

01178

5

2e)

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD DURANTE EL
SECADO DE CAZÓN**

OSCAR RESENDIZ PACHECO

TESIS DE MAESTRÍA

**PRESENTADA A LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO DE LA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE**

**MAESTRO EN INGENIERÍA
(ENERGÉTICA)**

**Ciudad Universitaria, Coyoacán México, D.F.
Marzo de 1998**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

261855



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a la Universidad Autónoma de Baja California Sur el apoyo que se me otorgó para la realización de este trabajo, así como al Instituto de Ingeniería de la UNAM por el apoyo económico.

Al Dr. José Luis Fernández Zayas por su respaldo, amistad, consejos y recomendaciones. Al grupo de Ingeniería Básica por compartir el conocimiento y su amistad. A los maestros: M. en C. José Chagoyán Serrano, M. en C. José Alberto Rodríguez Montes, M. en E. S. Federico Tarcicio Poujol Galvan, Ing. Miguel Jiménez Vargas y al Ing. Alfredo Flores Irigollen por su disponibilidad y apoyo.

Con respeto y cariño, al técnico Gonzalo Cuevas Gómez Valdés que es un ejemplo ha seguir por su entusiasmo, ayuda y disponibilidad a toda prueba.

A la memoria de mis hermanos, a mi familia y amigos.

ÍNDICE

	Página
Resumen	
Nomenclatura	
1. Introducción	1
2. Antecedentes	4
3. Fundamento teórico	7
4. Procedimiento experimental	13
5. Resultados	19
6. Conclusiones	28
7. Recomendaciones	29
Bibliografía	30

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es determinar experimentalmente de forma indirecta la difusividad efectiva de cazón seco-salado, mediante el método de las pendientes que se basa en la segunda ley de Fick.

En un secador de laboratorio tipo túnel se realizaron cuatro pruebas de secado de filete de cazón (humedad inicial de 50 a 55%), en condiciones constantes de temperatura, velocidad y humedad absoluta del aire hasta alcanzar la humedad de equilibrio. Las temperaturas empleadas fueron 30, 35, 40 y 45°C a una velocidad promedio del aire de 1.05 m/s, suficiente para asegurar que el secado es independiente de esta variable.

Se registró la pérdida de peso de la muestra a intervalos de tiempo crecientes, debido a la tendencia asintótica del peso de la muestra en el tiempo, y se midieron las variables de secado con el fin de controlar el proceso. Las pruebas se suspendieron cuando la variación de dos pesadas consecutivas fue de 0.3 gramos en 24 h. Al finalizar cada una de las pruebas, se determinó el peso de los sólidos secos de la muestra total y se calcularon el contenido de humedad de equilibrio y la humedad inicial.

Se reportan las curvas de secado y de la difusividad efectiva en función del contenido de humedad y de la temperatura, así como el método empleado para su determinación. Los valores promedio de las difusividades encontradas

su determinación. Los valores promedio de las difusividades encontradas concuerdan aceptablemente en orden de magnitud con los valores reportados en la literatura.

Se observó que durante el secado la difusividad efectiva disminuye exponencialmente al decrecer el contenido de humedad y tiende a cero conforme la prueba se acerca al equilibrio. Además, se observó que la difusividad aumenta al aumentar la temperatura.

Nomenclatura

d	Espesor del filete, m
D	Difusividad, m^2/s
D_e	Difusividad efectiva, m^2/s
F	Rapidez de transferencia de masa por unidad de área perpendicular a la difusión, $kg/s\ m^2$
HR	Humedad relativa, %
LnD	Logaritmo natural de la difusividad
t	Tiempo, s
r	Coefficiente de correlación
T	Temperatura, $^{\circ}C$
v	Velocidad del aire, m/s
X	Concentración de agua, kg/m^3
X_0	Concentración inicial, kg/m^3
X_e	Concentración de equilibrio, kg/m^3
X'	Humedad, adimensional
Y	Humedad absoluta, g de agua/kg de aire
z	Coordenada espacial, m

Letras griegas

τ	Tiempo, adimensional
--------	----------------------

1 INTRODUCCIÓN

La pesca es la actividad económica más importante en Baja California Sur, y el secado solar de alguno de estos productos, un proceso térmico necesario y atractivo para su conservación en buen estado alimenticio. En la Universidad Autónoma de Baja California Sur se pretende operar y simular un sistema de secado solar, el cual consta de tres elementos: un calentador solar de aire tipo túnel inflable (en operación), un almacén de calor y un secador (en etapa de diseño).

Las comunidades pesqueras de esta región secan al sol principalmente dos especies: filete de cazón y de mantarraya. El secado al sol se define como la eliminación de humedad de un producto mediante su exposición a una corriente natural de aire (Anderson y Pederson, 1950); sus principales desventajas son tiempos de secado largos y baja calidad del producto final (Mat, 1983).

En el proceso de secado, el contenido de humedad en un producto se reduce con el fin de prevenir su deterioro debido al crecimiento de microorganismos, cuyo desarrollo depende de la actividad de agua (Troller y Christian, 1978). La medición de la actividad del agua en el material seco, que depende principalmente de los contenidos de humedad y sal (Doe y col., 1982), es útil para predecir si un alimento es microbiológicamente estable (Corry, 1975).

En la Universidad Autónoma de Baja California Sur, varios investigadores (Gutiérrez y col., 1992) han concluido que es necesario efectuar pruebas de secado en condiciones controladas, así como estudiar detalladamente la calidad del producto final, antes de recomendar condiciones adecuadas para el secado de productos.

La difusividad es una importante propiedad física que describe el transporte de agua en un medio homogéneo y que se define mediante la primera ley de Fick. Debido a ello, es usada en cálculos y predicciones de numerosos procesos. La predicción teórica de ésta propiedad de transporte es difícil, por lo variable de la estructura física y química y el contenido de agua de cada alimento. Por lo tanto, es necesario obtener estos datos de manera experimental (Rotstein, 1987, Vrentas y Duda, 1979).

Existen diversas combinaciones de mecanismos de transporte de agua, que incluyen la difusividad líquida, la difusión de vapor, el flujo capilar y la difusión superficial. Si la porosidad de la muestra es pequeña, el mecanismo predominante es la difusión líquida, mientras que para porosidades grandes el mecanismo que domina es la difusión de vapor. El transporte de agua debido a estos mecanismos puede ser estimado haciendo uso de la segunda ley de Fick (Lewis, 1987), y el concepto de difusividad efectiva que toma en cuenta la migración de agua debido a todos estos mecanismos de transporte en un medio heterogéneo.

En la literatura no se encontraron reportadas experiencias de la determinación de la difusividad efectiva durante el secado de cazón. Por ello, se realiza el presente estudio cuyo objetivo principal es determinar experimentalmente esta difusividad, y establecer su relación con la temperatura para el rango de las pruebas realizadas.

2 ANTECEDENTES

En la literatura sobre la determinación de la difusividad durante el secado de cazón se revizaron dos trabajos experimentales. Sin embargo, se consultaron diversos artículos donde se analiza el transporte de agua en otros materiales.

El interés por el estudio de la difusividad para diferentes alimentos y materiales ha aumentado en los últimos años. Sin embargo, para el filete de cazón son pocos los trabajos reportados. Aunque en 1965 Jason reporta una investigación que tuvo como propósito estudiar el efecto del contenido de grasa en la difusión del agua en el músculo de pescado, para dos especies en estudio: macarela y cazón. Jason determina la difusividad en el músculo con el fin de evaluar la manera en la cual el movimiento del agua es influenciado por la presencia de grasa. En este trabajo se cortaron porciones con una geometría definida de un paralelepípedo y se secaron a una temperatura de 30°C, a una humedad relativa de 30% y una velocidad del aire de secado de 152 cm/s. Así mismo, se les determinó el contenido de grasa por extracción con el aparato Soxhlet. Jason observó que para varias muestras de cazón, todos los valores de la difusividad decrecen con el incremento del contenido de grasa. Para el músculo de macarela obtuvo dos difusividades, y para el músculo de cazón tres. Los valores de estas difusividades son del orden de 10^{-7} cm²/s a 30°C.

Por otro lado, Bressan y col. (1981) realizaron un estudio sobre la difusividad y su dependencia con la temperatura durante el lavado de queso cuajado. Estos investigadores concluyen que el transporte de agua por difusión aumenta con la temperatura.

Okos y col. (1986) estudiaron la difusividad durante el secado de pastas, variando la temperatura de 40 a 85°C y el contenido de humedad de 0 a 25%. Las curvas de secado fueron estimadas con la segunda ley de Fick resuelta por diferencias finitas, y concluyen que aunque la ecuación de difusión logró predecir las curvas de secado a bajas temperaturas no predice la velocidad de secado cerca de la superficie de la muestra. Algunas de las posibles explicaciones son las siguientes:

1. Hay otras fuerzas impulsoras además del gradiente de concentración.
2. Existe un efecto causado por el endurecimiento de la superficie de la muestra, el cual reduce el transporte de agua.

Karathanos y col. (1991) realizaron un trabajo experimental que consistió en la obtención de la difusividad del agua en almidón a altas temperaturas y presiones. La difusividad fue estimada suponiendo que el transporte de agua es descrito por la segunda ley de Fick. Para pruebas con un contenido de humedad de 75% se usó gel de almidón, y para bajos contenidos de humedad

se usó polvo de almidón. Las muestras fueron colocadas a 25°C y 1 atm durante 167 h. Los valores de las difusividades obtenidas muestran que:

- 1). La difusividad del agua aumenta significativamente con la temperatura y decrece considerablemente con la presión.
- 2). La difusividad decrece cuando el contenido de humedad del almidón aumenta. El orden de magnitud de los valores de las difusividades encontradas son de $0.8 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ para el gel de almidón y $4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ para bajos contenidos de humedad.

Este trabajo pretende contribuir al conocimiento de la difusividad durante el secado de cazón, así como establecer la relación de ésta con la temperatura para el rango de las pruebas realizadas. Para ello, se resuelve la ecuación de la segunda ley de Fick y se compara la función resultante con las curvas experimentales de secado para determinar la difusividad efectiva mediante el método de las pendientes (Vagenas y Karathanos, 1991).

3 FUNDAMENTO TEÓRICO

La difusividad es una propiedad física de la materia, que se define para una sustancia homogénea mediante la primera ley de Fick (Crank, (1978):

$$F = -D \frac{\partial X}{\partial Z} \quad (1)$$

En donde:

F = rapidez de transferencia de masa por unidad de área perpendicular a la dirección de la difusión, kg/s m².

X = concentración del componente que difunde, kg/m³.

D = difusividad, m²/s.

z = coordenada espacial, m.

En la literatura revisada no se reportan métodos para predecir teóricamente la difusividad del agua en un alimento, debido principalmente a la complejidad de su estructura física y química. En consecuencia, se recomienda proceder experimentalmente. Una forma de hacerlo consiste en realizar pruebas de secado y, mediante la primera ley de Fick ec. 1, determinar directamente la difusividad. En este caso, la dificultad principal estriba en medir el gradiente de concentración durante el experimento. Por ello, en general en la literatura se

recomienda modelar el comportamiento del fenómeno con un balance de masa hecho para un volumen de control (segunda ley de Fick), y comparar la función resultante con los datos experimentales de secado. Esto conduce al método de las pendientes, el cual se aplica en este trabajo. Con este método la difusividad efectiva se obtiene al multiplicar el cuadrado del espesor del filete por la relación de la rapidez de cambio experimental de la humedad adimensional a la razón de cambio teórica de la misma humedad con respecto a un tiempo adimensional, como se presentará más adelante.

El balance de masa se lleva a cabo en un elemento de filete con geometría de placa plana, con lo cual se obtiene finalmente la segunda ley de Fick (ver fig. 1):

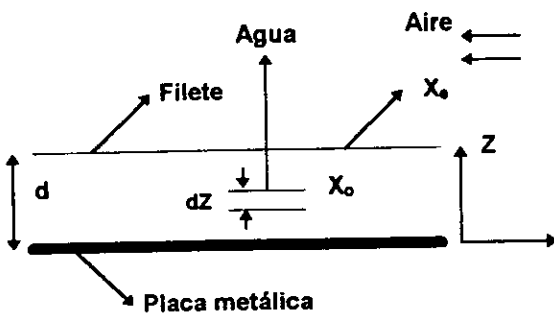


Figura 1. Esquema del balance de masa en un elemento del filete.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (2)$$

En donde:

X = concentración de agua, kg/m³

t = tiempo, s

Las suposiciones empleadas en el desarrollo del balance de masa son:

1. La difusividad es constante en el intervalo de humedades de interés.
2. El flujo de masa es unidireccional.
3. El espesor del filete permanece constante.
4. En todo el filete el contenido de humedad inicial es uniforme.
5. La difusión convectiva es nula (la concentración de agua en la superficie del filete está en equilibrio con el aire de secado).

Para generalizar los resultados de la ec. 2, se definen las siguientes variables adimensionales:

$$X^* = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} \quad \text{para la concentración.} \quad (3)$$

$$Z^* = \frac{z}{d} \quad \text{para la distancia.} \quad (4)$$

$$\tau = \frac{Dt}{d^2} \quad \text{para el tiempo.} \quad (5)$$

En donde:

X_o = concentración inicial, kg/m^3

X_e = concentración de equilibrio, kg/m^3

d = espesor del filete, m

Se obtiene así el siguiente modelo matemático:

$$\frac{\partial X^*}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 X^*}{\partial Z^{*2}} \quad (6)$$

Con las siguientes condiciones inicial y de frontera:

$$X^*(Z^*, 0) = 1 \quad \text{para } 0 \leq Z^* \leq 1 \quad \text{C.I.} \quad (7)$$

$$X^*(1, \tau) = 0 \quad \text{para } \tau \geq 0 \quad \text{C.F.1} \quad (8)$$

$$X^*(0, \tau) = 0 \quad \text{para } \tau \geq 0 \quad \text{C.F.2} \quad (9)$$

La solución a la ec. 6 es clásica y el procedimiento de resolución se encuentra bien documentado por Crank (1978), la función resultante se lista a continuación:

$$X^* = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \pi^2 \tau\right] \quad (10)$$

Obsérvese que en la ecuación anterior, X^* representa una relación de concentraciones de la sustancia que difunde (agua), y que no altera su valor al definirla en términos del contenido de humedad del filete, que es lo que se mide

experimentalmente. Por lo mismo, en adelante se entenderá que la concentración queda definida de la siguiente manera:

X = Contenido de humedad en base seca (unidad de masa de agua por unidad de masa de sólido seco).

Es necesario aclarar nuevamente que la difusividad, definida en la ec. 1, es una propiedad física que depende del gradiente de concentración en un medio originalmente homogéneo, y que la ec. 2 supone exclusivamente un mecanismo difusivo del transporte de agua a través del filete, debido a un gradiente de concentración del agua en el alimento. Al realizar las pruebas de secado, la cantidad de agua medida proviene de un medio heterogéneo; si bien el mecanismo dominante es difusivo (Lewis, 1987, Vagenas y col., 1991), hay migración de agua debido a otras fuerzas impulsoras como pueden ser: Diferencias de presión al encogerse la muestra, tensión superficial y difusión térmica. Por lo tanto, se define la difusividad efectiva como una propiedad de transporte general que considera como mecanismo dominante el difusivo, pero que toma en cuenta todos los demás mecanismos de migración de agua en un medio heterogéneo.

Una vez resuelta la ec. 6, primero se evalúa teóricamente el valor de la derivada de la función (X') para cualquier valor deseado de la variable independiente (τ) como se muestra en la ec. 11.

$$\left. \left(\frac{dX^*}{d\tau} \right)_{\text{Teórica}} \right|_{\tau = \tau_i} \quad (11)$$

Luego, se evalúa numéricamente la pendiente de la curva de secado experimental para el mismo instante de tiempo como se muestra en la ec. 12:

$$\left. \left(\frac{dX^*}{dt} \right)_{\text{Experimental}} \right|_{t = t_i} \quad (12)$$

Por último, se comparan los valores de estas pendientes para determinar la difusividad efectiva como se observa en la ec. 13:

$$D_e = \frac{\left. \left(\frac{dX^*}{dt} \right)_{\text{Experimental}} \right|_{t = t_i}}{\left. \left(\frac{dX^*}{d\tau} \right)_{\text{Teórica}} \right|_{\tau = \tau_i}} \times d^2 \quad (13)$$

Donde:

D_e = difusividad efectiva, m^2/s

d = espesor del filete, m

Al aplicar sucesivamente este método se establece una relación entre la difusividad efectiva y el contenido de humedad del alimento.

4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

MATERIA PRIMA

Se utilizaron 50 kg de filete de cazón seco-salado, adquiridos en el comercio local.

INSTRUMENTACIÓN

Balanza granataria marca Ohaus, con capacidad de 2610 g y con subdivisiones de 0.1 g.

Termoanemómetro de hilo caliente marca Alnor modelo 8565, con rango de velocidades de 0.1 a 15 m/s y una precisión de ± 0.01 m/s.

Termómetros de mercurio marca Taylor, con rango de -35 a 50°C y resolución de 0.1°C.

EQUIPO DE LABORATORIO

Balanza analítica marca Sartorius, modelo 2432.

Estufa marca VWR, modelo 1350F.

Material y equipo general de laboratorio.

DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Para las pruebas de secado se utilizó un secador tipo túnel de laboratorio, construido por Gutiérrez y col.,(1992), el cual está constituido por las partes siguientes:

Sección de suministro de aire: Consta de un ventilador centrífugo, modelo 2C889 de 22.9 cm de diámetro, con aspas curvadas hacia atrás, acoplado a un motor eléctrico marca Dayton, modelo 6K872 de 373 W, el cual proporciona un flujo volumétrico de aire de 0.226 m³/s. El flujo de aire se controla restringiendo con una puerta corrediza la entrada del ventilador.

Sección de calentamiento: En el interior de la sección de calentamiento se instalaron nueve resistencias eléctricas, con una separación entre ellas de 10 cm. Cuatro de ellas fueron conectadas de forma independiente a 220 V y cinco a 110 V con un controlador de potencia adicional. En total se genera una potencia de 9.1 kW, con la cual se logra un incremento de 30°C en la temperatura del máximo flujo de aire.

Sección de homogeneización: La sección de homogeneización mide 40 cm de largo, 42 cm de ancho y 21 cm de altura. En su interior se colocaron, en la dirección del flujo de aire, primero tubos de vidrio de 10 cm de largo y 0.35 cm de diámetro, seguidos de tubos de plástico de 30 cm de largo y 0.6 cm de

diámetro hasta llenar su contenido. Se logra así una cierta homogeneización del perfil de velocidades del flujo, y se inhibe la turbulencia.

Sección de secado: La sección de secado mide 94 cm de largo, 42 cm de ancho y 21 cm de altura. La capacidad máxima aproximada del secador es de 9 kg de producto. Esta depende de la densidad y de la geometría que presente el producto a secar.

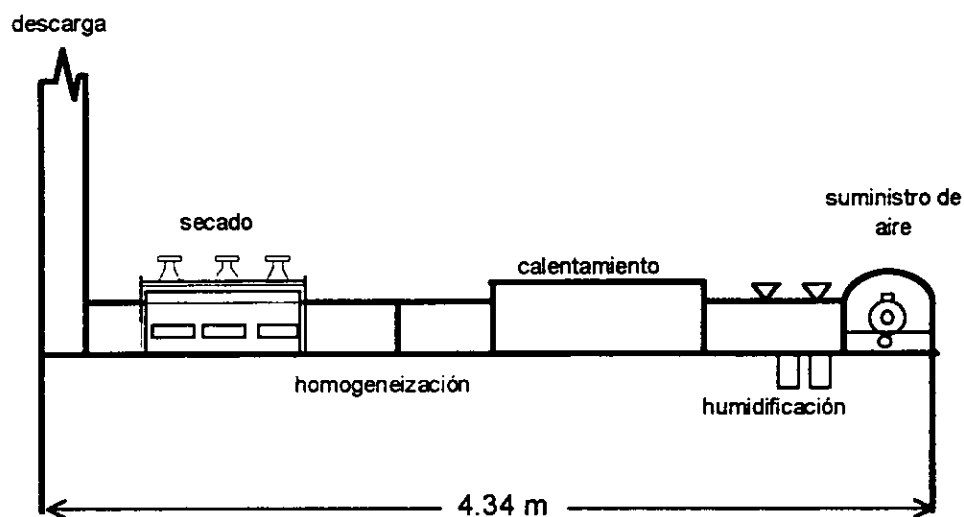


Figura 2. Secador experimental tipo túnel.

MÉTODOS

PROCESOS DE ACONDICIONAMIENTO DEL CAZÓN

Para cada prueba de secado se utilizaron aproximadamente 0.88 kg de cazón salado, adquirido en el comercio local. Las muestras se lavaron con agua corriente durante 5 min para quitar el exceso de sal superficial, y luego se procedió al drenado de los filetes sobre una malla de acero inoxidable durante 20 minutos a la sombra. Posteriormente, se cortaron porciones cuadradas de aproximadamente 0.1 x 0.1 x .010 m por lado. De esta manera los filetes quedaron listos para las pruebas de secado.

PRUEBAS DE SECADO

Se distribuyó aproximadamente 0.88 kg de muestra en un estante de acero inoxidable. Después de ajustar las condiciones de operación del secador, el estante se colocó en el interior de la sección de secado, se registró a tiempos determinados su peso y se midieron a la entrada y salida del estante de la sección de secado el promedio de velocidad del aire, la humedad relativa y la temperatura del aire. La prueba terminó cuando la humedad del producto en base húmeda llegó a un valor aproximadamente constante. En estas pruebas se modificó la temperatura promedio, con incrementos de cinco grados para cada

prueba, de 30 a 50 °C; la velocidad promedio del aire se mantuvo constante en 1.05 m/s.

Al término de cada prueba se calculó la humedad inicial del filete y los sólidos secos, y se introdujo la muestra en una estufa de aire previamente ajustada a 105°C. Se mantuvo constante las temperaturas de la estufa por espacio de 4 horas. Al término de este lapso se registró su peso final.

MEDICIONES EN LAS PRUEBAS DE SECADO

Durante las pruebas de secado se realizaron las siguientes mediciones:

1) Temperatura de bulbo seco. La medición de la temperatura de bulbo seco del aire se realizó al inicio de cada prueba, cada tres minutos durante la primera hora; posteriormente, el tiempo entre mediciones se incrementa a cinco, quince, treinta minutos y una hora conforme la muestra perdía humedad. Se utilizaron dos termómetros, instalados a la entrada de la sección transversal de la cámara de secado y a la salida del mismo. En las figs. 3 y 4 se presenta en esquemas los puntos en los que se hicieron las mediciones.

Vista de Planta

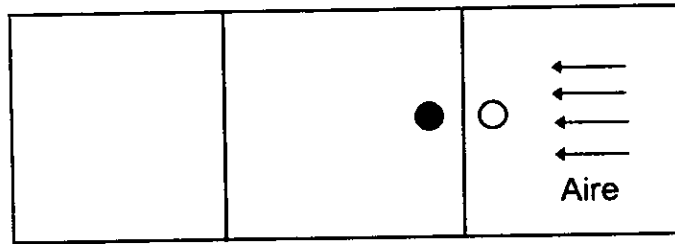


Figura 3. Cámara de secado

- = termoanemómetro
- = termómetro de mercurio

Vista de Frente

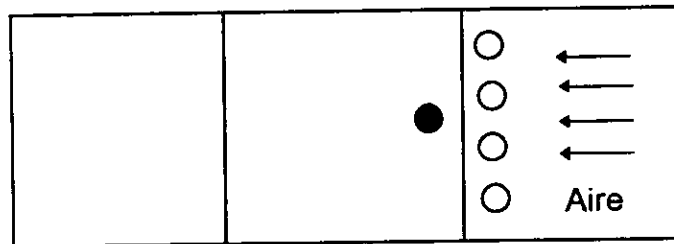


Figura 4. Cámara de secado

- = termoanemómetro
- = termómetro de mercurio

2) Temperatura de bulbo húmedo. La medición de la temperatura de bulbo húmedo se realizó en los mismos intervalos de tiempo que la de bulbo seco. Para esto se utilizaron dos termómetros de mercurio, con escala de -35 a 50°C , los cuales fueron colocados de la misma forma como se colocaron los de bulbo seco con la variante que los primeros se instalaron en la entrada de la cámara de secado para medir la temperatura de bulbo húmedo del ambiente.

3) Velocidad del aire. La velocidad del aire fue medida en la descarga de la sección transversal de la cámara de secado, al inicio de cada prueba, mediante un termoanemómetro de hilo caliente. En las figs. 3 y 4 se presenta un esquema donde se indican los puntos de medición de la velocidad del aire en el ducto de salida del secador.

4) Humedad relativa del aire. La medición de la humedad relativa del aire se realizó en los mismos intervalos de tiempo en que se tomaron las lecturas de pérdida de humedad y las temperaturas de bulbo seco y húmedo. Con los datos experimentales así obtenidos, se procedió a determinar la masa total de la muestra, masa de agua, sólidos secos, humedad en base seca y masa adimensional. Los valores anteriores son necesarios para determinar la difusividad efectiva.

5. RESULTADOS

En las figs. 5 a 8 se muestra la evolución del contenido de humedad en base seca en función del tiempo, para diferentes condiciones de secado. También se muestra en las figs. 5 a 8 la evolución de la humedad hasta llegar a una humedad comercial de aproximadamente 35% base húmeda representada por una línea horizontal.

3) Velocidad del aire. La velocidad del aire fue medida en la descarga de la sección transversal de la cámara de secado, al inicio de cada prueba, mediante un termoanemómetro de hilo caliente. En las figs. 3 y 4 se presenta un esquema donde se indican los puntos de medición de la velocidad del aire en el ducto de salida del secador.

4) Humedad relativa del aire. La medición de la humedad relativa del aire se realizó en los mismos intervalos de tiempo en que se tomaron las lecturas de pérdida de humedad y las temperaturas de bulbo seco y húmedo. Con los datos experimentales así obtenidos, se procedió a determinar la masa total de la muestra, masa de agua, sólidos secos, humedad en base seca y masa adimensional. Los valores anteriores son necesarios para determinar la difusividad efectiva.

5. RESULTADOS

En las figs. 5 a 8 se muestra la evolución del contenido de humedad en base seca en función del tiempo, para diferentes condiciones de secado. También se muestra en las figs. 5 a 8 la evolución de la humedad hasta llegar a una humedad comercial de aproximadamente 35% base húmeda representada por una línea horizontal.

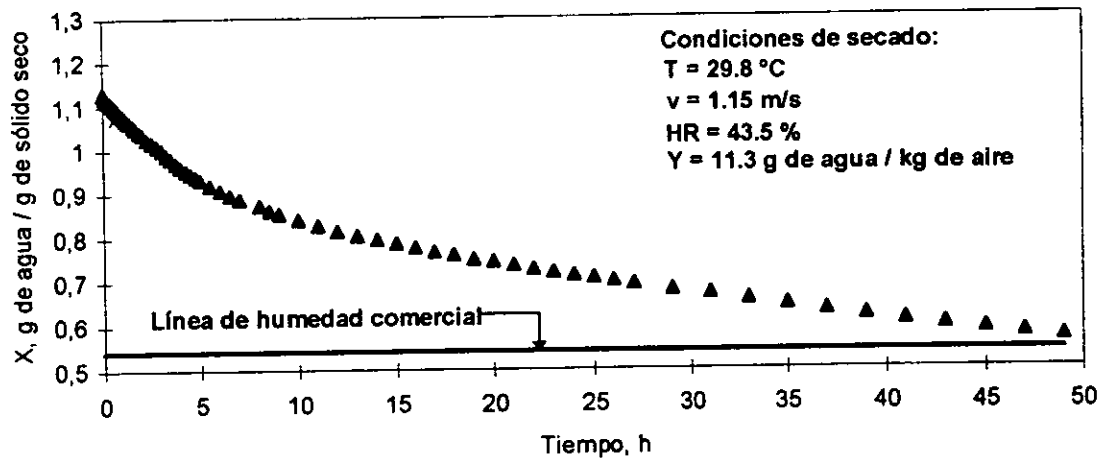


Fig. 5. Evolución del contenido de humedad en base seca con respecto al tiempo para una temperatura de 29.8°C .

Tomando como referencia esta línea horizontal, se puede observar que al incrementar la temperatura del aire se reduce el tiempo de secado. Así, se tiene que al aumentar la temperatura de 29.8°C a 34.95°C el tiempo de secado se reduce de 49 h a 40 h. Este efecto de reducción es cada vez menor al aumentar la temperatura. Como ejemplo, al incrementar de 40.7°C a 44.6°C se reduce el tiempo de secado en 16 h, en tanto que un nuevo incremento a 50°C aumentaría el tiempo de secado, como consecuencia de la formación de costra en la superficie del filete que impide la migración de la humedad del interior del producto a la superficie.

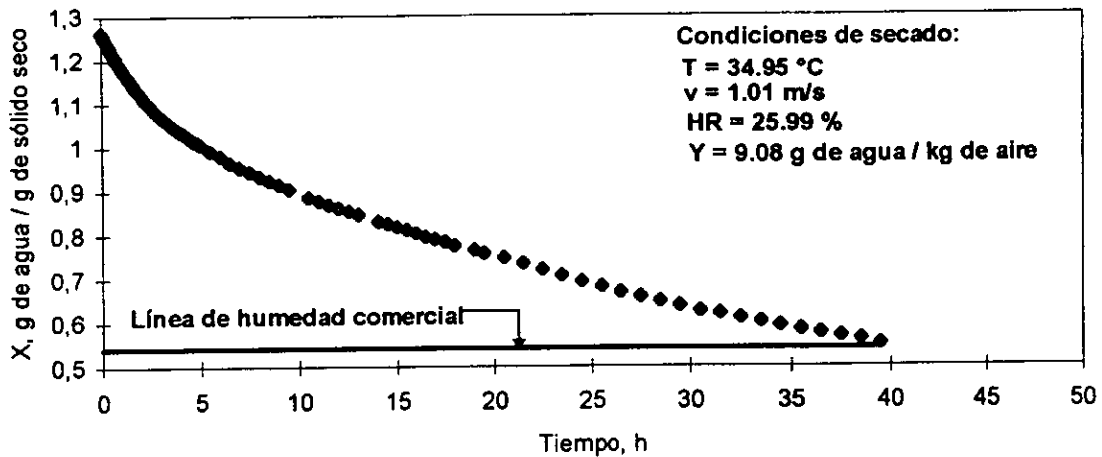


Fig. 6. Evolución del contenido de humedad en base seca con respecto al tiempo para 34.95°C .

En estas pruebas las humedades iniciales fueron aproximadamente iguales. Se puede observar también un comportamiento exponencial en las cuatro pruebas.

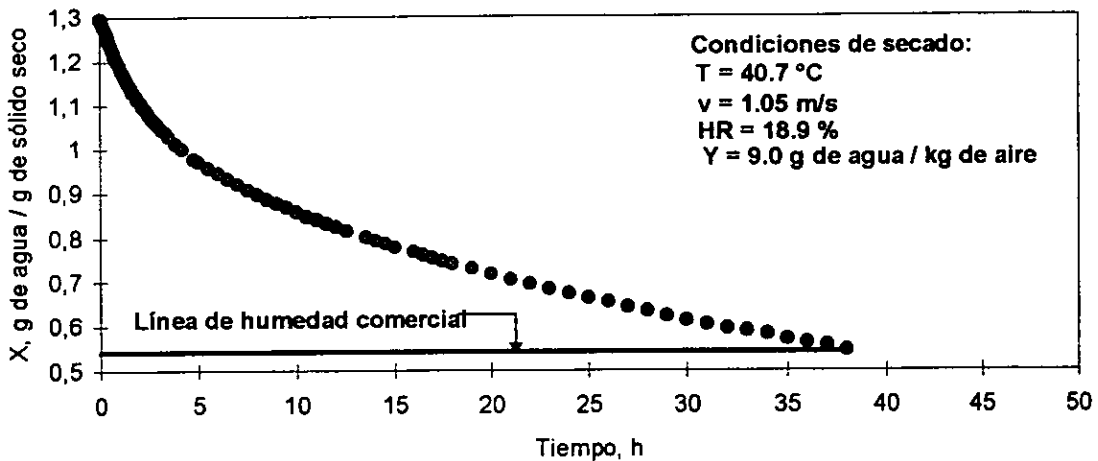


Fig. 7. Evolución del contenido de humedad en base seca con respecto al tiempo para 40.7°C .

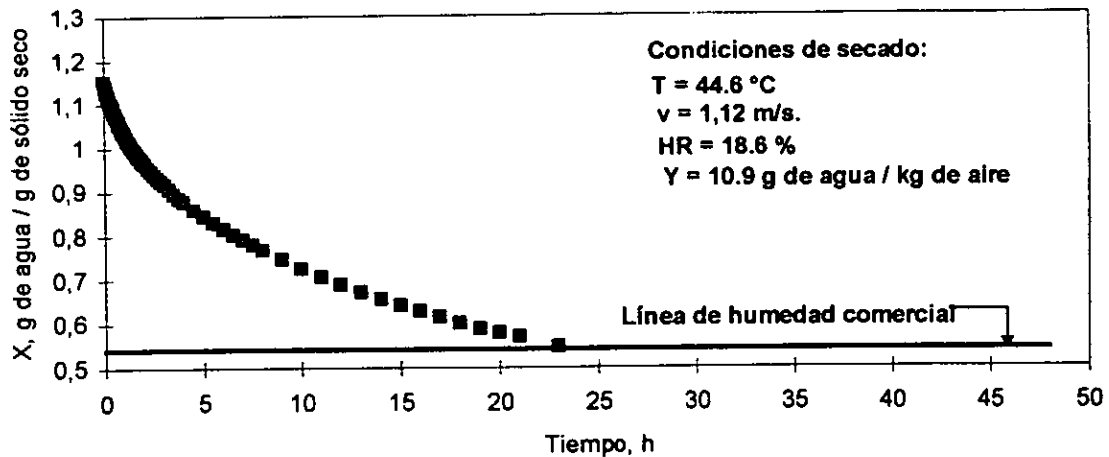


Fig. 8. Evolución del contenido de humedad en base seca con respecto al tiempo para 44.6 °C.

Para las cuatro pruebas se construyeron intervalos de predicción con un nivel de confianza del 95% para el logaritmo natural de las difusividades en función de la humedad adimensional.

En las figs. 9 a 12 se ilustran los intervalos de confianza, comparándose con los valores de la variable de predicción. Se grafican la recta estimada de regresión y los límites superior e inferior de cada intervalo.

En la fig. 9, obtenida para una temperatura de 30°C, se observa que los límites superior e inferior forman dos rectas paralelas con respecto a la recta de regresión. Se estima que los resultados de la predicción ($\ln D$) son confiables

(es decir, la varianza es pequeña) a lo largo de los anchos de banda. Para esta prueba, en particular, tres valores quedaron fuera del intervalo de predicción.

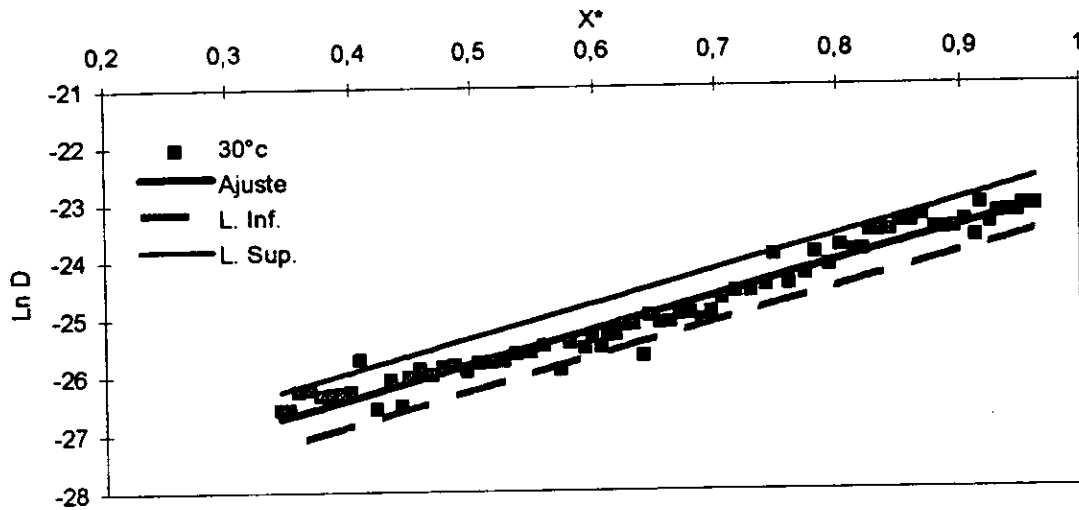


Fig. 9. Intervalo de predicción con un nivel de confianza del 95%, con ajuste de los datos experimentales.

En la fig. 10, se realizó el mismo procedimiento para el experimento a 35°C , observándose que dos valores caen fuera del 95% del intervalo de predicción. Se observa el mismo comportamiento que en la prueba anterior, pero los límites superior e inferior, al igual que la recta de regresión estimada, presentan una pendiente mayor debido al efecto de la temperatura sobre la difusividad.

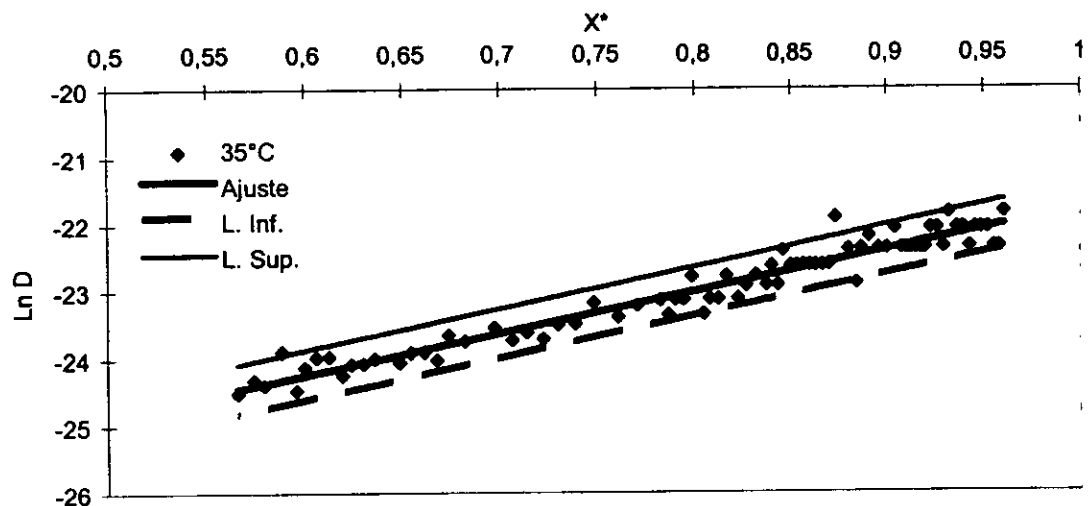


Fig. 10. Intervalo de predicción con un nivel de confianza de 95% con ajuste de los datos experimentales.

En la fig. 11, que corresponde a 40°C , se observa que hay un valor que cae fuera del intervalo de predicción, teniendo similar comportamiento que las pruebas anteriores con la diferencia que sus límites superior e inferior junto con la recta de regresión estimada tienen una pendiente más pronunciada debido también al efecto de la temperatura.

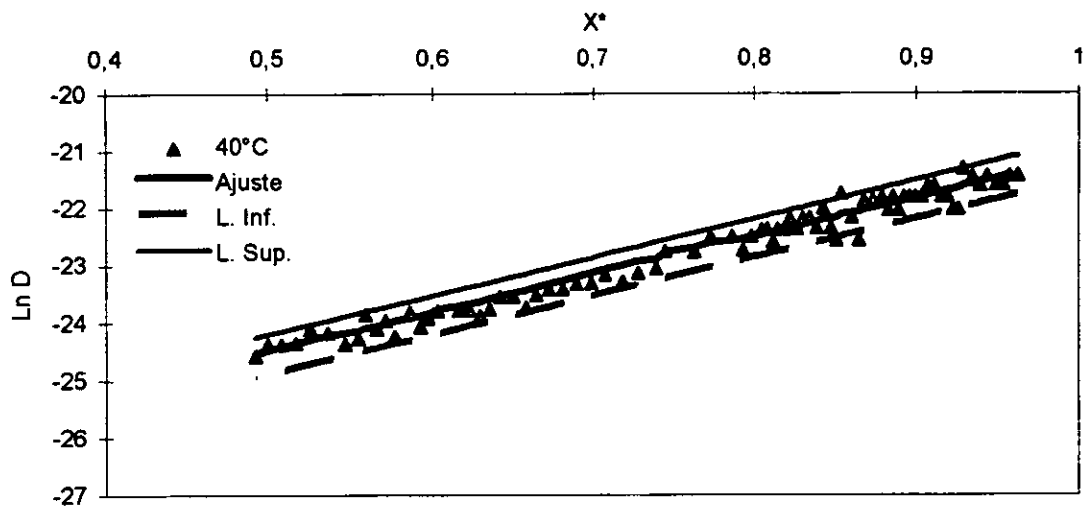


Fig. 11. Intervalo de predicción con un nivel de confianza de 95% con ajuste a los datos experimentales.

En la fig. 12, para la prueba de 45°C, se observan dos valores dispersos por fuera de los intervalos establecidos, con el mismo comportamiento de las pruebas descritas anteriormente, y se presenta una pendiente más pronunciada que la de las tres pruebas descritas anteriormente. Sin embargo, se observa una reducción en el ancho de los intervalos de predicción debido al mayor número de datos experimentales registrados, lo que permite una mayor confiabilidad en la predicción de los valores esperados.

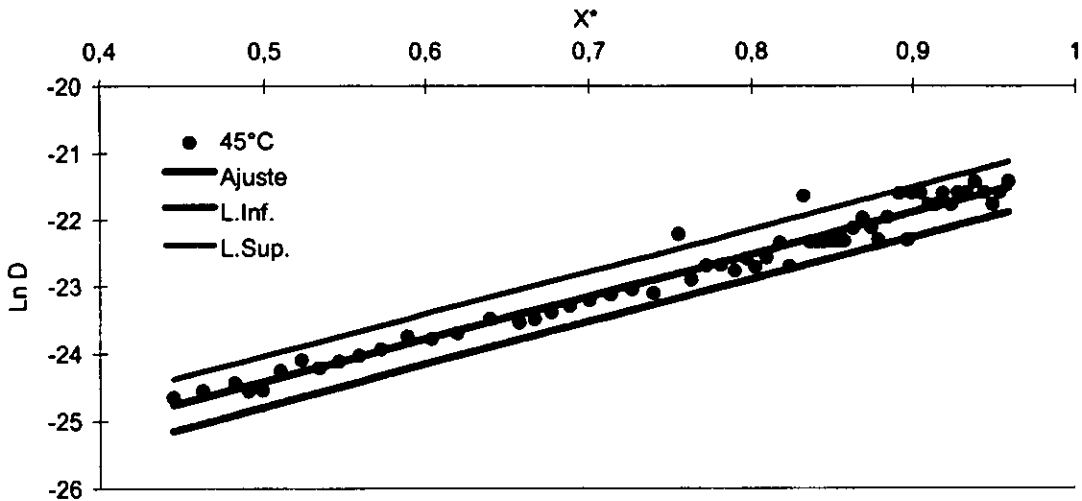


Fig. 12. Intervalo de predicción con un nivel de confianza de 95% con ajuste a los datos experimentales.

En la fig. 13, se presenta una familia de rectas de regresión estimadas de los logaritmos naturales de las difusividades en función del contenido de humedad adimensional, que tienen como parámetro la temperatura. Se observa que a mayor temperatura mayor es el ángulo de inclinación que se presenta en las rectas y mayores son los valores del LnD para una misma humedad; no obstante, este efecto parece ser cada vez menor al aumentar la temperatura de 35°C a 40°C al igual que de 40°C a 45°C, lo que indica de alguna manera que el comportamiento de la difusividad es el mismo de 40°C a 45°C. Esto último indica que secar a temperaturas por arriba de 40°C no es significativamente más efectivo, con la desventaja de que se incrementan los tiempos de secado y se altera el valor nutricional del producto.

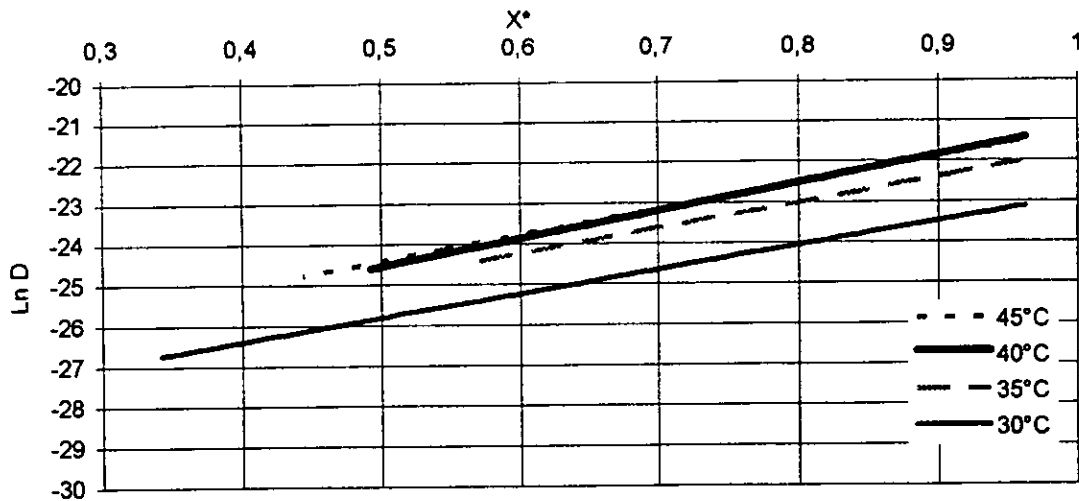


Fig. 13. Líneas de ajuste de los logaritmos de la difusividad con respecto a la humedad, con la temperatura como parámetro.

A cada una de las rectas de regresión estimadas se les calculó el coeficiente de correlación lineal como se muestra en la tabla 1, en la que se obtiene un valor promedio de 0.9802, lo que confirma que la relación (LnD) es lineal con la humedad. Por tanto, se puede construir una expresión $\text{LnD}(X, T)$.

Tabla 1.

Temperatura, °C	r
30	.9813
35	.9713
40	.9858
45	.9824

6 CONCLUSIONES

Las conclusiones del presente trabajo son:

- La difusividad no es constante, pues depende de la temperatura y del contenido de humedad del alimento. La transferencia de masa es más rápida a altas temperaturas, por lo que se concluye que la difusividad del agua en los procesos estudiados en este trabajo aumenta con la temperatura.
- Existe una relación lineal entre el logaritmo natural de la difusividad efectiva y el contenido de humedad del alimento.

7 RECOMENDACIONES

Las recomendaciones que se sugieren para una investigación futura son las siguientes:

- Realizar pruebas experimentales cuando se hace variar el espesor del filete para determinar la importancia de esta variable.
- Establecer una relación de la difusividad efectiva en función del contenido de humedad del alimento y la temperatura del aire de secado, para resolver numéricamente el modelo resultante y de esta manera predecir la evolución del contenido de humedad.
- Buscar un método para resolver analíticamente la segunda ley de Fick cuando la difusividad es variable.

BIBLIOGRAFÍA

Anderson, C. L. y R. K. Pederson. 1950. The Preservation of Fish by Smoking and Drying. En: Marine Products of Commerce, Ed. por D. K. Tressler y J. Mc W. Lemon. New York, Reinhold Publishing Corporation.

Bressan. J. A., P., Merson, R. L. y I. W. Dunkley. Temperature Dependence of Effective Diffusion Coefficient for Total Solids During Washing of Cheese Curd. Journal of Food Science volume 46 (1981). 1958-1959.

Camu, C. C., Guevara G. y P. Z. Distor. 1983. Dehydration Procedures for Mackerel (*Pneumatophorus japonicus*). FAO Fish. Rep., 279: 85-92.

Corry, J. E. L. 1975. The Effect of Water Activity on the Heat Resistance of Bacteria. En: Water Relations of Food. Ed. por R. B. Ducworth. London, Academic Press.

Crank, J. 1978. The Mathematics of Diffusion, 2nd de.; Pergamon Press: Oxford, England.

Curran, C. A. y D. S. Trim. 1983. Comparative Study of Solar Sun Drying of Fish. FAO Fish. Rep. , 268: 146-158.

Doe, P. E., Poulter, R. G. y C. A. Curran. 1982. Determination of Water Activity and Shelf-Life of Salted Dried Fish from Moisture and Salt Content Measurements. FAO Fish. Rep., 268: 113-120.

Doe, P. E., Curran C. A. y R. G. Poulter. 1983. Determination of the Water Activity and Shelf Life of Dried Fish Products. FAO Fish. Rep., 279: 202-208.

Gutiérrez, M. F., Chagoyán, S. J. Rodríguez, M. J. A., Alba, H. M. C. y G. R. Talavera. 1992. Calentamiento de Aire en Captadores Solares Inflables Acoplados a Almacenes de Calor Tipo Lecho de Rocas. Informe Técnico de Avance elaborado por el Instituto de Ingeniería, UNAM, para CONACYT.

Jason. A. C. Effects of Fat Content on Diffusion of Water in Fish Muscle. J. Sci. Fd agric., 1965, vol. 16. 281-288.

Lewis M. J. 1987. Physical Properties of Food and Food Processing Systems. Ed. por E. Horwood Ltd, England.

Marvin R. Okos, J. Bruce L. Moisture Diffusivity in Pasta During Drying. American Society of Agricultural Engineers. 1986. Ganesan Narsimhan, Rakesh K. Singh, and A.C. Wetnaver. Food Dehydration.

Mat. A. A. 1983. Standars for Dried Fish. FAO Fish. Rep., 279: 185-193.

Rotstein, E. 1987. The Prediction of Diffusivities and Diffusion Related Transport Properties in the Drying of Cellular Foods. In Physical Properties of Food -2; Jowitt, R., Escher, F., Kent, M., Mckenna, B., Roques, M., Eds.; Elsevier Applied Science: London. pp 131-145.

Troller, J. A. y J. H. Christian. 1978. Water Activity and Food. London, Academic Press.

Vagenas. G. K. y V. T. Karathanos. 1991. Prediction of Moisture Diffusivity in Granular Materials, with Special Applications to Foods. Department of Food Science, Rutgers University, the State University of New Jersey.

Vagenas. G. K. y V. T. Karathanos. 1991. Wather Diffusivity in Starches at High Temperatures and Pressures. Department of Food Science, Rutgers University, the State University of New Jersey.

Vrentas, J. S., y J. L. Duda. 1979. Molecular Difussion in Polymer Solutions. AIChE J. 25, 1.