proceso de salado, se utiliza el modelo de difusión, teniendo en cuenta los siguientes supuestos: 1) el alimento tiene la forma geométrica de un paralelepípedo recto rectángulo de espesor $2a$, ancho $2b$ y longitud $2c$; 2) la transferencia de agua en el alimento es tridimensional; 3) el contenido de agua inicial, está distribuido de manera uniforme en todo el producto; 4) el encogimiento es despreciable; y 5) el coeficiente de difusión es constante y homogéneo durante el proceso.

Con base en los supuestos anteriores, la ecuación que define el modelo matemático se puede escribir como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\lambda\phi) = \nabla \cdot (\Gamma^\phi \nabla \phi) + S \quad (1)$$

donde λ y Γ^ϕ son los parámetros del proceso de difusión y S es un término fuente.

Estableciendo $\lambda = 1$, $\Gamma^\phi = D$ (coeficiente de difusión del agua), $\phi = X$ (contenido de agua en base seca) y $S = 0$, la solución analítica para la geometría considerada es [10]:

$$\frac{X_o}{X_e} = MR = \frac{512}{\pi^6} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp(2n+1)^2 \pi^2 D t / a^2 * \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^2} \exp(2m+1)^2 \pi^2 D t / b^2 * \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)^2} \exp(2k+1)^2 \pi^2 D t / c^2 \quad (2)$$

donde X_o , X y X_e son los contenidos en base seca (bs) de agua inicial, a un tiempo t , y en equilibrio (kg/kg bs) respectivamente, D (m^2/s) es el coeficiente de difusión del agua y t (s) es el tiempo.

El problema definido por esta ecuación, se conoce como un problema directo cuando se conocen las condiciones iniciales y de borde, así como todos los parámetros que aparecen en la formulación y su objetivo es determinar el contenido de humedad en el alimento salado. Para el problema inverso, de interés en este estudio, el coeficiente de difusión del agua se considera como un parámetro desconocido.

Función objetivo

En el ajuste de una función $\hat{y}(t; p)$ de una variable independiente t y un vector p de n parámetros a un conjunto de datos (t_i, y_i) , es costumbre y conveniente minimizar el ji-cuadrado (χ^2) entre los datos medidos $y(t_i)$ y la función ajustada $\hat{y}(t_i; p)$. La función objetivo para este problema inverso, es el χ^2 del ajuste de solución analítica a los datos experimentales [31]:

$$\chi^2(p) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_p} \frac{y(t_i) - \hat{y}(t_i; p)^2}{\sigma_i^2} = \frac{1}{2} y^T W y - y^T W \hat{y} + \frac{1}{2} \hat{y}^T W \hat{y} \quad (3)$$

donde el valor σ_i es el error en la medición de $y(t_i)$. La matriz de peso W es diagonal con $W_{ii} = 1/\sigma_i^2$. Si la función \hat{y} es no lineal en los p parámetros del modelo, la minimización de χ^2 con respecto a éstos, se debe realizar iterativamente. La meta de cada iteración es encontrar una perturbación h en los p parámetros, que reduzca χ^2 .

El método de la máxima pendiente es un método de minimización general que actualiza los valores de los parámetros, en la dirección opuesta a la del gradiente de la función objetivo.

El gradiente de la función objetivo χ^2 con respecto a los parámetros es:

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial p} = -[(y - \hat{y}(p))^T W \left[\frac{\partial \hat{y}(p)}{\partial p} \right]] = -(y - \hat{y})^T W J \quad (4)$$

donde los $m \times n$ de la matriz Jacobiana (J) representa la sensibilidad local de la función \hat{y} a la variación en los p parámetros. La perturbación h que mueve los valores de los parámetros en la dirección de la máxima pendiente está dada por:

$$h_{gd} = \alpha J^T W (y - \hat{y}) \quad (5)$$

donde el escalar positivo α , determina la cantidad de etapas.

El método de Gauss-Newton [16] es un método de minimización de una función objetivo de suma de cuadrados. Se presume que la función objetivo es aproximadamente cuadrática en los parámetros cerca de la solución óptima. La función evaluada con parámetros perturbados del modelo, se puede aproximar al nivel local utilizando una expansión de primer orden en la serie de Taylor. La ecuación normal resultante para la perturbación de Gauss-Newton es:

$$(J^T W J) h_{gn} = J^T W (y - \hat{y}) \quad (6)$$

Algoritmo de Levenberg-Marquardt

El algoritmo de Levenberg-Marquardt varía adaptativamente las actualizaciones de los parámetros entre los métodos de la máxima pendiente y Gauss-Newton:

$$(J^T W \lambda J) h_{lm} = J^T W (y - \hat{y}) \quad (7)$$

donde los valores pequeños del parámetro algorítmico λ conducen a una actualización de Gauss-Newton y los grandes valores a una actualización de la máxima pendiente.

La relación de actualización sugerida por Marquardt es:

$$(J^T W \lambda \text{diag} J^T W J) h_{lm} = J^T W (y - \hat{y}) \quad (8)$$

Algoritmo de Silva y col.

Se ha propuesto un algoritmo para la determinación del coeficiente de difusión del agua durante los procesos de secado, considerando condiciones de borde de primer orden y usando el problema inverso [25]. La función objetivo es el χ^2 del ajuste de la solución analítica a los puntos experimentales, definida como [30]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_p} [X_{exp i} - X_{ci}(D)]^2 \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (9)$$

donde $X_{exp i}$ es el i -ésimo punto experimental del contenido de agua promedio; $X_{ci}(D)$ es el promedio del contenido de agua en el mismo punto, calculado por la solución analítica de la ecuación de difusión; σ_i es la desviación estándar del contenido de agua en el punto i ; D es el coeficiente efectivo de difusión y N_p es el número de puntos experimentales. Así, un D óptimo se puede determinar para cada conjunto de datos experimentales, minimizando χ^2 . Si σ_i no es obtenido del experimento y es por lo tanto desconocido, se atribuye $\sigma_i = 1$ para todos los puntos y tiene el mismo peso estadístico de $1/\sigma_i^2 = 1$.

El algoritmo empieza con un valor inicial de D cercano a cero (1×10^{-20}) y define un intervalo de búsqueda que contenga el valor de D referente a un mínimo χ^2 , el valor inicial se sustituye en la solución analítica de la ecuación de difusión, tomando un cierto número de términos de la serie, se obtiene un valor de X_{ci} (D) para tiempos dados y se calcula χ^2 . Cuando χ^2 tiene el mínimo valor, se obtiene el D óptimo.

En este estudio, la optimización se realizó utilizando el programa "Prescribed" que analiza los procesos de difusión de agua (condición prescrita de borde) con los datos experimentales conocidos, para las geometrías de lámina infinita, cilindro infinito, esfera, cilindro finito y paralelepípedo recto rectángulo [25].

Análisis estadístico

Se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) para encontrar efectos ($P < 0,05$) de la composición de la mezcla de salado sobre el D. En los casos en los cuales había efectos significativos, se evaluaron los valores medios mediante el análisis de mínimas diferencias significativas (LSD). Todos los análisis se efectuaron utilizando el paquete estadístico SPSS 10.0 [29].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las características físicoquímicas de la carne fresca fueron: $0,62 \pm 0,04\%$ NaCl; $76,58 \pm 0,32\%$ agua; $1,15 \pm \%$ cenizas; $0,994$ de actividad de agua y $6,04$ de pH.

Curva de pérdida de agua

El contenido de agua en el equilibrio varió entre $0,605$ y $0,879$ kg agua/kg bs. Con los datos obtenidos del contenido de agua durante el salado, con las diferentes mezclas salinas, se calcularon los valores de MR correspondientes (FIG. 1). Se puede observar que MR disminuyó ($P < 0,05$) al aumentar el tiempo de salado y el reemplazo parcial de NaCl con KCl (mezclas 2, 3 y 4), $CaCl_2$ y $MgCl_2$ (mezclas 5 y 6). La disminución fue más rápida en el periodo inicial de salado (1 d) para luego disminuir con el tiempo. Igual comportamiento fue observado en el salado de filetes de sardina (*Sardinella aurita*) [5]. Altos gradientes de sal en la superficie de los trozos de carne generaron a su vez altos gradientes de agua que indujeron

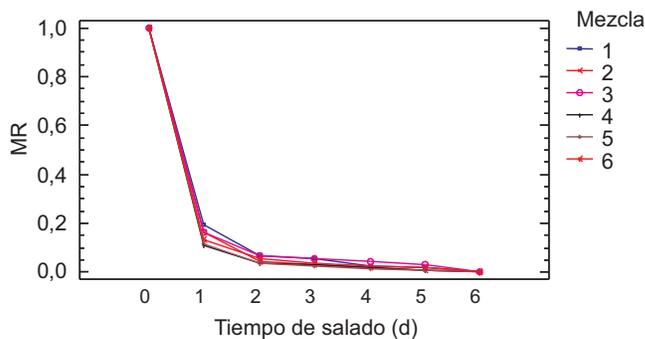


FIGURA. 1. VARIACIÓN DE LA RELACIÓN DE HUMEDADES (MR) DURANTE EL SALADO DE TROZOS DE CARNE CAPRINA UTILIZANDO DIFERENTES MEZCLAS SALINAS.

una rápida difusión de agua desde el interior hacia la superficie y luego a la mezcla de salado. Simultáneamente, la transferencia de sal indujo un incremento en el flujo de agua en el trozo, facilitando su remoción [5].

Coeficiente de difusión del agua

Para obtener una estimación más precisa de D se tomaron en cuenta los primeros 25 términos de la serie, en la solución analítica del modelo de difusión (Ec. 2). La TABLA II muestra los valores de D obtenidos utilizando los algoritmos de optimización de Lavenberg-Marquardt y de Silva y col. para el salado utilizando las diferentes mezclas de salado, y los correspondientes coeficientes de determinación (R^2) y χ^2 . Los altos valores de R^2 ($> 0,91$) y los bajos valores de χ^2 ($< 0,08$) demostraron que los dos algoritmos tenían un rendimiento similar, en la determinación de D.

El valor de D aumentó ($P < 0,05$) cuando se agregó KCl al NaCl (mezclas 2, 3 y 4) y disminuyó ($P < 0,05$) al incrementar el contenido de KCl en estas mezclas. Esto se debe probablemente a la disminución del gradiente teórico del contenido de agua en el proceso [19]. Cuando se agregaron $CaCl_2$ y $MgCl_2$ a las mezclas de NaCl y KCl (mezclas 5 y 6), D disminuyó ($P < 0,05$) y los valores fueron menores ($P < 0,05$) a los obtenidos durante el salado, usando NaCl (mezcla 1) o NaCl y KCl (mezclas 2, 3 y 4). La mayor electronegatividad de los cationes Ca^{+2} y Mg^{+2} los haría unirse fuertemente a los grupos

TABLA II
COEFICIENTES DE DIFUSIÓN DEL AGUA OBTENIDOS DEL AJUSTE DE LOS ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN

Mezcla	Método de Levenberg-Marquardt			Método de Silva <i>et al.</i>			Diferencia (%)
	D $\times 10^{10}$ m ² /s	R ²	χ^2	D $\times 10^{10}$ m ² /s	R ²	χ^2	
1	1,78 ± 0,09	0,914	0,0512	1,46 ± 0,08	0,923	0,0490	5,38
2	2,33 ± 0,08	0,914	0,0203	2,44 ± 0,08	0,959	0,0181	4,72
3	2,06 ± 0,10	0,913	0,0674	2,28 ± 0,07	0,968	0,0545	10,68
4	2,04 ± 0,08	0,914	0,0531	2,13 ± 0,08	0,951	0,0413	4,11
5	1,61 ± 0,09	0,915	0,0411	1,79 ± 0,09	0,927	0,0338	3,01
6	1,66 ± 0,09	0,911	0,0684	1,68 ± 0,09	0,914	0,0746	4,60

D = coeficiente de difusión del agua. R² = coeficiente de determinación. χ^2 = ji-cuadrado.

polares de la proteína fortaleciendo las interacciones proteicas [35] y sus sales respectivas formarían una costra que disminuye el flujo de agua desde el interior.

El mayor valor de D ($2,33 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ estimado por el algoritmo de Levenberg-Marquardt y $2,44 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ por el de Silva y col.), correspondió durante el salado usando la mezcla que contenía 75% NaCl y 25% KCl. El menor valor de D fue de $1,61 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ estimado por el algoritmo de Levenberg-Marquardt para el salado con la mezcla 55% NaCl, 25% KCl, 15% CaCl_2 y 5% MgCl_2 y de $1,46 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ determinado por la aplicación del algoritmo de Silva y col. para el salado con 100% NaCl. El ANOVA mostró que los valores de D determinados por los dos algoritmos eran diferentes ($P < 0,05$), excepto para el salado señalado anteriormente. La comparación múltiple de medias indicó que los valores de D encontrados por el algoritmo de Levenberg-Marquardt eran más bajos que los estimados por el de Silva y col. [25]. Los valores calculados por los dos métodos diferían entre 3,01 y 10,68% (TABLA II), siendo mayor esta diferencia, durante el salado usando NaCl y mezclas de NaCl, KCl, CaCl_2 y MgCl_2 . Dado que las diferencias son bajas, se puede decir que los dos algoritmos son útiles para estimar D durante el salado de trozos de carne caprina, utilizando mezclas de diferente composición.

El algoritmo de Levenberg-Marquardt es un método determinístico mientras que el de Silva y col. es analítico. La TABLA II muestra que los indicadores estadísticos, aplicando el método de Silva y col., eran significativamente mejores que los de Levenberg-Marquardt. El algoritmo de Silva y col. presentó dos ventajas: el tiempo de ejecución (35 seg) del software fue más corto, y sólo se necesitó colocar el conjunto de datos experimentales.

Los valores determinados de D están dentro del rango normalmente esperado (10^{-12} a $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$) durante el procesamiento de alimentos. Se han reportado valores de $4,05 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, $7,8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ y $1,6 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ en el secado de queso a 12°C y humedad relativa de 90, 85 y 50% respectivamente [4, 6, 28], de $8,75 \times 10^{-9}$ a $1,90 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ en el salado de filetes de sardina [5], de $1,27 \times 10^{-9}$ a $6,48 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ en el secado de habas [14], de 4×10^{-11} a $3 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ en el secado de dispersiones de almidón [2], y de $1,70 \times 10^{-10}$ a $2,01 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ durante el remojo de garbanzos (*Cicer arietinum*) tratados con ultrasonido de 25 kHz a 100W y 300W, respectivamente [36]. Esta variabilidad depende del tipo y condiciones del proceso, método utilizado para el tratamiento de los datos [37] y de la composición, estado fisiológico y homogeneidad de la estructura del producto [11].

CONCLUSIONES

El problema inverso de la determinación del coeficiente de difusión del agua durante el salado en pila de trozos de carne caprina con diferentes mezclas salinas, fue resuelto usando los métodos de Levenberg-Marquardt y Silva y col. Estos algoritmos fueron validados estadísticamente, siendo el de Silva y col. el que mostró los mejores rendimientos. El valor del coeficiente de difusión aumentó cuando se agregó KCl al NaCl y

disminuyó al aumentarse el contenido de KCl en las mezclas resultantes y al reemplazar parcialmente el NaCl con CaCl_2 y MgCl_2 , en las mezclas que contenían 25% KCl. Conocido el valor del D durante el salado, utilizando diferentes mezclas salinas, se puede mejorar la eficiencia del proceso puesto que con él se puede determinar el tiempo del proceso y el contenido de agua en el producto de una manera precisa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). Official Methods of Analysis. 15th Ed. Washington. EUA. 1285 pp. 1990.
- [2] BENALI, M. Drying of yellow pea starch on inert carriers: Drying kinetics, moisture diffusivity, and product quality. **J. Food Eng.** 110: 337–344. 2012.
- [3] BENNAMOUN, L.; BELHAMRI, A. Numerical simulation of drying under variable external conditions: Application to solar drying of seedless grapes. **J. Food Eng.** 76: 179–187. 2006.
- [4] BONA, E.; DA SILVA, R.S.S.F.; BORSATO, R.D.; SILVA, L.H.M.; DE SOUZA, D.A. Multicomponent diffusion modeling and simulation in prato cheese salting using brine at rest: The finite element method approach. **J. Food Eng.** 79: 771–778. 2007.
- [5] BOUDHRIOUA, N.; DJENDOUBI, N.; BELLAGHA, S.; KE-CHAOU, N. Study of moisture and salt transfers during salting of sardine fillets. **J. Food Eng.** 94: 83–89. 2009.
- [6] CASTELL-PALOU, A.; ROSSELLO, C.; FEMENIA, A.; BON, J.; SIMAL, S. Moisture profiles in cheese drying determined by TD-NMR: Mathematical modeling of mass transfer. **J. Food Eng.** 104: 525–531. 2011.
- [7] CORZO, O.; BRACHO, N.; ALVAREZ, C. Water effective diffusion coefficient of mango slices at different maturity stages during air drying. **J. Food Eng.** 87: 479–484. 2008.
- [8] CORZO, O.; RODRÍGUEZ, J.; GONZÁLEZ, V.C. Efectos del reemplazo parcial de cloruro de sodio sobre la transferencia de masa en el salado en pila de láminas de carne caprina. **Rev. Cientif. FCV-LUZ.** XXII (1): 59 – 64. 2012.
- [9] CORZO, O.; RODRIGUEZ, J.; GONZÁLEZ, V.C.; LEAÑEZ, J. Utilización de mezclas de cloruros en el salado de carne caprina (*Capra hircus*). **Rev. Cientif. FCV-LUZ.** XXII (4): 363–367. 2012.
- [10] CRANK, J. Diffusion in a plane sheet. **The mathematics of diffusion.** 2nd Ed. Clarendon Press, Oxford. Pp 44–68. 1975.
- [11] GOU, P.; MULET, A., COMAPOSADA, J.; BENEDITO, J.; ARNAU, J. Water diffusion in dry cured ham. In: **Proceeding of 10th international drying symposium.** Krakow, July 2–August 2, Poland. Pp 778–784. 1996.

- [12] GOWEN, A.; ABU-GHANNAM, N.; FRIAS, J.; OLIVEIRA, J., Modeling the water absorption process in chickpeas (*Cicer arietinum* L). The effect of blanching pretreatment on water intake and texture kinetics. **J. Food Eng.** 78: 810–819. 2007.
- [13] HACIHAFIZOGLU, O.; CIHAN, A.; KAHVECI, K.; LIMA, A.G.B., A liquid diffusion model for thin-layer drying of rough rice. **Eur. Food Res. Technol.** 226 (4): 787–793. 2008.
- [14] HASHEMI, G.; MOWLA, D.; KAZEMEINI, M. Moisture diffusivity and shrinkage of broad beans during bulk drying in an inert medium fluidized bed dryer assisted by dielectric heating. **J. Food Eng.** 92: 331–338. 2009.
- [15] HUSSAIN, M.M.; DINCER, I. Analysis of two-dimensional heat and moisture transfer during drying of spherical objects. **Int. J. Energ. Res.** 27: 703–713. 2003.
- [16] KANEVCE, L.; KANEVCE, G.; DULIKRAVICH, G. Application of inverse concepts to drying. **Therm. Sci.** 9 (2): 31-44. 2005.
- [17] KAYA, A.; AYDIN, O. Experimental investigation of drying kinetics of cherry laurel. **J. Food Proc. Eng.** 31: 398–412. 2008.
- [18] MALDONADO, S.; ARNAU, E.; BERTUZZI, M.A. Effect of temperature and pretreatment on water diffusion during rehydration dehydrated mangoes. **J. Food Eng.** 96: 333–341. 2010.
- [19] MARKOWSKI, M.; BIAŁOBRZEWSKI, I.; MODRZEWSKA, A. Kinetics of spouted-bed drying of barley: Diffusivities for sphere and ellipsoid. **J. Food Eng.** 96: 380–387. 2010.
- [20] MARTÍNEZ-ALVAREZ, O.; BORDERÍAS, A.J. Sodium replacement in the cod (*Gadus morhua*) muscle salting process. **Food Chem.** 93: 125-133. 2005.
- [21] MARQUARDT, D.W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. **J. Soc. Ind. Appl. Math.** 11(2): 431-441. 1963.
- [22] SILVA, C.K.F.; OLIVEIRA, A.S.S.; KUROZAWA, L.E.; MURR, F.E.X.; SILVA, Z.E. CITT and inverse analyses applied to the study of the mushroom drying process. **J. Food Eng.** 101: 166–178. 2010a.
- [23] SILVA, W.P.; PRECKER, J.W.; SILVA, C.M.D.P.S.; GOMES, J.P. Determination of effective diffusivity and convective mass transfer coefficient for cylindrical solids via analytical solution and inverse method: Application to the drying of rough rice. **J. Food Eng.** 98: 302–308. 2010b.
- [24] SILVA, W.P.; PRECKER, J.W.; SILVA, C.M.D.P.S.; SILVA, D.D.P.S. Determination of the effective diffusivity via minimization of the objective function by scanning: Application to drying of cowpea. **J. Food Eng.** 95: 298–304. 2009a.
- [25] SILVA, W.P.; SILVA, C.M.D.P.S. Prescribed adsorción-desorción, Versión 2.2 (2008-2009), Faculda de UCL. Brasil. En línea: <http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/Prescribed.htm>. 21-04-2011. 2008a.
- [26] SILVA, C.K.F.; SILVA, Z.E.; MARIANI, V.C. Determination of the diffusion coefficient of dry mushrooms using the inverse method. **J. Food Eng.** 95: 1–10. 2009b.
- [27] SILVA, W.P.; SILVA, C.M.D.P.S.; SILVA, D.D.P.S.; SILVA, C.D.P.S. Numerical Simulation of the Water Diffusion in Cylindrical Solids. **Int. J. Food Eng.** 4 (2): 1556-3758, 1394. 2008b.
- [28] SIMAL, S.; SANCHEZ, E.S.; BON, J.; FEMENIA, A.; ROSSELLO, C. Water and salt diffusion during cheese ripening: effect of the external and internal resistances to mass transfer. **J. Food Eng.** 48: 269–275. 2001.
- [29] SPSS 10.0 Windows Student Version. Spss Inc. Chicago. EUA. 2009.
- [30] SRIKIATDEN, J.; ROBERTS, J.S. Predicting moisture profiles in potato and carrot during convective hot air drying using isothermally measured effective diffusivity. **J. Food Eng.** 84: 516–525. 2008.
- [31] TAYLOR, J.R. The chi-squared test for a distribution. **An Introduction to Error Analysis.** 2nd Ed. University Science Books, Sausalito. EUA. Pp 261-271. 1997.
- [32] THORARINSDOTTIR, K. A.; ARASON, S.; BOGASON, S.; KRISTBERGSSON, K. The effects of various salt concentrations during brine curing of cod. **Int. J. Food Sci. Technol.** 39: 79–89. 2004.
- [33] VILLA-CORRALES, L.; FLORES-PRIETO, J.J.; XAMÁN-VILLASEÑOR, J.P.; GARCÍA-HERNÁNDEZ, E. Numerical and experimental analysis of heat and moisture transfer during drying of *Ataulfo* mango. **J. Food Eng.** 98: 198–206. 2010.
- [34] WANG, G. L.; SUN, D. Recent developments in numerical modelling of heating or cooling processes in the food industry: a review. **Trends Food Sci. Technol.** 14: 408–423. 2003.
- [35] XIONG, Y.L.; BREKKE, C.J. Gelation properties of chicken myofibrils treated with calcium and magnesium chlorides. **J. Musc. Food.** 2: 21–36. 1991.
- [36] YILDIRIM, A.; ÖNER, M.D.; BAYRAM, M. Fitting Fick's model to analyze water diffusion into chickpeas during soaking with ultrasound treatment. **J. Food Eng.** 104: 134–142. 2011.
- [37] ZOGZAS, N.P.; MAROULIS, Z.B. Effective moisture diffusivity estimation from drying data- A comparison between various methods of analysis. **Drying Technol.** 14(7-8): 1543-1573. 1996.