

## Tesis de Posgrado

# Transferencia de masa y calor durante la deshidratación de palta en corriente de aire

Alzamora, Stella Maris

1980

Tesis presentada para obtener el grado de Doctor en Ciencias Químicas de la Universidad de Buenos Aires

Este documento forma parte de la colección de tesis doctorales y de maestría de la Biblioteca Central Dr. Luis Federico Leloir, disponible en [digital.bl.fcen.uba.ar](http://digital.bl.fcen.uba.ar). Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.

This document is part of the doctoral theses collection of the Central Library Dr. Luis Federico Leloir, available in [digital.bl.fcen.uba.ar](http://digital.bl.fcen.uba.ar). It should be used accompanied by the corresponding citation acknowledging the source.

**Cita tipo APA:**

Alzamora, Stella Maris. (1980). Transferencia de masa y calor durante la deshidratación de palta en corriente de aire. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. [http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis\\_1620\\_Alzamora.pdf](http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_1620_Alzamora.pdf)

**Cita tipo Chicago:**

Alzamora, Stella Maris. "Transferencia de masa y calor durante la deshidratación de palta en corriente de aire". Tesis de Doctor. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 1980. [http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis\\_1620\\_Alzamora.pdf](http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_1620_Alzamora.pdf)

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR DURANTE LA DESHIDRATACION  
DE PALTA EN CORRIENTE DE AIRE

Tesis presentada por  
STELLA MARIS ALZAMORA  
para optar al título de Doctor en Química,  
orientación Química Industrial.

Director de tesis: Dr. Jorge Chirife

- 1.980 -

1 6 2 4 1 1 1  
Ej: 2

## AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Jorge Chirife, por su dirección y apoyo incondicional en la concreción de este trabajo.

Al Ing. Pascual Enrique Viollaz y al Dr. Luis María Vaccarezza, por sus aportes durante el desarrollo experimental y discusión de resultados.

A la Universidad de Buenos Aires, por permitir la realización de este trabajo y a la Secretaría de Estado de Ciencia y Técnica, por la financiación parcial del mismo ( Programa Nacional de Tecnología de Alimentos ).

## INDICE

	página
I - INTRODUCCION.	4
II - OBJETIVO DEL TRABAJO.	15
III - PARTE EXPERIMENTAL.	17
III-1 Equipo de secado.	17
III-2 Material utilizado.	18
III-3 Preparación del material.	20
III-4 Determinación de las curvas de secado.	20
III-5 Determinación de la evolución de la temperatura durante el secado.	22
III-6 Determinación del contenido de aceite de la pulpa de palta.	22
III-7 Métodos de pretratamientos.	
III-7-1 Escaldado en agua.	23
III-7-2 Escaldado en vapor.	23
III-7-3 Congelado-descongelado.	24
III-8 Preparación del modelo artificial.	24
IV - RESULTADOS Y DISCUSION.	
IV -1 Factores que afectan la cinética de deshidratación de la palta. Análisis convencional de los datos en base al fenómeno de transfe-	

	cia de masa.	26
IV -1-1	Aspecto general de las curvas de secado.	26
IV -1-2	Tratamiento convencional de los datos de secado.	35
IV -1-3	Efecto de la temperatura del aire,	38
IV -1-4	Efecto del espesor inicial de la muestra.	43
IV -1-5	Efecto de los pretratamientos.	43
IV -1-6	Efecto del contenido de aceite.	53
IV -1-7	Comparación de los coeficientes efectivos de difusión del agua en el secado de palta y de otros alimentos.	58
IV -2	Efecto de la transferencia de calor en la cinética de deshidratación.	63
IV -2-1	Introducción.	63
IV -2-2	Desarrollo del modelo.	65
IV -2-3	Predicción de la evolución de la temperatura y estimación de los gradientes internos.	67
IV -2-4	Análisis de los datos de secado en base a la transferencia simultánea de calor y masa.	72

IV -2-5	Conclusiones.	77
V	- PREDICCION DE LA EVOLUCION DE LA TEMPERATURA DURANTE LA DESHIDRATACION DE VEGETALES EN CORRIENTE DE AIRE.	78
V -1	Introducción.	78
V -2	Predicción de la evolución de la temperatura. Límites de aplicabilidad del modelo.	79
V -3	Análisis de la influencia del valor de las propiedades térmicas en la predicción de la temperatura.	83
V -4	Conclusiones.	90
VI	- CONCLUSIONES GENERALES.	92
VII	- APENDICES.	93
VIII	- NOMENCLATURA.	96
IX	- REFERENCIAS.	99
X	- TABLAS DE DATOS.	106

## I - INTRODUCCION

No es fácil plantear un modelo de transferencia de calor y masa en el secado de materiales porosos. El agua puede migrar por mecanismos diferentes dentro del sólido, dependiendo de la naturaleza del material, el contenido de humedad, la forma de unión del agua al mismo, la temperatura y presión en los poros, etc. Los distintos mecanismos reportados en la literatura han sido sintetizados por Van Arsdel (1.963):

a) movimiento de agua líquida debido a fuerzas capilares.

b) difusión de agua líquida debido a diferencias de concentración.

c) difusión superficial de agua en las capas líquidas adsorbidas en la superficie de los poros.

d) difusión de vapor de agua en los poros parcialmente llenos de aire debido a una diferencia en las presiones parciales (o secuencia de vaporización-condensación).

e) flujo de vapor de agua debido a diferencias en la presión total, generadas por contracción del material o por la existencia de temperaturas internas muy superiores al punto de ebullición.

f) flujo de agua líquida por gravedad.

Estos mecanismos de transferencia de humedad pueden ocurrir simultáneamente. Muchos autores, con el fin de simplificar el tratamiento matemático y no siempre correctamente, han tratado de explicar el fenómeno de secado poniendo énfasis en un mecanismo en particular e ignorando los demás.

Las primeras teorías sobre el tema no tuvieron en cuenta el efecto de transferencia de calor y pusieron el acento en los fenómenos de difusión de agua líquida y de capilaridad. Sherwood (1.929 a), considerando que la difusión es el mecanismo a través del cual el agua migra desde el interior a la superficie del material, postuló que el secado puede ocurrir por difusión interna del líquido seguida por vaporización superficial o por vaporización interna y migración del vapor hacia la superficie y de allí al aire ambiente. Utilizó la ecuación de Fourier de conducción de calor en sólidos para analizar el secado de placas por difusión de agua líquida con control interno y aplicó el modelo a los datos de secado de madera y arcilla.

Estudió también (Sherwood, 1.929 b) que el proceso de secado involucra generalmente una fase inicial donde la velocidad de secado es constante y otra posterior donde la misma disminuye en el tiempo. Esta última puede dividirse en dos zonas distintivas según el mecanismo de secado involucrado: en la pri-

mera la disminución de la velocidad de secado se produce porque el área mojada disminuye; en la segunda, la velocidad de secado está controlada por la difusión interna de agua. Planteó que, si bien en este último caso, el plano de evaporación tiende a avanzar desde la superficie hacia el interior del sólido, el hecho de que la evaporación sea interna o superficial depende de la porosidad del material.

Encontró que durante el período constante la distribución de humedad puede representarse por una función parabólica de la distancia a la superficie y halló una ecuación para el secado con control difusional interno cuando la distribución inicial de humedad responde a una ley de este tipo (Sherwood, 1.932).

Ceaglske y Hougen (1.937) investigaron el mecanismo de secado en sólidos granulares, específicamente en arena. Hallaron que la teoría de difusión predice distribuciones de humedad erróneas y concluyeron que la velocidad de flujo de agua está determinada por fuerzas capilares. En los últimos años la teoría capilar ha sido postulada en los trabajos de Kisakurek y col. (1.975) y de Kisakurek y col. (1.978). Los primeros obtuvieron curvas generalizadas de secado cuya finalidad era predecir el tiempo de secado en el período decreciente, conociendo los siguientes parámetros: temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo

del aire, área superficial de la partícula, contenido de humedad crítico y coeficiente de transferencia de calor. Aplicaron su modelo al secado de partículas de yeso de diferentes tamaños en un secador rotatorio con bastante éxito.

Los segundos desarrollaron un modelo de flujo capilar puramente teórico a partir de la resolución por métodos numéricos de la ecuación de transferencia de masa y chequearon su validez con datos experimentales de secado de cerámica. Llegaron a la conclusión que el mecanismo de secado en el período decreciente en sólidos porosos es muy complejo, predominando el mecanismo por flujo capilar en los primeros tiempos del secado mientras que el mecanismo por flujo difusional conjuntamente con la posibilidad de evaporación interna pueden ser importantes al final del proceso.

Una teoría más sofisticada desarrolló Harmathy (1.969), teniendo en cuenta la transferencia simultánea de masa y calor. Basándose en los datos de equilibrio líquido-vapor y en las correspondientes ecuaciones de transferencia, planteó un sistema de ecuaciones diferenciales cuya resolución permite obtener la evolución de la humedad y de la temperatura y la presión del sistema en el período decreciente, considerando que el mecanismo controlante es el de evaporación-condensación.

En las últimas dos décadas se han usado los métodos

de la termodinámica irreversible para describir la transferencia de calor y masa en medios porosos, si bien estas teorías no han sido avaladas por suficientes trabajos experimentales. Luikov (1.961) planteó que la transferencia de humedad se debe a dos aportes: uno, causado por la fuerza impulsora de transferencia de agua, definida en forma tal de englobar la mayoría de los mecanismos antes mencionados y caracterizada por un coeficiente efectivo de difusión y otro, debido a un gradiente de temperatura, caracterizado por un coeficiente de termogradiente.

Los conceptos anteriores no se han aplicado intensivamente en el secado de materiales biológicos, en especial alimentos, aunque muchos de los fenómenos que ocurren en la deshidratación de éstos son esencialmente los mismos en ambos casos. Pero deben tenerse en cuenta, además, otros aspectos diferentes, que generalmente complican el tratamiento matemático:

a) los alimentos son básicamente sistemas celulares. Si bien las células son todas muy similares en su naturaleza, los tejidos pueden diferir en su porosidad y propiedades físicas. Esto lleva a la necesidad de enfocar un alimento específico para verificar un modelo.

b) los alimentos pueden ser considerados como un sistema complejo de multicomponentes. Sus propiedades difusivas estarán determinadas por las características individuales de difu-

si3n de sus constituyentes (l3pidos, prote3nas coaguladas, pectinas, az3cares amorfas o cristalinas, almid3n, etc). Cada uno de 3stos puede exhibir un cambio neto en sus propiedades a un dado contenido de humedad, pero el efecto combinado del conjunto puede ser ventajoso en el sentido de originar un cambio m3s gradual de las mismas.

c) a diferencia de lo que sucede en s3lidos inorg3nicos, el agua est3 unida al alimento a trav3s de las interacciones con las macromol3culas que lo constituyen, contribuyendo a la estructura del mismo y controlando sus propiedades f3sicas, qu3micas y sensoriales.

d) los materiales biol3gicos pueden sufrir una contracci3n notable durante el secado. Como en general las ecuaciones est3ndares se aplican a sistemas cuyo volumen es fijo, esto puede conducir a discrepancias entre los valores te3ricos y los experimentales. Para contabilizar este hecho debe referirse el contenido de humedad a una base seca en vez de expresarse como una concentraci3n volum3trica (Hartley y Crank, 1.949).

e) durante la deshidrataci3n los alimentos est3n sujetos a una serie de efectos adversos que pueden alterar la cin3tica de secado:

i. p3rdida de materiales y migraci3n de solutos.

ii. cambios f3sicos (de estructura, densidad, permeabilidad, esta-

do de agregación: fusión, disolución, cristalización).

iii. destrucción físico-química de membranas celulares (lo que conduce a la pérdida de sólidos y de turgencia).

iv. reacciones químicas de degradación (pardeamiento enzimático y no enzimático, destrucción de vitaminas, oxidación de lípidos, desnaturalización de proteínas, gelificación de almidón, cross-linking de polímeros, etc).

Usualmente se ha analizado el secado de materiales biológicos a la luz de un mecanismo difusivo, siendo la fuerza impulsora o bien un gradiente de concentración de agua o bien un gradiente de presión de vapor.

Basándose en estas suposiciones, Chen y Johnson (1.969 a) elaboraron una teoría que conduce a dos ecuaciones que describen todo el proceso de secado. Considerando que el flujo de líquido es representativo del secado a humedades mayores que el máximo contenido de humedad higroscópico, derivaron la expresión:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D \nabla^2 w \quad , \quad \text{con } D \neq D(w)$$

Para valores de humedad menores, la teoría postula que existe flujo de líquido y de vapor en el interior del alimento y la ecuación resultante es:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D \nabla^2 w + \frac{\partial D}{\partial w} (\nabla \cdot w)^2$$

donde  $D$  es un coeficiente de difusión compuesto (para el flujo de líquido y vapor) y depende en este caso de la humedad, lo cual justifica la no linealidad de los datos observada en el último período de secado. Posteriormente (Chen y Johnson, 1.969 b) aplicaron el modelo al secado de hojas de tabaco.

Becker y Sallans (1.955) usaron la solución standard de la ecuación de difusión en estado no estacionario para esferas en el tratamiento matemático del proceso de secado de granos de trigo, hallando que el coeficiente de difusión es independiente del contenido de humedad en todo el rango práctico de humedades (12 á 30%) y encontrando para el mismo una dependencia de tipo Arrhenius con la temperatura.

Vaccarezza y col. (1.974 a) analizaron el efecto de varias variables en el secado de remolacha azucarera y aplicaron la solución de la ecuación de Fick con coeficiente de difusión constante para analizar los resultados experimentales de la fase inicial del período de velocidad de secado decreciente. Encontraron que dicha ley puede usarse para predecir tiempos de secado y distribución interna de humedades, independientemente de cuál sea el mecanismo de transporte de agua en el alimento.

Musain, Chen y Clayton (1.973) consideraron la transferencia simultánea de calor y masa en el alimento. Partiendo de las ecuaciones de Luikov que describen el secado en sólidos porosos y suponiendo que:

- i . la difusión es el mecanismo controlante del proceso.
- ii. la existencia de gradientes de temperatura.
- iii. el coeficiente de difusión variable con la concentración en forma exponencial.
- iv. encogimiento del arroz despreciable durante el proceso.
- v . material isotrópico.

simularon un modelo computacional que usaron para predecir la conducta de secado de arroz. Asimismo, investigaron el efecto de la difusión térmica de agua en materiales biológicos, hallando que la misma es despreciable a causa de la pequeña magnitud del coeficiente de termogradiente.

Vaccarezza y col. (1.974 b) analizaron el efecto de no tener en cuenta el transporte de calor en la solución de la ley de Fick y presentaron un modelo semiempírico que correlaciona la evolución de la temperatura y la humedad en el primer período de velocidad de secado decreciente, destacando la importancia práctica de conocer en forma simple la historia de la temperatura del alimento con miras a minimizar el deterioro del mismo.

King (1.968) estudió las formas de interacción de los

procesos de transferencia de masa y calor y cómo los mismos gobiernan las velocidades de adsorción y desorción de agua de alimentos deshidratados. El análisis se limitó a situaciones donde el mecanismo principal de transporte es la difusión de vapor y en los que el contenido de humedad corresponde a aquéllos en equilibrio con humedades relativas menores del 100%.

Rotstein y Cornish (1.978) enfatizaron la necesidad de que cualquier modelo de secado de alimentos tenga en cuenta la naturaleza heterogénea del tejido celular y las propiedades osmóticas de la célula, frente a los enfoques anteriores que se basaron en considerar al alimento como un sólido homogéneo a través del cual difunde el agua. Describieron las características de la estructura porosa de la manzana y las distintas etapas que debe recorrer el agua en el proceso de deshidratación: migración dentro de la célula, a través de la membrana, a través de la estructura porosa del tejido y finalmente a través de la capa externa. Demostraron que en este caso los dos primeros pasos no son controlantes y propusieron un modelo para la remoción de agua considerando que la misma migra como vapor a través de una fase de gas estanco constituida por aire. Los balances de masa y energía para dicho modelo se reducen a un sistema de dos ecuaciones diferenciales parciales en dos variables dependientes: humedad y temperatura, las cuales son función del tiempo y de la posición. Resolvieron dichas ecua-

ciones numéricamente, coincidiendo los valores de humedad calculados teóricamente con los resultados experimentales.

En muchos de estos trabajos, y en otros no mencionados sobre el tema de deshidratación de alimentos, se ha cometido el error de tratar de verificar las teorías postuladas en condiciones experimentales que no satisfacen las hipótesis planteadas. Frecuentemente, se han utilizado velocidades de aire muy bajas, con lo cual el control deja de ser interno y los coeficientes de difusión hallados como así también las energías de activación están afectados por la resistencia externa a la transferencia de masa. Tampoco se ha respetado en todos los casos la forma geométrica adoptada en el planteo del modelo.

A causa de estas falencias, y de los factores antes mencionados, el mecanismo de deshidratación de alimentos todavía no está bien dilucidado. Teniendo esto en cuenta, como así también la importancia de dicho proceso como medio de preservación, surge la necesidad de continuar el estudio de la cinética del secado de vegetales a fin de lograr un diseño racional del equipo y optimizar la calidad del producto final.

## II - OBJETIVO DEL TRABAJO

La finalidad específica de este trabajo es:

- a) obtener datos experimentales de la deshidratación de palta en corriente de aire.
- b) examinar la aplicabilidad de la ley de difusión de Fick en la interpretación matemática de la conducta empírica de secado.
- c) obtener los parámetros cinéticos del proceso.
- d) analizar la evolución de la temperatura de la muestra conjuntamente con la variación de humedad y tratar de predecir la relación temperatura-tiempo de secado con el fin de poder minimizar los fenómenos de deterioro del alimento, cuya cinética es función fundamentalmente de la temperatura y humedad.
- e) analizar la posibilidad de extender a otros alimentos los resultados obtenidos en el ítem d.

La elección del alimento se basó en los siguientes motivos:

- a) no existe en bibliografía datos cinéticos de secado de dicho vegetal. En parte esta ausencia puede deberse a que ningún producto alimenticio formulado en base a palta ha podido ser conservado hasta ahora exitosamente por un método que involucre tratamiento térmico, ya que la palta experimenta en las condi-

ciones ensayadas cambios irreversibles en sus características organolépticas, de los cuales el más notable y grave es el derivado del desarrollo de sabores amargos (Cruess y col., 1.951; Lime, 1.969; Lladser y col., 1.975).

Pero ensayos realizados en escala laboratorio han mostrado la factibilidad de obtener un producto deshidratado de cualidades organolépticas aceptables.

b) la palta presenta una composición química poco común en las frutas debido a su alto contenido de aceite, brindando un campo de investigación interesante en la consideración del mecanismo de migración del agua en emulsiones aceite-agua.

c) como finalidad secundaria, debe añadirse que uno de los procedimientos en la producción industrial de aceite de pulpa de palta consiste en la extracción de la pulpa previamente deshidratada.

### III - PARTE EXPERIMENTAL

#### III - 1 Equipo de secado

Se utilizó un secador tipo túnel convencional. El aire, impulsado por un ventilador centrífugo, entraba a una cámara de calentamiento constituida por una red de resistencias eléctricas, pasando luego por un lecho de pequeñas esferas de vidrio donde se obtenía un perfil uniforme de velocidad y temperatura. Posteriormente atravesaba la cámara de secado para escapar después al ambiente.

La temperatura de entrada a la cámara se regulaba en  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  mediante un termostato que comandaba a una de las resistencias. Dicha cámara estaba provista, además, de termómetros de bulbo seco y de bulbo húmedo, los cuales presentaban un error de lectura de  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ .

La velocidad del aire se medía con un termoanemómetro de hilo caliente, marca Wallac, modelo GGA235.

La muestra a tratar, sostenida por un marco metálico, se suspendía en la cámara de secado, fluyendo el aire paralelamente a sus caras. El peso de la misma se determinaba en una balanza analítica, marca Stanton, modelo CL41, con una precisión de  $\pm 0,0005$  g.

### III - 2 Material utilizado

Se trabajó fundamentalmente con pulpa de palta. También se realizaron algunas experiencias con papa, manzana, remolacha y remolacha azucarera.

#### Composición química de la palta

La composición química de la palta varía de acuerdo a la variedad, estado de madurez y estación.

Las composiciones de dos variedades diferentes se muestran en la tabla 1 (Chatfield y Adams, 1.940).

Puede observarse que uno de los aspectos distintivos de la composición química de la palta es su elevado contenido de aceite; de hecho, de todos los frutos sólo la oliva y el fruto del aceite de palma pueden rivalizar con la misma en lo que respecta a este factor.

El contenido de proteínas (hasta 2%) es también relativamente alto para frutas. Entre los azúcares, además de los comunes glucosa, fructosa y sacarosa, se encuentran algunos menos usuales, tales como perseitol, heptulosas y octulosa (Lewis, 1.978).

Bertoni y col. (1.967) han analizado paltas maduras de siete variedades comerciales cosechadas en la República Argentina y han encontrado que el contenido de aceite fluctúa entre 3,9 á 27,4% según la variedad considerada.

TABLA 1

	tipo mejicano		tipo guatemalteco	
	pulpa	semilla y piel	pulpa	semilla y piel
% parte analizada	80	20	70	30
composición química (g)				
hidratos de carbono	3,3		4	
proteínas	1,7		2	
grasas	26,3		17,2	
agua	65,4		74,1	
celulosa	1,8		1,4	
contenido mineral (mg)				
calcio	15			
fósforo	31			
hierro	0,53			
cobre	0,21			
cloruro de sodio	10			
sodio	16			
potasio	396			

Por otra parte, durante la maduración de la fruta se producen una serie de cambios en la composición de la misma, particularmente en las fracciones de aceite y de agua, alcanzando la primera su valor máximo en el punto de madurez y disminuyendo paralelamente el valor de la humedad.

### III - 3 Preparación del material

Los vegetales se cortaron en forma de placas aproximadamente cuadradas de espesores comprendidos entre 0,300 y 0,926 cm., mediante una cortadora manual de alimentos. El espesor se determinó en diferentes puntos de la muestra con un micrómetro a dial cuyo error de lectura era de  $\pm 0,01$  mm., usándose sólo aquellas muestras en las que el espesor no presentaba una variación superior al 6% de su valor promedio.

Los experimentos llevados a cabo para estudiar el efecto de una dada variable en la deshidratación de palta, a saber, temperatura del aire, espesor de la muestra, pretratamientos, etc., se realizaron con muestras obtenidas de un mismo fruto, de forma tal de minimizar en lo posible la influencia de las variaciones biológicas (principalmente el contenido de aceite) del material.

### III - 4 Determinación de las curvas de secado

Las curvas de secado se obtuvieron registrando el pe-

so de las muestras en función del tiempo.

Para realizar la pesada (que insumía sesenta segundos) se sacaba la muestra de la cámara de secado y se pesaba en la balanza analítica adosada al secador. Con el objetivo de analizar el error introducido por esta interrupción del proceso, se realizaron corridas en condiciones similares (muestras del mismo fruto y espesor e igualdad de temperatura y velocidad de aire) pero tomando el peso a distintos intervalos de tiempo, no observándose diferencias entre las mismas.

Todas las experiencias se llevaron a cabo a una velocidad de aire mayor o igual a 13 m/seg. Se verificó que incrementando la velocidad de aire por encima de este valor no se observaba un cambio de la velocidad de secado para ninguno de los espesores estudiados. De ello se concluye que la transferencia de masa a través de la película externa no era la etapa controlante del proceso. Los valores del criterio de Biot de masa,  $kg L_s / 2 (D_A)_B M c_s$ , son coincidentes con dicha observación. Calculados en las condiciones de trabajo están en el rango de 278 á 783 (apéndice A), según la temperatura y el espesor de la muestra utilizados. Por lo tanto dicho caudal fue suficiente para asegurar control interno, ya que el externo se hace importante recién para valores de Biot menores de 10 y es controlante para valores de Biot menores de 0,1 (King, 1.968).

Para determinar el peso del material seco se colocaba

la muestra, una vez finalizada la corrida de secado, en estufa al vacío a 70°C durante 48 horas, en presencia de perclorato de magnesio anhidro.

### III - 5 Determinación de la evolución de la temperatura durante el secado

La medición de la temperatura se realizó mediante finas termocuplas de cobre-constantán, insertadas a distintas profundidades en las placas y conectadas a un milivoltímetro digital, marca Solartron LM, modelo 1604.

### III - 6 Determinación del contenido de aceite de la pulpa de palta

El porcentaje de aceite se determinó siguiendo el método usado por Bertoni y col. (1.967).

Se trabajó sobre 50-60 g de pulpa de palta, extraída en cada caso del mismo fruto del que se cortó la placa para realizar la experiencia de secado.

La pulpa se desmenuzó finamente con 90 ml de acetona anhidra. El producto se transfirió a un balón con 90 ml de éter etílico y se dejó 24 horas a temperatura ambiente. Se separó luego la fase líquida y el sólido remanente se suspendió en una mezcla de 90 ml de acetona y 90 ml de éter etílico. Se volvió a separar la

fase líquida y se repitió este procedimiento una vez más sobre el sólido obtenido.

Las fases líquidas reunidas se diluyeron con una solución acuosa semisaturada de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ; la capa etérea que se separó (la cual contenía los lípidos) se trató dos veces con solución semisaturada de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , luego con  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  anhidro y finalmente se recuperó el solvente por destilación.

El aceite se llevó a constancia de peso en vacío de 50 mmHg a  $100^\circ\text{C}$ .

Las determinaciones se realizaron por duplicado, siendo la desviación de ambos valores respecto del promedio menor del 3%.

### III - 1 Métodos de pretratamientos

#### III - 1-1 Escaldado en agua

Las placas de vegetal a escaldar se sumergieron en agua en ebullición durante cuatro minutos y posteriormente se dejaron enfriar a temperatura ambiente.

#### III - 1-2 Escaldado en vapor

Las muestras se envolvieron en un film plástico (Sarant) impermeable a la humedad y se expusieron cuatro minutos a una corriente de vapor a presión atmosférica, dejándose luego enfriar

a temperatura ambiente.

El objetivo del film plástico fue prevenir la extracción de sólidos solubles que pudiera ocurrir por el condensado de vapor en la superficie de las placas.

### III - 7-3 Congelado-descongelado

Las placas de palta se congelaron colocándolas en un congelador a  $-30^{\circ}\text{C}$  durante 18 horas. Luego se descongelaron a temperatura ambiente antes de realizar el secado de las mismas.

### III - 8 Preparación del modelo artificial

Se formuló un modelo de alimento artificial constituido fundamentalmente por una emulsión de aceite en agua absorbida en una matriz de polisacáridos insolubles.

Para ello se extrajeron placas de remolache azucarera con agua durante períodos de tiempo prolongados con el objeto de remover los sólidos solubles de la misma, que constituyen aproximadamente más del 90% de la materia seca (Vaccarezza, 1.975).

El material extraído, consistente en una matriz de polisacáridos insolubles, fue congelado y liofilizado a presión menor que  $100^{\mu}$  y temperatura ambiente para minimizar los cambios estructurales.

Posteriormente las placas liofilizadas se rehidrataron

por inmersión en emulsiones preparadas con agua y aceite de soja sin refinar en distintas proporciones. El contenido de lecitina del aceite crudo permitió obtener emulsiones relativamente estables.

El porcentaje de aceite de las muestras se calculó en forma gravimétrica a partir de la diferencia de peso entre la placa liofilizada original y el peso seco de la misma placa una vez rehidratada en la emulsión.

La tensión superficial a 25°C de las emulsiones aceite-agua se midió con un tensiómetro de Du Nouy, siendo su valor en todos los casos de 32,7 dinas/cm.

#### IV - RESULTADOS Y DISCUSION

##### IV - 1 FACTORES QUE AFECTAN LA CINETICA DE DESHIDRATACION DE LA PALTA. ANALISIS CONVENCIONAL DE LOS DATOS EN BASE AL FENOMENO DE TRANSFERENCIA DE MASA.

###### IV - 1-1 Aspecto general de las curvas de secado

El comportamiento típico de la palta durante el secado se ejemplifica en la figura 1, en la que se representaron los datos de humedad promedio sobre humedad inicial,  $\bar{W}/W_0$ , en función del tiempo de secado a 45°C y a 60°C para placas de 0,471 y 0,356 cm respectivamente de espesor inicial.

Experimentalmente no se ha detectado la presencia de un período inicial de velocidad de secado constante. Este hecho confirma los resultados reportados en la literatura en la deshidratación de manzana (Rotstein y col., 1.968), de remolacha azucarera (Vaccarezza y col., 1.974 a) y de tapioca (Chirife y Cachero, 1.970), entre otros. De hecho, en el período de velocidad de secado constante, la velocidad de secado está controlada por la etapa de difusión del vapor de agua desde la superficie del sólido húmedo hacia el seno del aire a través de la película externa. Luego, el contenido de humedad cae a un valor tal (humedad crítica,  $\bar{W}_c$ ) que la resistencia a la remoción de vapor de la superfi-

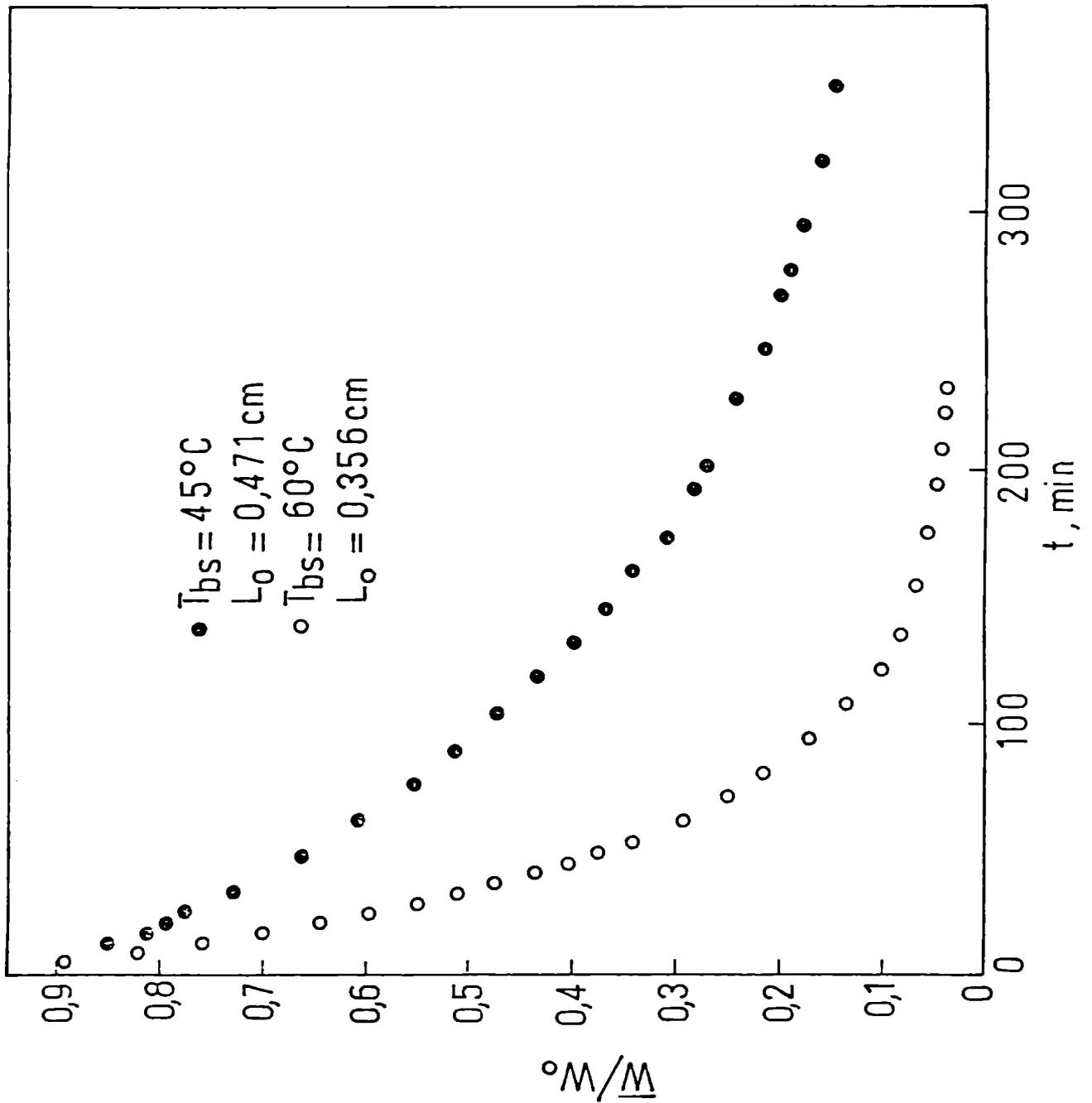


Figura 1 - Evolución del contenido de humedad de placas de palta durante su deshidratación.

cie sólida se vuelve despreciable comparada con la resistencia a la migración del agua dentro del alimento y la velocidad de secado disminuye.

En las condiciones de trabajo (velocidad y temperatura del aire, tamaño de la muestra) usuales en la deshidratación de vegetales en corriente de aire, los valores de los contenidos de humedad crítica son similares a los valores de humedad inicial; de ahí que prácticamente todo el proceso de secado transcurre durante el llamado período de velocidad de secado decreciente. Saravacos y Charm (1.962) han determinado los contenidos de humedad crítica para varias frutas y vegetales. En la tabla 2 se extractan los valores obtenidos como así también las respectivas condiciones de secado.

La figura 2, en la que los datos representados en la figura 1 fueron trasladados a coordenadas semilogarítmicas, indica que el período decreciente puede dividirse en dos zonas, precedidas por una pequeña curvatura inicial: la primera, o "primer período de velocidad de secado decreciente", caracterizada por una relación lineal entre  $\log(\bar{W}/W_0)$  y el tiempo de secado (vale decir velocidad de secado proporcional al contenido de humedad) y la segunda, o "segundo período de velocidad de secado decreciente", representada por una curva convexa hacia el eje de la abscisa.

El contenido de humedad al cual finaliza el primer

TABLA 2

---

Alimento	$\bar{W}_c$ (gH <sub>2</sub> O/gMS)
papa, placa de 0,3 cm de espesor	3,5
manzana, placa de 0,5x0,5x0,25 pulgadas	6,0
zanahoria, placa de 0,5x0,5x0,25 pulgadas	5,0
ajo, láminas de 0,3 cm de espesor	2,4
cebolla, láminas de 0,4 cm de espesor	6,0
damascos, mitades	7,7
uvas sin semilla, una capa	4,8
pera, placa de 0,6 cm de espesor	6,5

---

Condiciones de secado:

velocidad del aire = 2 m/seg.

$T_{bs} = 61 - 65^{\circ}C$

humedad relativa = 13 - 18%

---

Contenido de humedad crítica  $\bar{W}_c$  de frutas y vegetales.

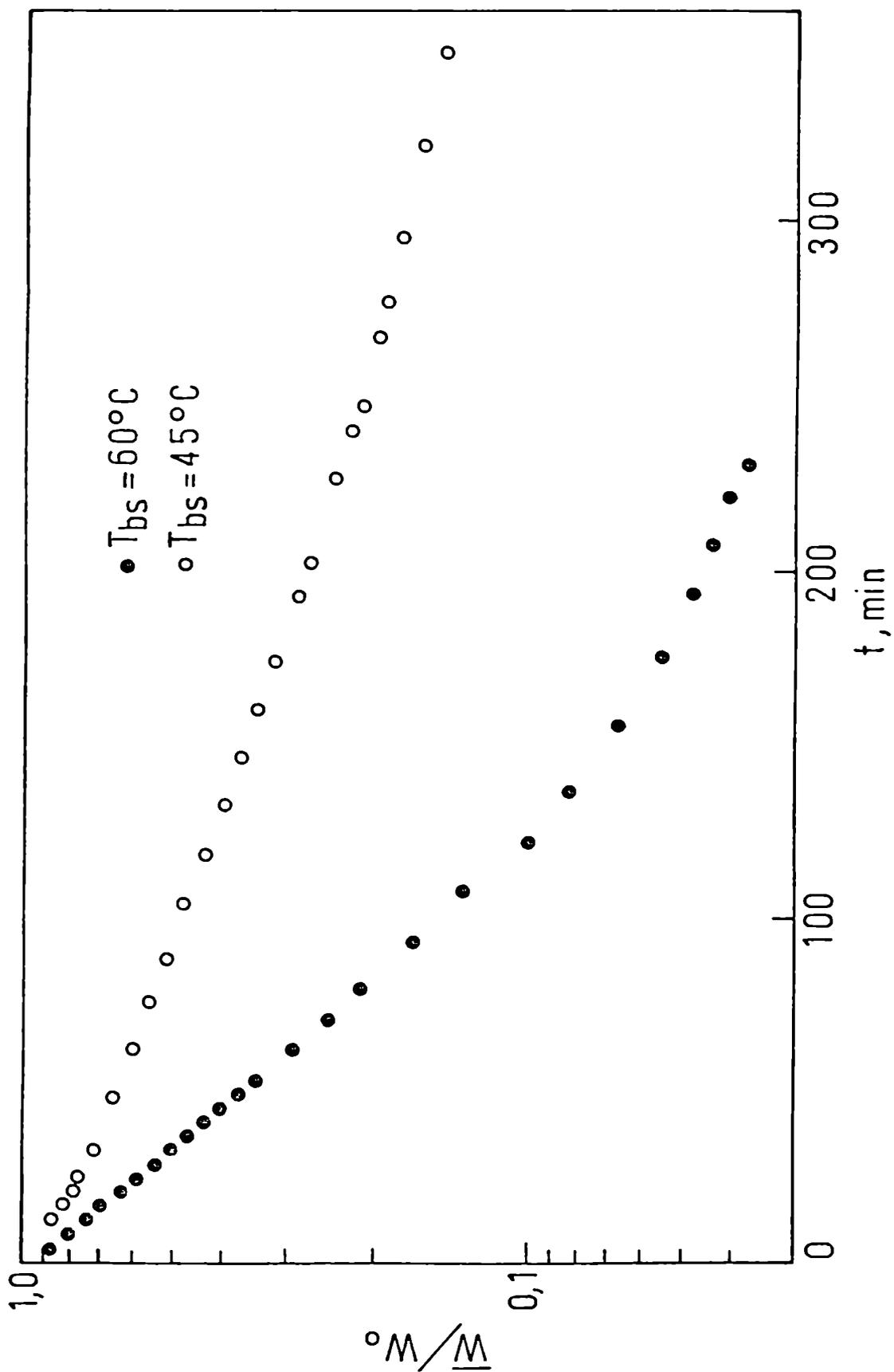


Figura 2 - Evolución del contenido de humedad de palta durante su deshidratación.

período de velocidad de secado decreciente disminuye al aumentar la temperatura de secado, tal como se observa en la tabla 3, en la que se han extraído los contenidos de humedad promedio aproximados al final del primer período decreciente para distintas temperaturas de bulbo seco del aire. Chen y Johnson (1.969 a) han llamado a dicho valor "contenido de humedad terciario". Este punto de transición ocurre cuando se alcanza el máximo contenido de humedad higroscópico (presión de vapor del agua en el alimento igual a la presión de vapor del agua pura), el cual marca la transición entre agua ligada y agua relativamente libre en el alimento.

En la figura 3 puede verificarse además que el contenido de humedad al cual se produce el "quiebre" de la línea recta no depende del espesor inicial de la muestra, siendo esencialmente el mismo para una dada temperatura de aire.

Las isoterms de adsorción de salta a 25°C y a 60°C, determinadas experimentalmente por Wolf y col. (1.972), se muestran en la figura 4. La línea de puntos corresponde a la extrapolación de la isoterma para actividades acuosas mayores de 0,8 usando la ecuación de Smith (Chirife e Iglesias, 1.978):

$$W = M_b - M_a \ln(1 - A_w)$$

donde  $M_a$  y  $M_b$  son constantes.

De acuerdo a los datos de sorción puede notarse que

TABLA 3

---

$T_{bs}$ (°C)	$\bar{W}$ (gH <sub>2</sub> O/gMS)	$L_o$ (cm)
32	1,31	0,453
38	1,13	0,432
45	0,99	0,470
60	0,19	0,442

---

Contenido de humedad promedio al final del primer periodo de velocidad de secado decreciente.

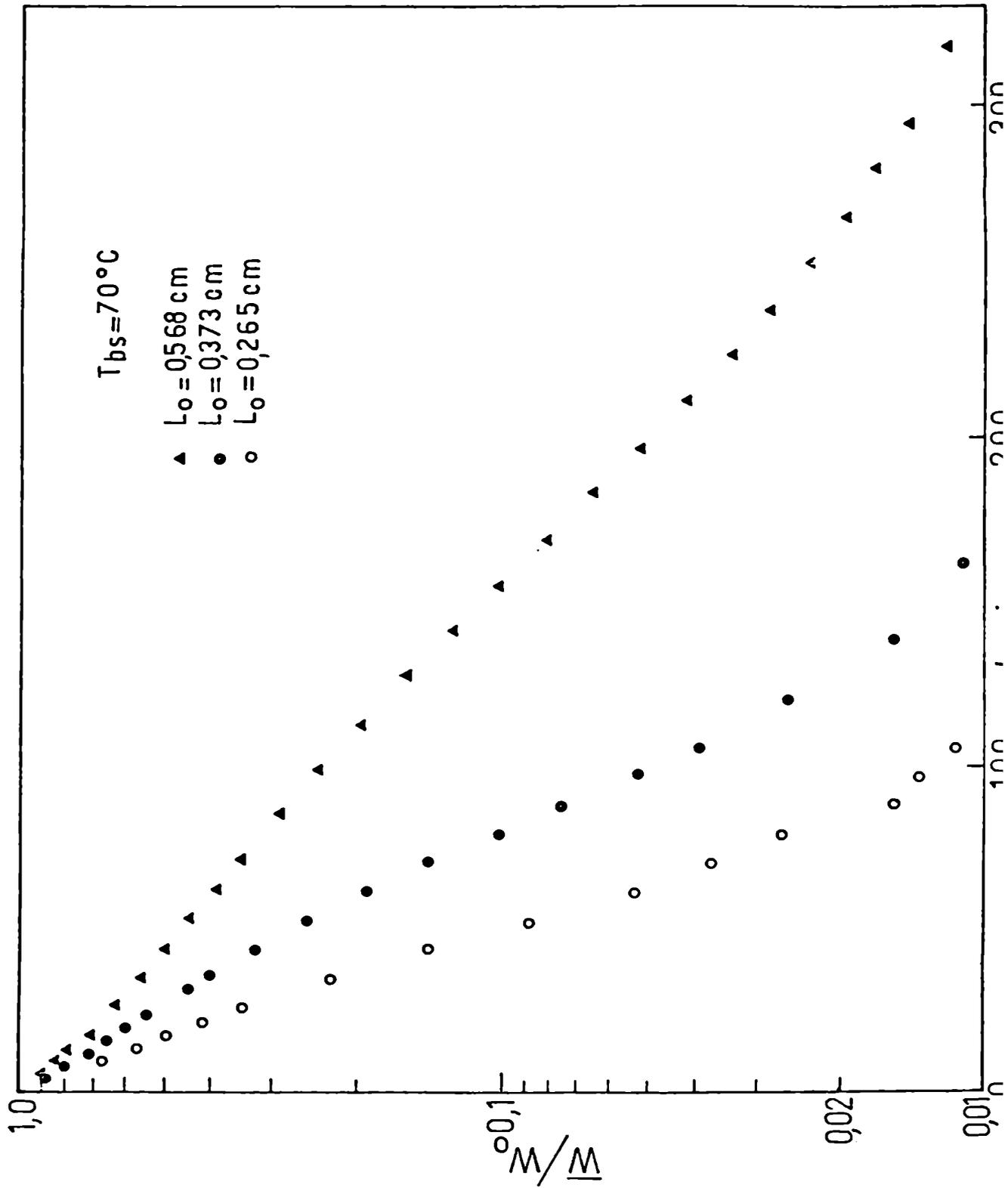


Figura 3

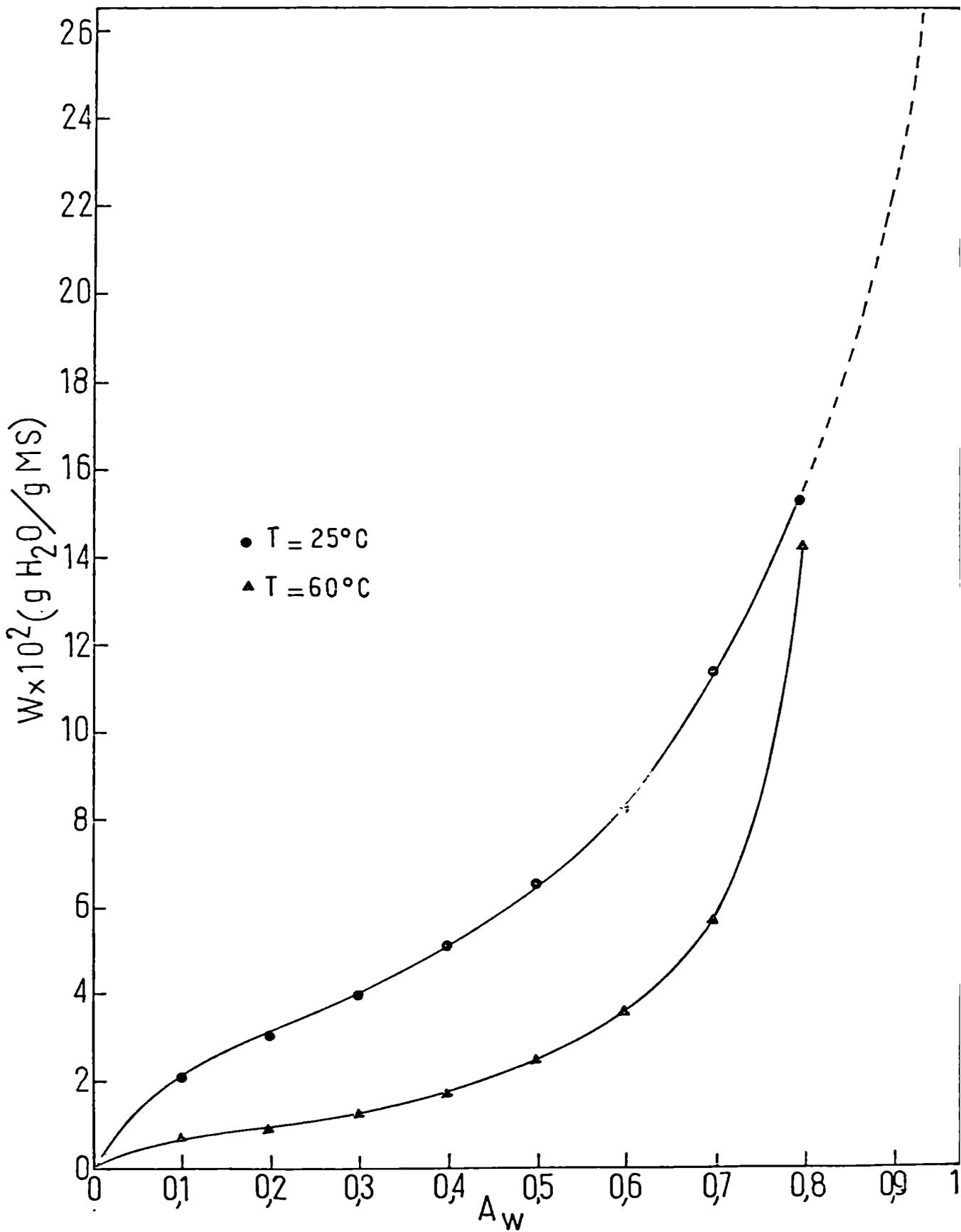


Figura 4 - Isothermas de adsorción de palta.

los valores de humedad de la tabla 3 corresponden en forma aproximada a actividades acuosas cercanas a uno.

#### IV - 1-2 Tratamiento convencional de los datos de secado

La deshidratación de alimentos en corriente de aire es un proceso de transporte simultáneo de masa y calor. Sin embargo, tradicionalmente ha sido considerado como un fenómeno de transferencia de masa únicamente. Así, varios autores han utilizado la segunda ley de difusión de Fick con coeficiente de difusión constante para predecir el tiempo de secado durante la fase inicial del período de velocidad decreciente (Jason, 1.958; Salas y Labuza, 1.968; Vaccarezza y col., 1.974 a).

En forma análoga a este tratamiento, en este capítulo se analizan los resultados experimentales de dicho período a través de la solución standard de la ecuación de Fick para difusión en estado no estacionario, sin tener en cuenta los efectos de la transferencia de calor.

Debe aclararse en este punto que este análisis de los datos no pretende significar que el transporte de agua en el interior del alimento se realice por un mecanismo difusivo en dicho período, sino que simplemente se utiliza la ley de Fick como herramienta matemática para la descripción del proceso.

La ecuación de difusión en estado transiente puede

expresarse:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla c) \quad (1)$$

siendo  $c$  la concentración del fluido y  $D$  el coeficiente de difusión.

En un medio isotrópico, con coeficiente de difusión constante y flujo unidireccional, queda reducida a:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2)$$

Con las siguientes condiciones inicial y de contorno:

$L \geq x \geq 0$	$c = c_0$	$t = 0$
$x = 0$	$c = c_1$	$t > 0$
$x = L$	$c = c_1$	$t > 0$

con  $c_1$  = concentración en la superficie de la placa.

$L$  = espesor de la placa.

la solución es (Crank, 1.956):

$$\frac{c - c_0}{c_1 - c_0} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} e^{-\frac{D(2n+1)^2 \pi^2 t}{L^2}} \cos \frac{(2n+1)\pi x}{L} \quad (3)$$

Promediando la ecuación (3) en el espacio se obtiene la concentración media espacial  $\bar{c}$  en función del tiempo:

$$\frac{\bar{c} - c_1}{c_0 - c_1} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D t}{L^2}} \quad (4)$$

Para espesor  $L$  constante, la concentración es proporcional a la humedad en base seca y la ecuación (4) puede ponerse como:

$$\frac{\bar{W} - W_1}{W_0 - W_1} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D t}{L^2}} \quad (5)$$

Para valores de  $(\bar{W} - W_1)/(W_0 - W_1) \leq 0,6$ , esta ecuación se reduce a la expresión lineal:

$$\log \frac{\bar{W} - W_1}{W_0 - W_1} = \log \frac{8}{\pi^2} - m t \quad (6)$$

$$\text{donde } m = \frac{\pi^2 D}{2,3 L^2} \quad (7)$$

Como el secado se realizó en condiciones de control interno, puede suponerse que la superficie de la placa estaba en

equilibrio con el ambiente y por lo tanto la humedad en la superficie,  $W_1$ , era igual a la humedad de equilibrio,  $W_e$ .

La ecuación (6) permite calcular el coeficiente de difusión efectivo del agua,  $D_{ef}$ , a partir de la pendiente de la línea recta obtenida representando  $\log (\bar{W} - W_e)/(W_o - W_e)$  versus tiempo.

Los contenidos de humedad de equilibrio,  $W_e$ , a las distintas temperaturas de trabajo pueden despreciarse en los cálculos, ya que sus valores, tal como se desprende de las isotermas de sorción (figura 4), son relativamente bajos comparados con  $\bar{W}$  ó  $W_o$  en el período considerado.

#### IV - 1-3 Efecto de la temperatura del aire

Corridas realizadas a diferentes temperaturas de bulbo seco del aire indican que esta variable influencia el proceso de secado aumentando su velocidad. Los resultados se representaron en la figura 5, donde como ordenada se graficó  $\bar{W}/W_o$  y como abscisa el tiempo de secado dividido el espesor inicial de la muestra elevado al cuadrado,  $t/L_o^2$ . El factor (espesor inicial)<sup>2</sup> se introdujo a los fines de comparación para tener en cuenta las pequeñas diferencias entre los espesores iniciales de las placas. En realidad, tal como se analizará más adelante, la dependencia con el espesor es algo menor que dos. Sin embargo, el error introducido al usar

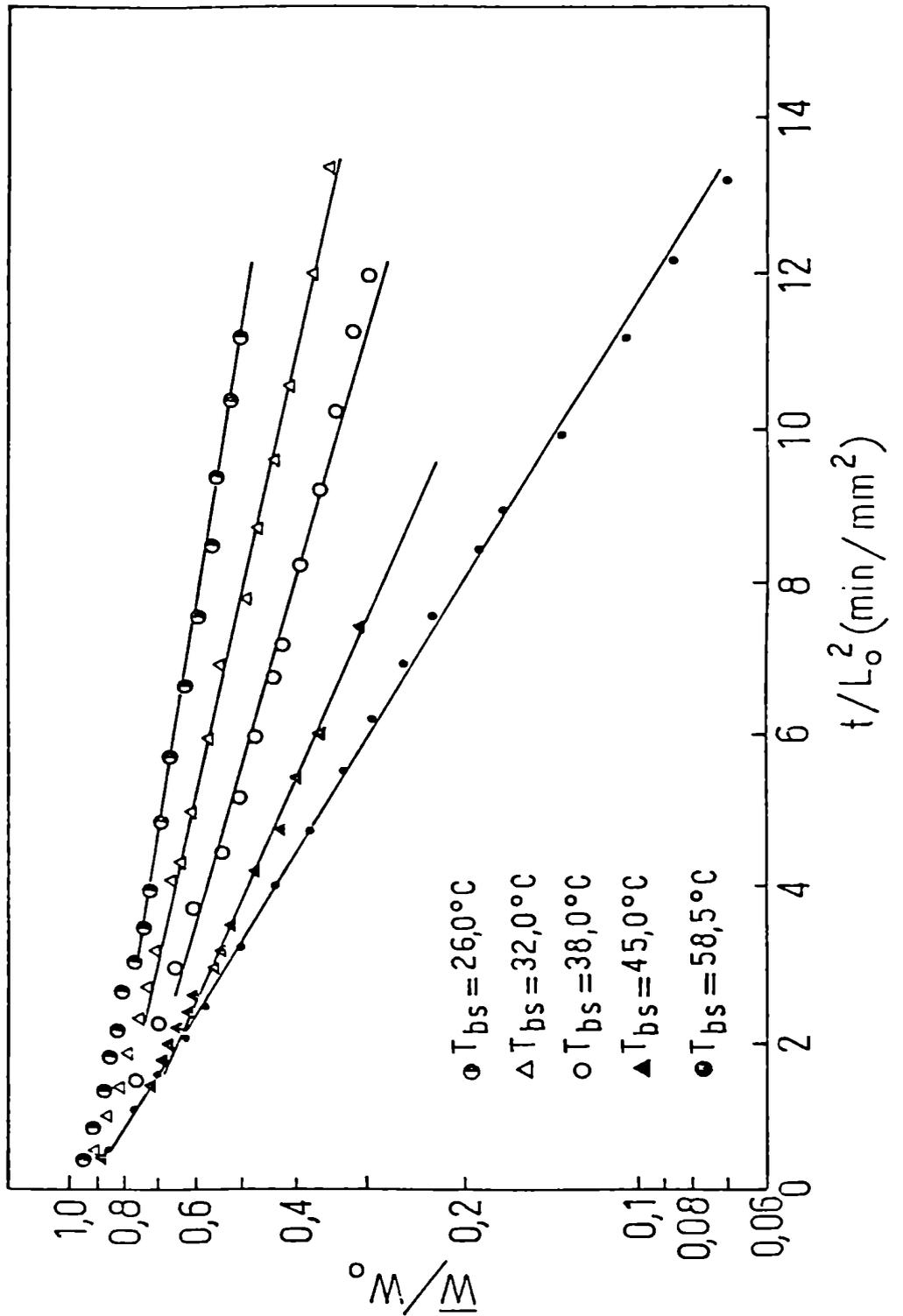


Figura 5 - Curvas de secado de palta a distintas temperaturas de bulbo seco del aire.

este valor no es de gran magnitud pues la variación entre los espesores es menor del 10%.

El efecto de la temperatura de bulbo seco del aire en los coeficientes de difusión efectivos se muestra en la figura 6, la cual indica una relación lineal entre el logaritmo del coeficiente de difusión efectivo y la inversa de la temperatura absoluta del aire,  $T'_{bs}$ . Este comportamiento es típico de una dependencia de tipo Arrhenius y se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$D_{ef} = D_{\infty} \cdot e^{-E_a / R T'_{bs}}$$

Los coeficientes de difusión efectivos a las distintas temperaturas se obtuvieron a partir de la pendiente de las zonas rectas de curvas de secado realizadas a 26,0, 32,0, 37,0, 38,0, 45,0, 52,0 y 58,5°C utilizando la ecuación (7).

Por análisis de regresión lineal se obtuvo el siguiente resultado para la energía de activación de difusión del agua:

$$E_a = 9,5 \pm 3,0 \text{ Kcal/mol}$$

para un nivel de significancia de 0,05.

Este valor es algo mayor que los reportados para otros alimentos, tal como se muestra en la tabla 4.

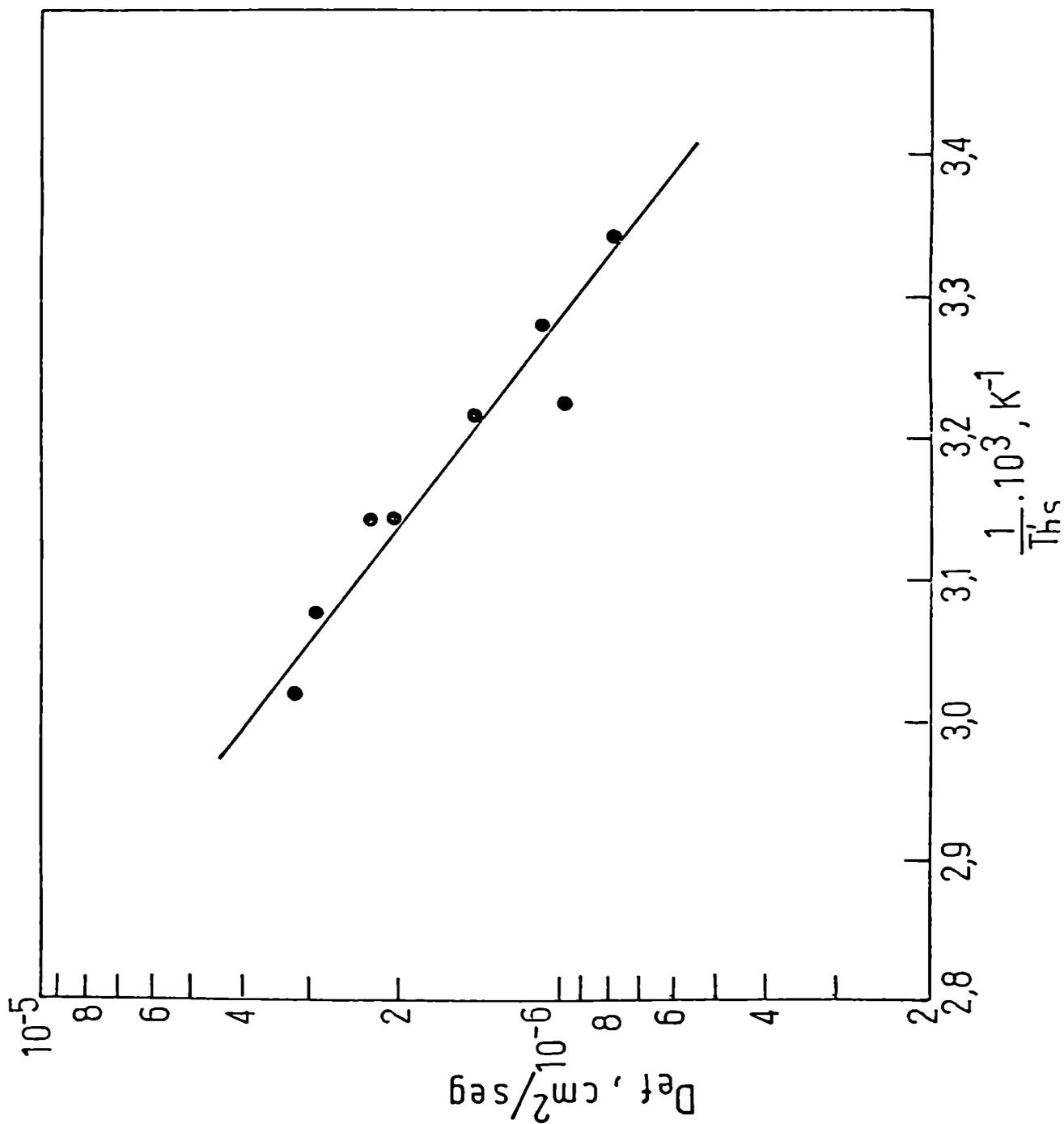


Figura 6 - Efecto de la temperatura de bulbo seco del aire en el coeficiente efectivo de difusión del agua.

TABLA 4

---

Alimento	$E_a$ (Kcal/mol)	Referencia
gel de almidón	4,5	Fish, 1.958
hoja de tabaco	4,3	Chen y Johnson, 1.969 b
mandioca	5,4	Chirife, 1.971
remolacha azucarera	6,9	Vaccarezza y col. 1.974 a
músculo de pescado	7,1	Jason, 1.958
pez espada	3,6	Del Valle y Ni- ckerson, 1.968
pez espada salado	3,4	"

---

Energía de activación para la difusión de agua durante el primer período de velocidad de secado decreciente.

#### IV - 1-4 Efecto del espesor inicial de la muestra

La figura 7 muestra las curvas de secado a 59°C para placas de avocado de diferentes espesores iniciales. Las pendientes de dichas rectas se representaron en coordenadas doble logarítmicas en función del espesor inicial de las muestras en la figura 8. Suponiendo una dependencia potencial del tipo  $m \propto L^{-n}$ , resultó la expresión:

$$m = 2,46 \cdot 10^{-5} L^{-1,69}$$

Para niveles de significación mayores del 10%, el valor experimental de  $n$  es significativamente diferente del valor teórico de 2 predicho por la solución de la ley de Fick con coeficiente de difusión constante.

Esta dependencia algo menor de la pendiente con el espesor inicial también ha sido reportada por otros autores, siendo  $n=1,85$  en el secado de músculo de pescado (Jason, 1.958) y  $n=1,80$  en el secado de remolacha azucarera (Vaccarezza, 1.975).

#### IV - 1-5 Efecto de los pretratamientos

El efecto del escaldado en vapor y del congelado-descongelado previos en la velocidad de secado a 45°C de la palta se muestra en la figura 9, en la que se representaron los valores de  $\log(\bar{w}/w_0)$  versus tiempo/(espesor)<sup>1,69</sup> para las muestras pretratadas

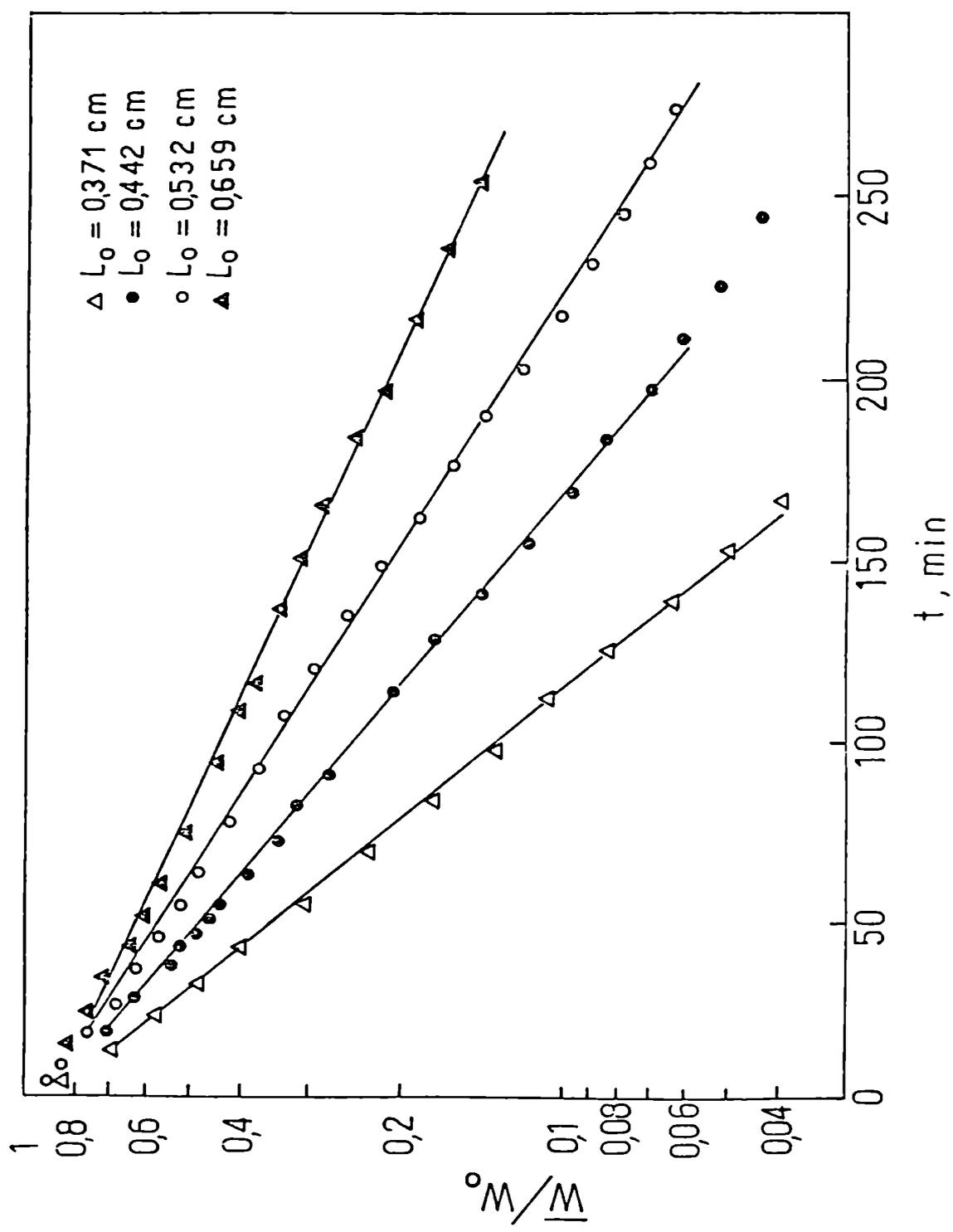


Figura 1 - Efecto del espesor inicial de las placas en las curvas de secado de palta a 59°C.

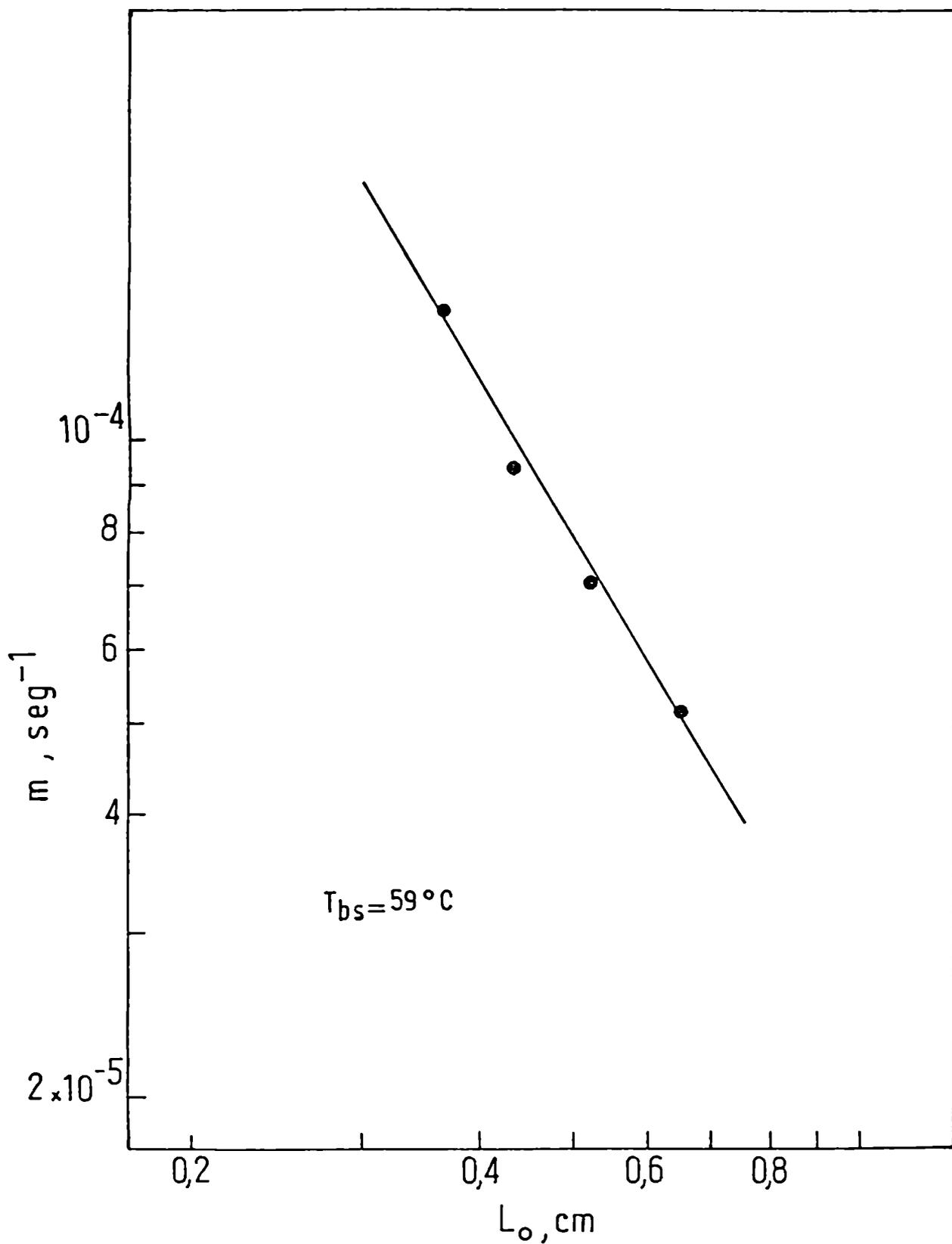


Figura B - Efecto del espesor inicial de la muestra en la velocidad de secado de palta.

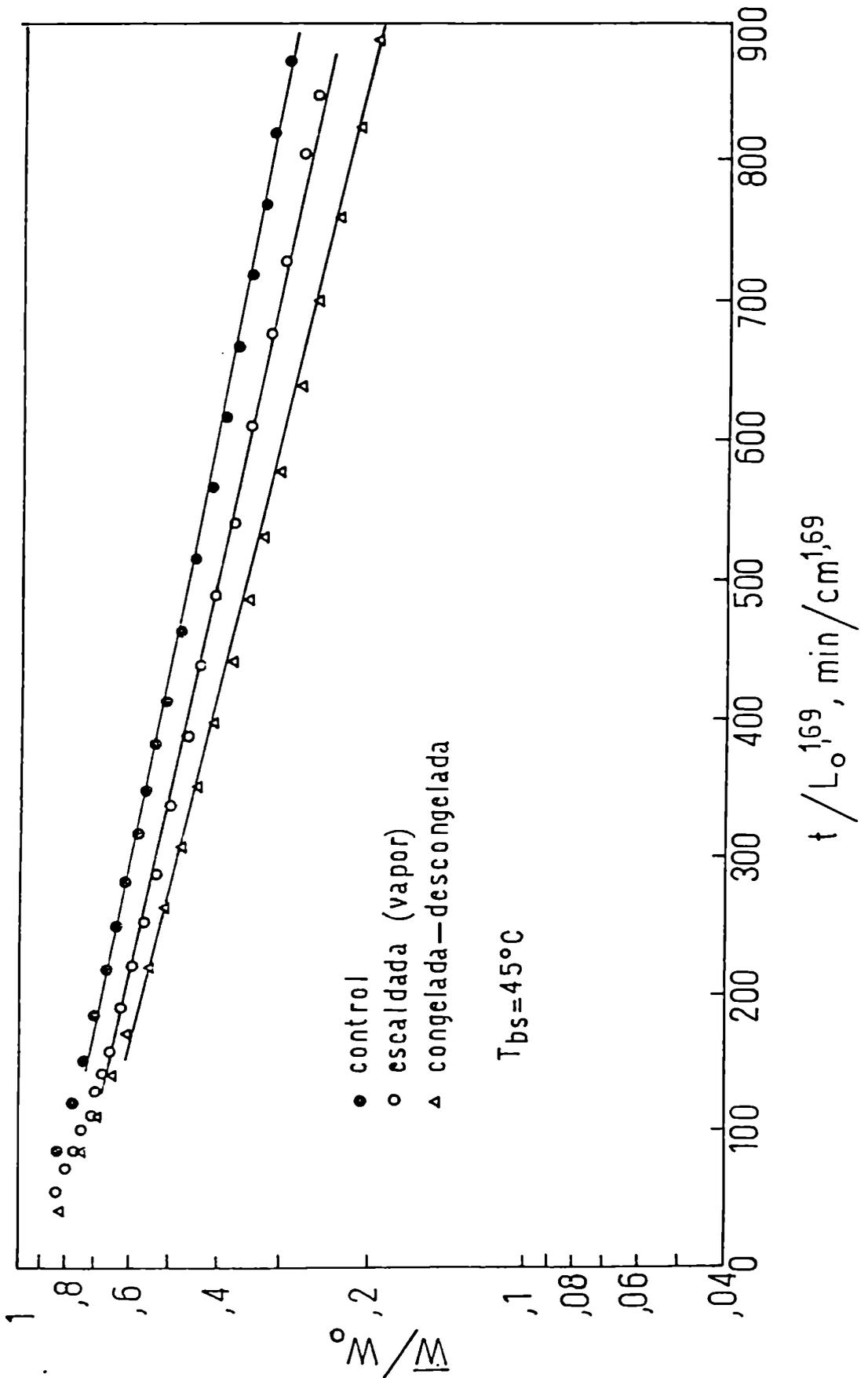


Figura 2 - Efecto de los procesos de escaldado y de congelado-descongelado en la curva de secado de palta.

y el control. El factor 1,69 se introdujo para tener en cuenta las diferencias en el espesor inicial de las placas, de acuerdo a lo discutido en el ítem IV-1-4.

#### Efecto del escaldado

En la literatura se han reportado distintos efectos del escaldado en la velocidad de secado de vegetales. Vaccarezza y col. (1.974 a) han encontrado que el escaldado en agua (realizado envolviendo las muestras en papel de aluminio para prevenir la pérdida de sólidos solubles) de placas de remolacha azucarera incrementa la velocidad de secado a 47°C pero no la modifica a 60°C y atribuyen este fenómeno a la destrucción (por acción del calor) de la semipermeabilidad de las membranas celulares, ya sea como consecuencia del escaldado y/o de la deshidratación a altas temperaturas. Saravacos y Charm (1.962) observaron también que el escaldado no tiene influencia en el secado de papa a 66°C, si bien la velocidad de aire usada durante su experiencia no fue lo suficientemente elevada como para asegurar la existencia de control interno en el proceso.

En la palta el escaldado previo no influencia significativamente la cinética de secado, tal como se observa en la figura 9.

Para esclarecer un poco más el efecto de este pretra-

tamiento en la velocidad de secado de frutas y vegetales se llevaron a cabo experiencias con papa (que posee un alto contenido de almidón) y remolacha (que tiene un relativamente elevado contenido de sólidos). Los resultados se presentan en las figuras 10 y 11 respectivamente, donde se compararon las curvas de secado de las muestras escaldadas en agua y en vapor con las de las muestras control. En este caso, los valores de  $\log(\bar{W}/W_0)$  se graficaron versus  $\text{tiempo}/(\text{espesor})^2$ , suponiéndose el factor 2 para considerar las diferencias (no mayores del 6%) en el espesor inicial de las placas.

En la papa, tanto el escaldado en agua como en vapor, disminuyen la velocidad de secado. Este efecto puede atribuirse a la gelatinización del almidón. En la remolacha, sin embargo, el efecto es inverso y mucho más notable en la muestra escaldada en agua, pudiendo asociarse el fenómeno a la pérdida de sólidos solubles de la misma.

Entonces, para explicar el efecto del escaldado en la difusividad del agua en la fase inicial del período de velocidad de secado decreciente de vegetales y frutas, deben tenerse en cuenta varios fenómenos, que no sólo se refieren a la estructura del alimento, sino que derivan de la consideración de la etapa controlante de la migración del agua en el secado:

a) el calor produce una serie de cambios en las propiedades físicas de los tejidos, entre ellos destruye la semipermeabi-

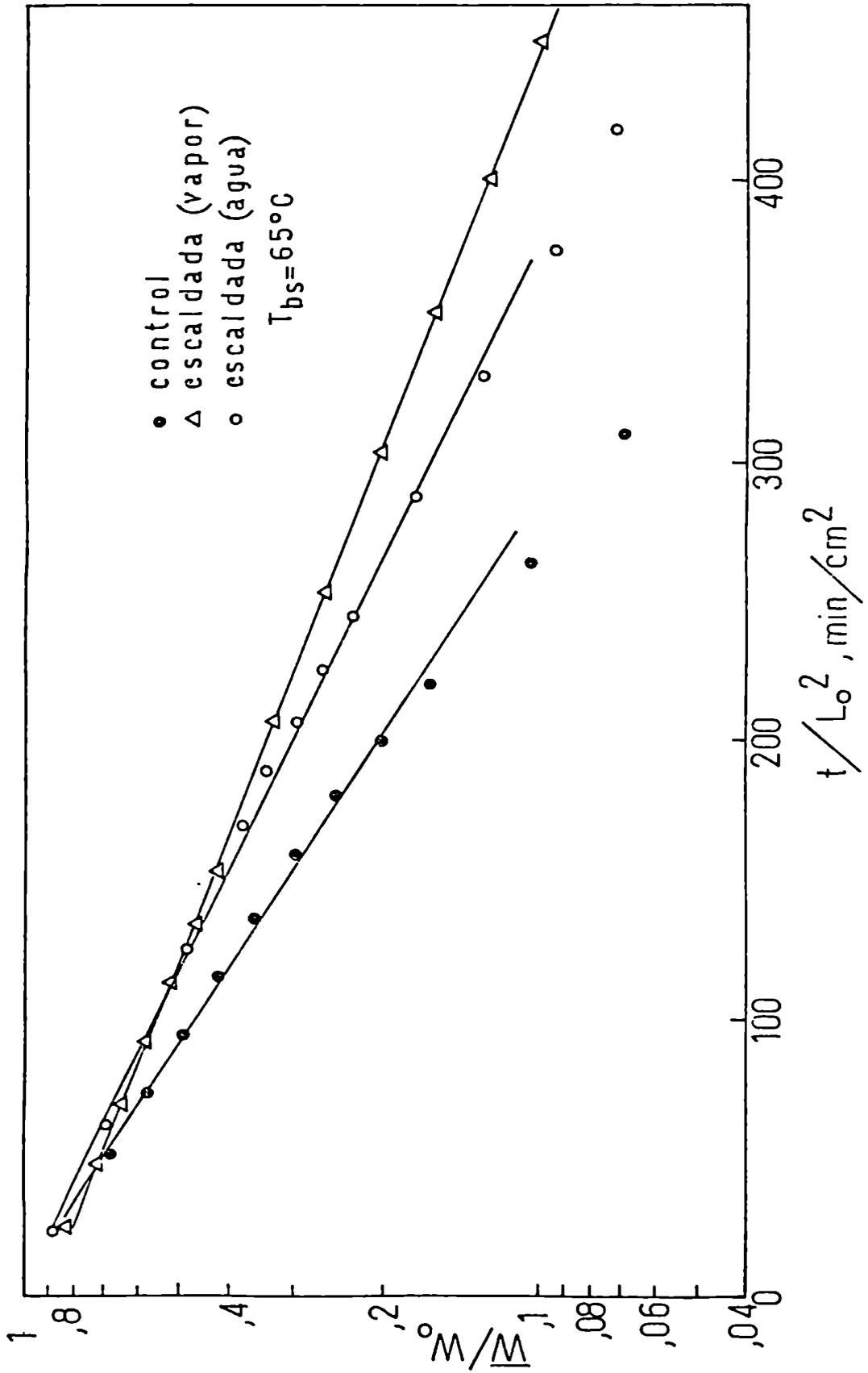


Figura 10 - Efecto del escaldado en la curva de secado de papa.

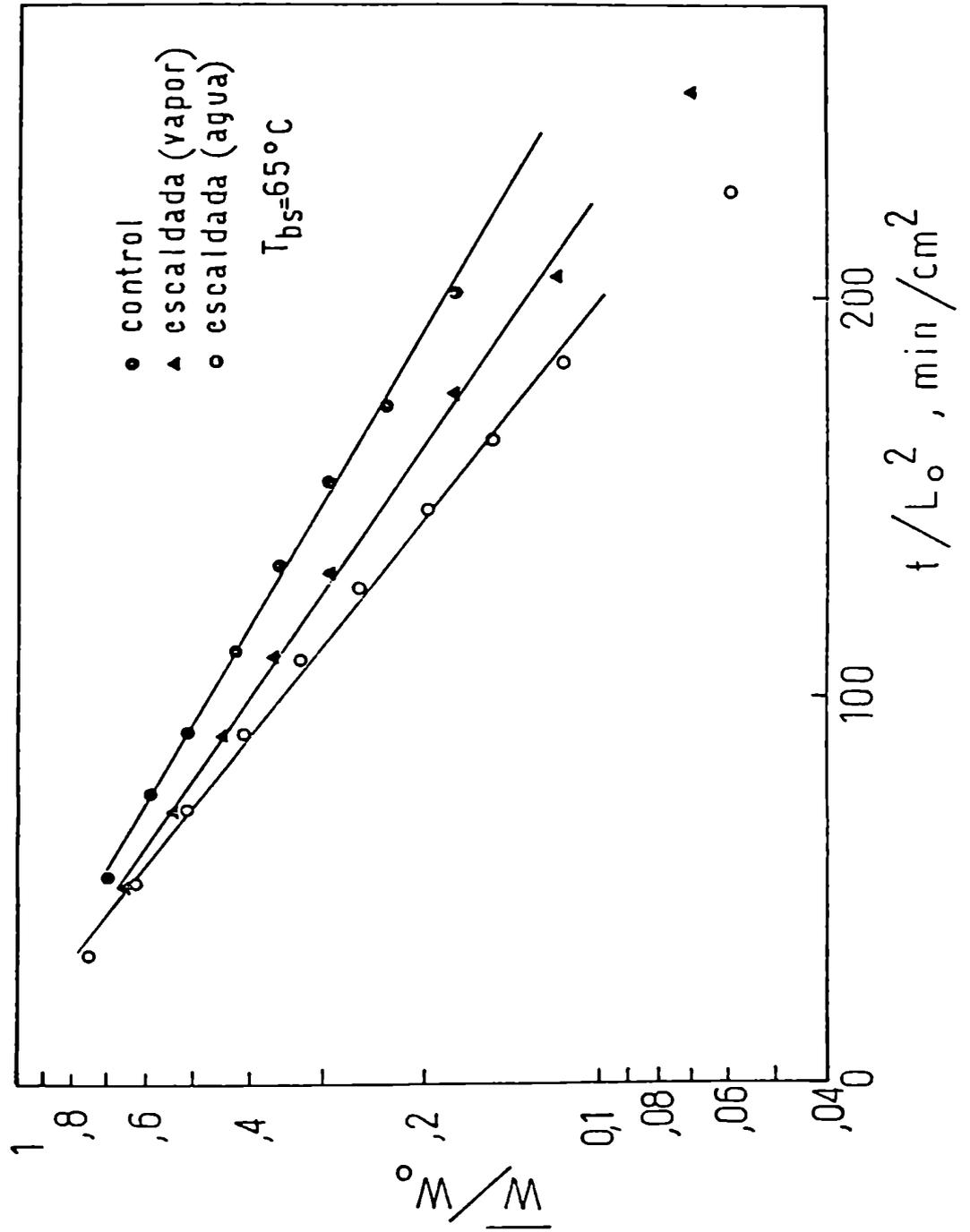


Figura 11 - Efecto del escaldado en la curva de secado de remolacha.

lidad de la membrana que rodea a la vacuola y con ello, las propiedades osmóticas de la célula. La pared celular se encoge y el líquido es empujado a los espacios intercelulares y en algunos casos fuera del tejido (Gane y Wager, 1.958).

b) sin embargo, Rotstein y Cornish (1.978) han estudiado la influencia de la permeabilidad de la membrana celular en el secado de manzana y han llegado a la conclusión de que dicho proceso no está controlado por el transporte de agua a través de la pared celular.

c) el escaldado de alimentos ricos en almidón, como la papa, puede conducir a la gelatinización del mismo.

d) el secado a altas temperaturas puede también modificar las características físicas del vegetal, enmascarando el efecto del escaldado.

e) el escaldado en agua origina la pérdida de sólidos solubles y con ello puede afectarse la velocidad de secado.

Teniendo en cuenta estos efectos y la composición química de la palta (la cual presenta bajo contenido de sólidos solubles), como así también el hecho de que el escaldado se realizó en vapor, es previsible su poca influencia en la conducta de secado, tal como se observó experimentalmente.

#### Efecto del congelado-descongelado

El efecto del congelado-descongelado en la velocidad de secado es más significativo. Si bien el congelamiento, en especial el congelamiento lento, puede alterar las características físicas de los tejidos, se cree más bien que el aumento en la velocidad de secado se debe al efecto del pretratamiento en la estabilidad de la emulsión aceite-agua, la cual constituye la mayor parte de la pulpa de palta.

Chen (1.975) ha encontrado que el congelado-descongelado provoca la coalescencia de las gotas de aceite incrementando el diámetro promedio de las gotas en la emulsión. Esto trae aparejado un valor menor de la concentración de las gotas de aceite, una vez descongelada la emulsión.

Aún no está bien establecido el mecanismo por el cual el proceso de congelado-descongelado afecta a la emulsión. Se han argumentado varias razones, entre ellas:

a) el film formado por el agente emulsificante en la superficie de las gotas es debilitado o roto cuando se congela la emulsión, originando esto la coalescencia de las gotas al descongelarse el sistema.

b) el efecto mecánico ejercido por los cristales de hielo sobre las gotas de aceite rompe el film de emulsificante además de aplastar las gotas y estrecharlas en forma de filamentos, favoreciendo la coalescencia.

c) el cambio en la conducta viscoelástica de la emulsión a causa del congelado puede originar la coalescencia.

Puede suponerse entonces que el incremento en la difusividad del agua se debe a la coalescencia de las gotas de aceite de la palta emulsificadas con el agua, a causa de la acción originada por el proceso de congelado-descongelado.

Esta suposición se confirma, por otra parte, con el trabajo de Gejl-Hansen y Flink (1.977). Dichos autores han analizado mediante técnicas microscópicas la distribución de la fracción de lípidos en modelos artificiales formulados mezclando emulsiones de aceite-agua con carbohidratos insolubles (celulosa microcristalina - Avicel) y luego liofilizados. Han encontrado que todo el aceite se encuentra distribuido formando una cubierta en la superficie de los cristales de celulosa, atribuyendo este fenómeno a la coalescencia de las gotas de aceite por la acción del congelado y a la incapacidad de los cristales de Avicel de desarrollar una matriz amorfa que encapsule el aceite.

#### IV - 1-6 Efecto del contenido de aceite

Como se mencionó anteriormente, uno de los principales componentes de la pulpa de palta es el aceite. Este hecho motivó que se estudiara la influencia del contenido del mismo en la velocidad de secado.

Trabajos previos han revelado que el contenido de aceite de la pulpa se incrementa a medida que el contenido de humedad disminuye (Lewis, 1.978). Hughes (1.971) sugirió que la relación (% de aceite + % de agua) es constante y aproximadamente igual a 91 para la variedad fuerte. Pearson (1.975) encontró una relación similar para paltas israelíes y sudafricanas y además propuso calcular el contenido de aceite a partir del contenido de humedad. El-Zeftawi (1.978) estudió los cambios físicos y químicos durante el crecimiento y maduración de la fruta. Encontró que para todas las variedades estudiadas (en total siete) el contenido de humedad se correlaciona en forma negativa con el contenido de aceite de la pulpa a un nivel de significancia del 1% de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Y = 72,47 - 0,77 X$$

donde Y = contenido porcentual de aceite

X = contenido porcentual de humedad

Se analizó el contenido inicial de aceite y humedad de varias muestras de distintas variedades y madurez y se comprobó que la ecuación anterior ajusta los datos en forma razonable. Esta ecuación permite así usar el contenido de humedad como índice del contenido de aceite sin necesidad de realizar su determina-

ción analítica.

En la figura 12 se muestran las curvas de secado a 60°C de paltas cuyo contenido inicial de aceite varía de 4,7 á 14,0%. En todas las corridas dicho valor se estableció por análisis químico, excepto en el caso del contenido de aceite más elevado, el cual se obtuvo aplicando la correlación de El-Zeftawi. Se observa que a medida que se incrementa el contenido inicial de aceite la velocidad de secado disminuye.

Se trató de cuantificar este efecto en la difusividad efectiva del agua. Para ello se calcularon a partir de las pendientes de las curvas de secado y de acuerdo a la ley de Fick los coeficientes efectivos de difusión para los distintos contenidos de aceite (figura 13) y se halló por análisis de regresión lineal la siguiente correlación:

$$D_{ef} (60^{\circ}\text{C}) = 2,38 \cdot 10^{-5} - 1,37 \cdot 10^{-6} \cdot Y$$

Es interesante notar que a bajos contenidos de aceite ( $Y \rightarrow 0$ ) el coeficiente efectivo de difusión es del mismo orden que el coeficiente de autodifusión del agua, cuyo valor es aproximadamente  $4,5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{seg}$  a 60°C (Lawrence y Scott, 1.966).

Este comportamiento se confirmó con experiencias realizadas con modelos artificiales conteniendo distintas proporcio-

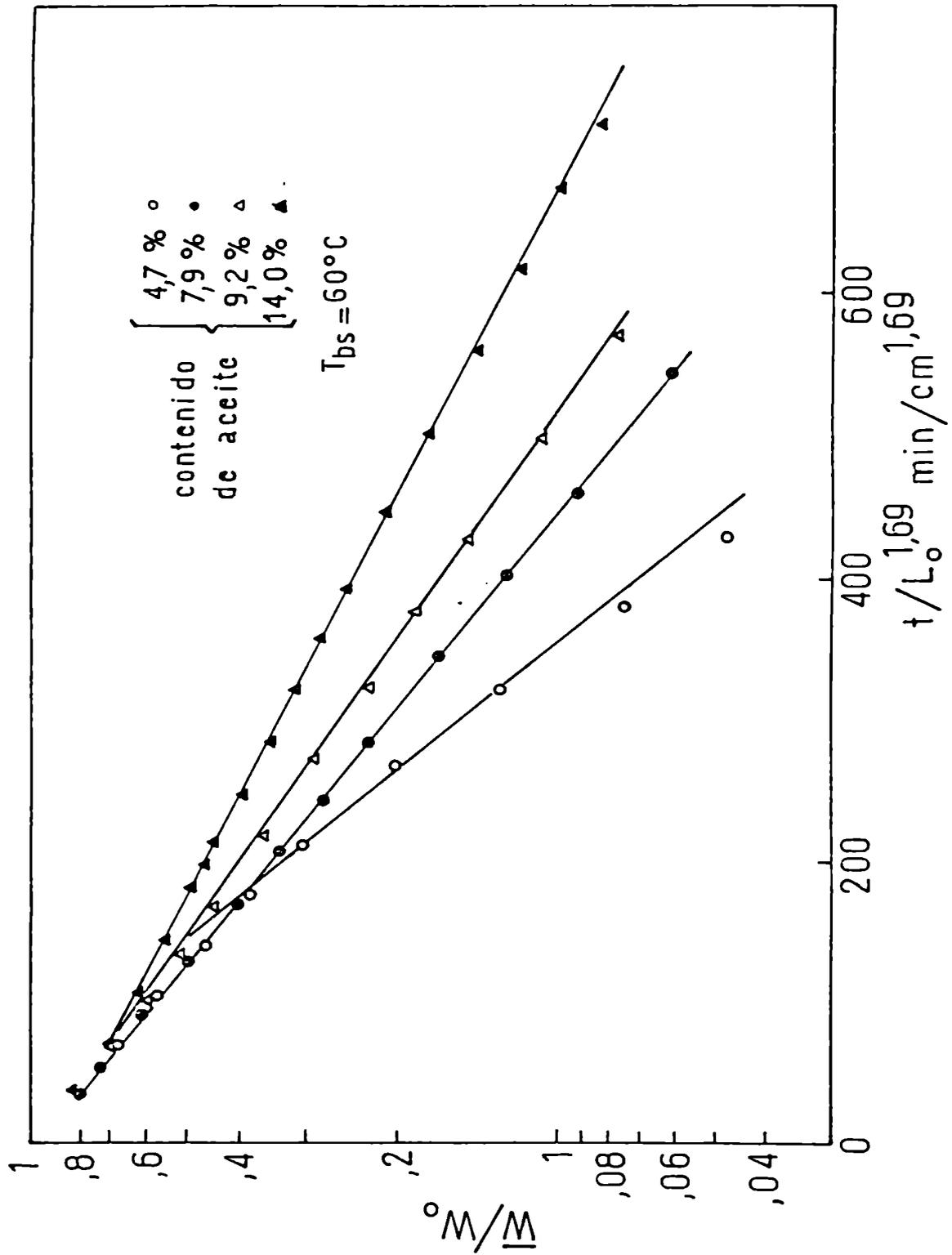


Figura 12 - Efecto del contenido inicial de aceite en las curvas de secado de palta.

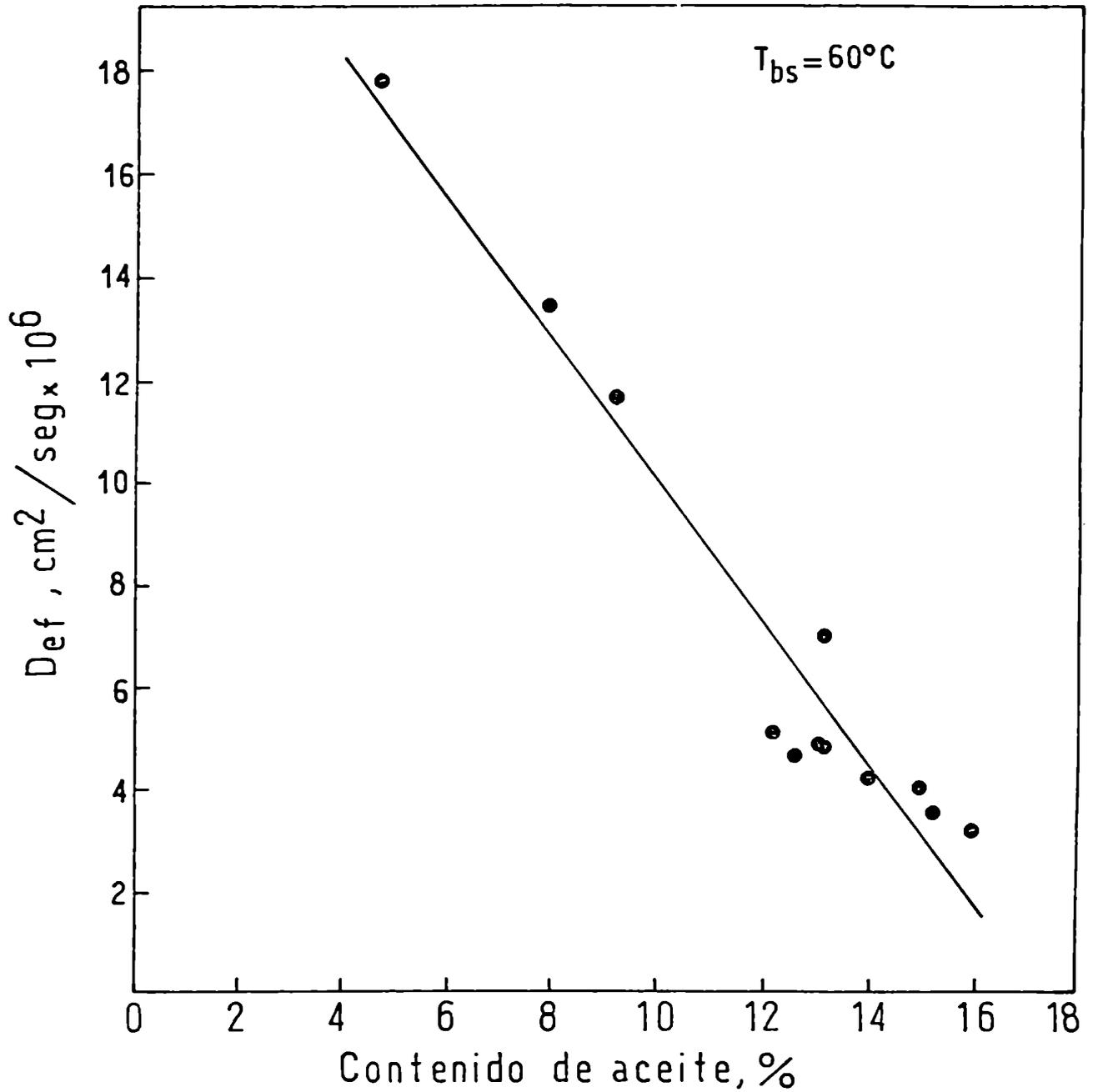


Figura 13 - Efecto del contenido inicial de aceite en los coeficientes efectivos de difusión del agua a 60°C.

nes de aceite de soja emulsionado. La figura 14 muestra la conducta de los distintos modelos en el secado a 58°C. Puede apreciarse, además del efecto mencionado, que por debajo de un cierto nivel de contenido de aceite no se observa una reducción posterior de la velocidad de secado.

Otros autores han analizado también la influencia negativa del contenido de aceite en el coeficiente de difusión del agua. Jason (1.965), en sus estudios sobre músculo de pescado, atribuyó este efecto al carácter hidrófobo de la grasa que opone una resistencia al flujo de agua. Palumbo y col. (1.977) encontraron que las constantes de velocidad de secado (directamente relacionadas a la difusividad del agua) de salame disminuyen cuando el contenido de grasa se incrementa.

#### IV - 1-7 Comparación de los coeficientes efectivos de difusión del agua en el secado de palta y de otros alimentos

En la tabla 5 se compararon los coeficientes efectivos de difusión del agua en el secado de palta con los coeficientes efectivos de difusión en el secado de otros vegetales, obtenidos también mediante la aplicación de la ley de Fick en el primer período de velocidad de secado decreciente.

Puede observarse que los distintos valores son del mismo orden de magnitud ( $10^{-5}$  a  $10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/seg ) y que además, son

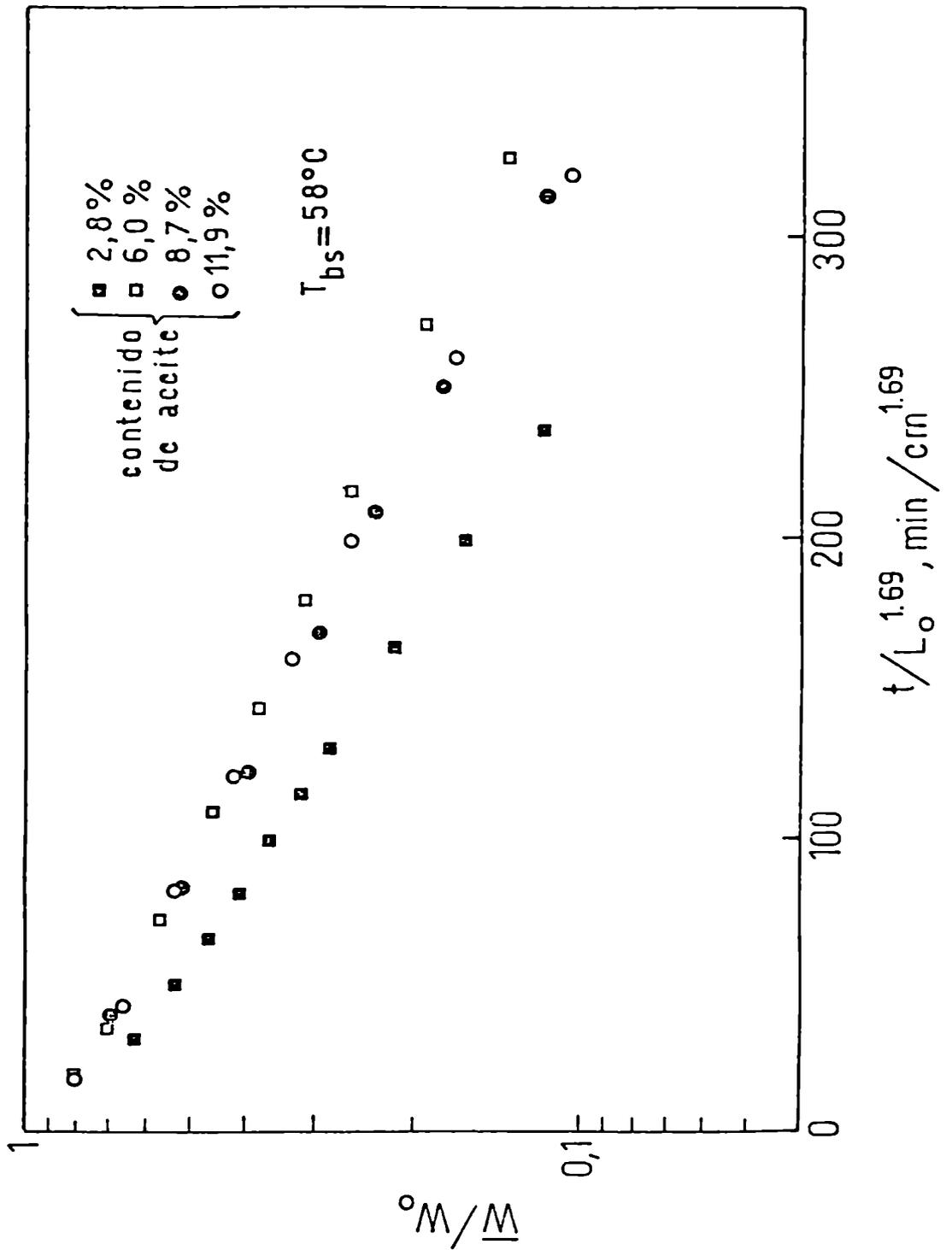


Figura 14 - Curvas de secado de modelos artificiales de diferentes contenidos de aceite.

TABLA 5

Alimento	T(°C)	$D_{ef}$ (cm <sup>2</sup> /seg)	Observaciones	Referencias
manzana	66	$1,1 \cdot 10^{-5}$	variedad Mc Intosh	Labuza y Simon, 1.970
	71	$1,6 \cdot 10^{-5}$	variedad Granny Smith	Este trabajo
remolacha	65	$1,5 \cdot 10^{-5}$		Este trabajo
papa	65,5	$1,6 \cdot 10^{-5}$		Saravacos y Charm, 1.962
	65	$1,4 \cdot 10^{-5}$		Este trabajo
músculo de pescado	65	$1,14 \cdot 10^{-5}$	0,05% de grasa	Jason, 1.958
modelo artificial (celulosa, aceite, agua)	68	$3,1 \cdot 10^{-5}$	1% de aceite 24% de celulosa 75% de agua	Salas y Labuza, 1.968
palta	60	$3,9 \cdot 10^{-6}$	14,7% de aceite	Este trabajo
	60	$1,2 \cdot 10^{-5}$	9,2% " "	" "
	60	$1,3 \cdot 10^{-5}$	7,9% " "	" "
	60	$1,8 \cdot 10^{-5}$	4,7% " "	" "

---

remolacha azucarera	65	$8,2 \cdot 10^{-6}$		Vaccarezza y col., 1.974 a
mandioca	65	$3,9 \cdot 10^{-6}$		Chirife, 1.971
pescado	65	$4,6 \cdot 10^{-6}$	grasa 2-3%	Del Valle y Ni- ckerson, 1.968
	65	$3,8 \cdot 10^{-6}$	salado en salmuera saturada	"

---

Coeficientes efectivos de difusión del agua en el primer período  
de velocidad de secado decreciente.

tan significativas las diferencias en los valores de  $D_{ef}$  para distintos alimentos como las que se encuentran para un mismo producto pero con variaciones en su composición.

## IV - 2 EFECTO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA CINÉTICA DE DESHIDRATACION.

### IV - 2-1 Introducción

Es un hecho experimental conocido que la temperatura de un alimento durante su deshidratación no es constante, sino que se incrementa rápidamente desde el comienzo del secado y tiende a la temperatura de bulbo seco del aire. Sin embargo, la diferencia con ésta se hace despreciable cuando recién se ha evaporado aproximadamente un 90% del contenido de agua inicial (Saravacos y Charm, 1.962; Vaccarezza y col., 1.974 a).

En consecuencia, el estudio riguroso de la cinética de deshidratación debería involucrar la resolución de un sistema de ecuaciones diferenciales parciales acopladas que representen al proceso de transferencia simultánea de calor y masa que ocurre durante el secado.

Para el caso de parámetros cinéticos constantes, Luitkov y Mikhailov (1.961) han resuelto dicho sistema para diversas condiciones de contorno.

La posibilidad de encontrar soluciones analíticas al sistema de ecuaciones diferenciales desaparece para el caso en que los parámetros cinéticos, tales como  $D_{ef}$ , conductividad térmica  $k$  y capacidad calorífica  $c_{cp}$ , sean función de la humedad y tempera-

tura, pues entonces las ecuaciones se vuelven no lineales y su solución debe encontrarse por vía numérica. Harmathy (1.969) y Husain, Chen y Clayton (1.973) han planteado y resuelto numéricamente dichas ecuaciones diferenciales, comparando los últimos autores las soluciones con los datos experimentales de secado de arroz.

Otra forma de obtener las relaciones de temperatura y humedad en función del tiempo de secado es la que plantearon Vaccarezza, Lombardi y Chirife (1.974 b), quienes a partir de un modelo simplificado, donde despreciaban el término de calor sensible frente al de calor latente, y de la determinación experimental de la curva de humedad versus tiempo, obtuvieron los parámetros de secado para remolacha azucarera secada en corriente de aire. Luego, utilizando dichos parámetros y la curva de secado, integraron numéricamente el balance de energía. En dicho procedimiento, incluyeron el término de calor sensible pero no tuvieron en cuenta gradientes internos de temperatura. De esta forma obtuvieron la variación de la temperatura de la muestra en función del tiempo de secado.

En este capítulo se planteó un modelo semiempírico que tiene solución analítica y que permite predecir la evolución de la temperatura de la muestra durante el secado. El conocimiento de la temperatura del alimento se utilizó luego para reanalizar los datos de secado en base a la ley de Fick.

IV - 2-2 Desarrollo del modelo

El balance de energía para una placa infinita en la que ocurre evaporación superficial puede escribirse:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad (8)$$

Las condiciones iniciales y de contorno para el secado en un medio con temperatura de aire constante,  $T_{bs}$ , son:

$$T(x,0) = T_0 \quad (9)$$

$$-k \frac{\partial T(R,t)}{\partial x} + h [T_{bs} - T(R,t)] - \lambda u = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

donde  $u$  es la velocidad de evaporación. Experimentalmente, se ha encontrado que  $u$  puede expresarse como:

$$u = u_0 \cdot e^{-m' t} \quad (12)$$

donde  $u_0$  y  $m'$  se determinan a partir de la relación entre el contenido de humedad y el tiempo:

$$\bar{W}/W_0 = \sigma \cdot e^{-m' t} \quad (13)$$

de donde

$$u_0 = - \left[ \frac{d(\bar{W}/W_0)}{dt} \right]_{t \rightarrow 0} W_0 \frac{MS}{A} \quad (14)$$

La solución de la ecuación (8) teniendo en cuenta la ecuación (12) es (Luikov, 1.968):

$$\frac{T(x,t) - T_0}{T_{bs} - T_0} = 1 - \frac{\theta_{wb} \cos \left[ (Pd)^{1/2} x/R \right]}{\cos(Pd)^{1/2} - (Pd)^{1/2}/Bi \operatorname{sen}(Pd)^{1/2}} e^{-Pd Fo} - \sum_{n=1}^{\infty} \left[ 1 - \frac{\theta_{wb}}{1 - (Pd/\mu_n^2)} \right] A_n \cos(\mu_n x/R) e^{-\mu_n^2 Fo} \quad (15)$$

donde

$$\theta_{wb} = \lambda u_0 / h (T_{bs} - T_0)$$

$$Pd = m' L_0^2 / 4 a, \text{ criterio de Predvoditelev.}$$

$$Fo = 4 a t / L_0^2, \text{ número de Fourier.}$$

$$Bi = L_0 h / 2 k, \text{ criterio de Biot.}$$

$$a = k / \rho c_p, \text{ difusividad térmica.}$$

$A_n$  y  $\mu_n$  son funciones del criterio de Biot:

$$\cot \mu_n = (1/Bi) \mu_n \quad (16)$$

$$A_n = \frac{(-1)^{n+1} 2 Bi (Bi^2 + \mu_n^2)^{1/2}}{\mu_n (Bi^2 + Bi + \mu_n^2)} \quad (17)$$

Para resolver la ecuación diferencial (8) se supuso constancia de los parámetros térmicos calor específico  $c_p$  y conductividad térmica  $k$  y de la densidad  $\rho$ .

IV - 2-3 Predicción de la evolución de la temperatura y estimación de los gradientes internos.

La ecuación (15) se usó para predecir la historia de la temperatura de la palta durante el secado en las siguientes condiciones:

$$T_{bs} = 57,8^\circ\text{C}$$

$$T_o = 24,0^\circ\text{C}$$

$$W_o = 3,18 \text{ gH}_2\text{O/gMS}$$

$$\text{MS} = 1,67 \text{ g}$$

$$A = 47,49 \text{ cm}^2$$

$$L_o = 0,424 \text{ cm}$$

$$h = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ cal/seg cm}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$k = 1,24 \cdot 10^{-3} \text{ cal/seg cm }^\circ\text{C}$$

$$\lambda = 565 \text{ cal/g}$$

$$m' = 2,56 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$$

La evolución de la temperatura de la placa se calculó para dos posiciones: el centro de la placa ( $x/2L_0=0$ ) y la "superficie" ( $x/2L_0=0,8$ ). Los resultados mostraron diferencias muy pequeñas indicando que la temperatura interna de la palta puede considerarse uniforme sin error apreciable. La temperatura calculada (esencialmente un único valor para cada tiempo) se representó gráficamente en la figura 15, comparándola con las mediciones experimentales de temperatura en el centro de la placa, versus el tiempo; se observa una buena concordancia entre los cambios de temperatura predichos y los experimentales.

Las flechas en el gráfico indican el intervalo durante el cual es válida la relación lineal entre  $\log(\bar{W}/W_0)$  y el tiempo, la cual fue una de las hipótesis planteadas para la obtención de la ecuación (15). Luego de ese período, se inicia el segundo período de velocidad de secado decreciente, en el que no se cumple la misma relación lineal semilogarítmica. Este hecho limitaría la aplicabilidad de la ecuación (15). Sin embargo, cuando se ha llegado al final del período de "línea recta", la temperatura del sólido no difiere mucho de la temperatura de bulbo seco del aire, y desde el punto de vista práctico, el error no es apreciable si la temperatura se predice usando la velocidad de secado del primer período de velocidad decreciente, tal como se observa en la figura 15.

La ausencia de gradientes internos importantes de tem-

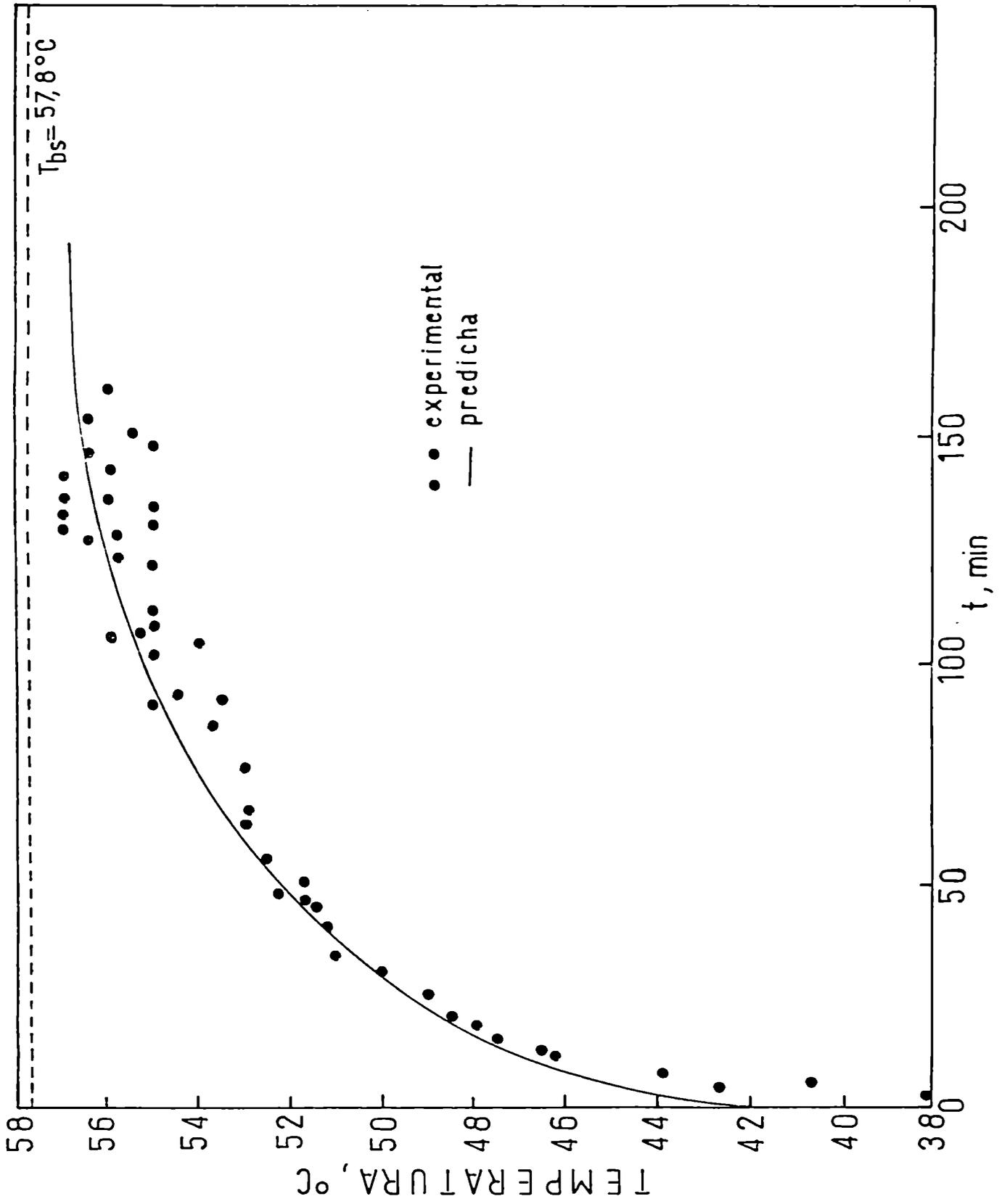


Figura 15 - Comparación de los cambios de temperatura predichos con los experimentales en el secado de palta.

peratura se verificó experimentalmente en el secado de una placa de palta de 0,926 cm de espesor a una temperatura de 57,0°C. No se encontró una diferencia de temperatura significativa entre el "centro" y la "superficie" de la muestra, excepto al comienzo del secado, donde la diferencia máxima entre esos dos puntos fue de 2°C (figura 16). A partir de los treinta y cinco minutos de secado, el gradiente disminuye y prácticamente ambos valores coinciden.

Por otra parte, los valores del criterio de Biot calculados para el secado de placas de palta están comprendidos entre 0,2 y 0,6 (apéndice B). En consecuencia, no son de esperarse gradientes internos importantes de temperatura, ya que la misma puede considerarse uniforme sin demasiado error si el criterio de Biot es menor de 0,1 (Welty, Wicks y Wilson, 1.968).

Los datos encontrados en bibliografía referentes al secado de alimentos también indican la ausencia de gradientes significativos de temperatura dentro del sólido (Vaccarezza y col., 1.974 b; Chirife, 1.971; Jason, 1.958).

Entonces, si bien la ecuación (15) permite la evaluación de los gradientes internos de temperatura, éstos pueden desprejarse. Por otra parte, al principio del secado cuando dichos gradientes son mayores, la temperatura del producto es baja y las reacciones de deterioro no se producen en extensión significativa.

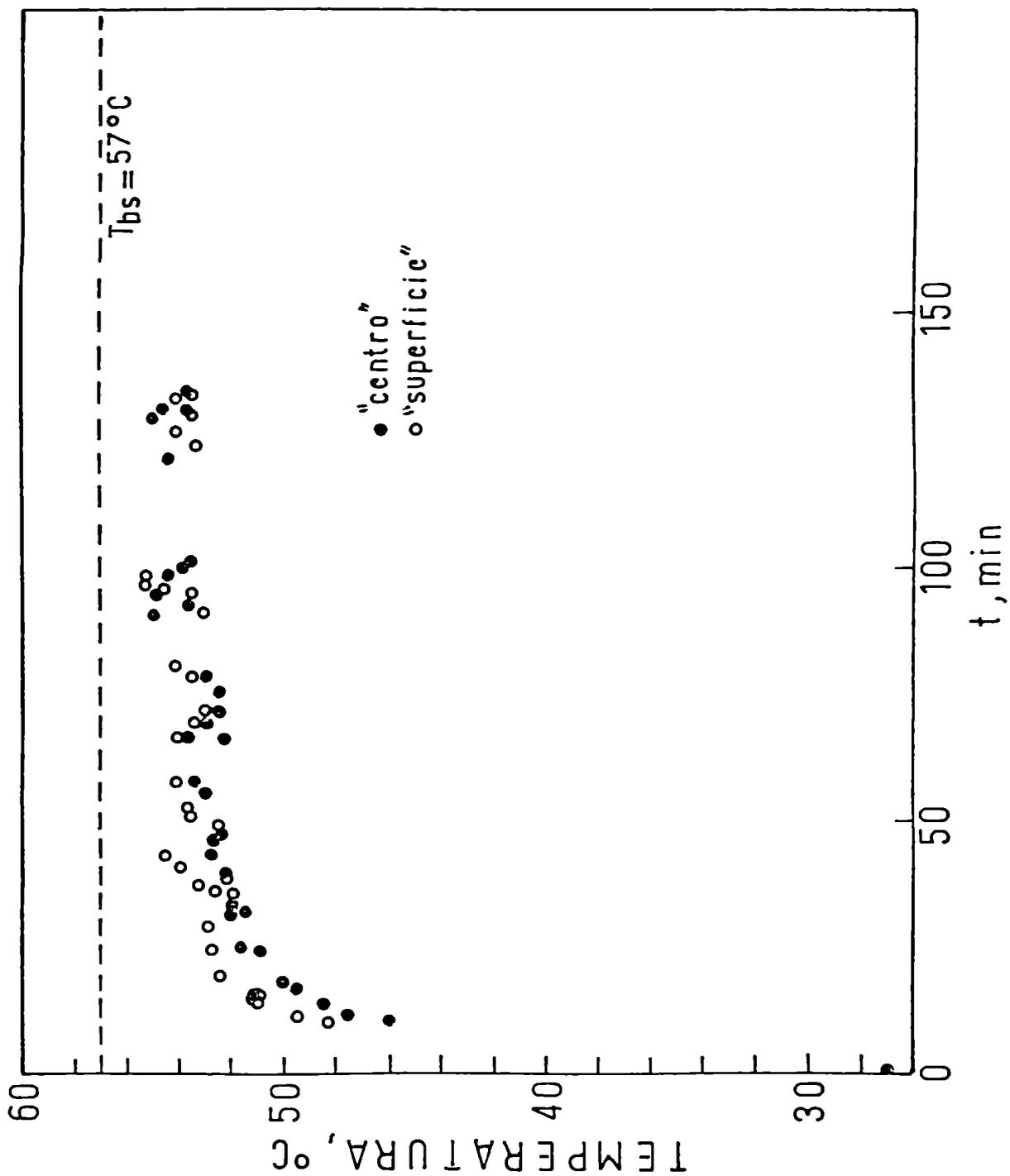


Figura 16 - Temperatura del "centro" y de la "superficie" de una placa de palta deshidratada a 57°C.

Además este período inicial durante el cual se observan las mayores diferencias es corto frente al tiempo total de secado en velocidad decreciente.

IV - 2-4 Análisis de los datos de secado en base a la consideración de la transferencia simultánea de calor y masa.

Dependencia del coeficiente efectivo de difusión con la temperatura

En el análisis previo de los datos de secado, la dependencia del coeficiente de difusión con la temperatura se obtuvo suponiendo que la temperatura de la muestra coincide con la temperatura de bulbo seco del aire. Sin embargo, como se ha mostrado, la temperatura de la placa varía continuamente, siendo siempre menor que la temperatura de bulbo seco del aire.

Se utilizó aquí el modelo desarrollado para predecir la temperatura para calcular una temperatura "promedio" del producto durante el secado, definida como:

$$\bar{T} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} T(t) dt}{t_2 - t_1}$$

donde  $(t_2 - t_1)$  es el intervalo de tiempo en el cual se determina la pendiente  $m$  y  $T(t)$  es la temperatura instantánea de la muestra calculada mediante la ecuación (15).

Los coeficientes efectivos de difusión se representaron gráficamente en la figura 17 como  $\log D_{ef}$  versus la inversa de la temperatura promedio de la muestra  $1/\bar{T}$ . La energía de activación para la difusión se recalculó en la forma usual y se obtuvo el valor:

$$E_a = 9,9 \pm 1,3 \text{ Kcal/mol}$$

Este valor no difiere mucho del obtenido sin tener en cuenta la variación de la temperatura de la placa, pero se obtiene una mejor correlación de los datos, tal como lo sugiere el error menor en la energía de activación.

#### Dependencia de la velocidad de secado con el espesor

La relación entre la pendiente  $m$  y el espesor inicial  $L_0$  se obtuvo considerando que la temperatura de las placas de diferentes espesores fue esencialmente la misma, ya que todas las muestras fueron secadas a la misma temperatura de bulbo seco del aire. Pero como ya ha sido demostrado por Vaccarezza y Chirife (1.978) la historia de la temperatura de la placa depende de su espesor: a mayor espesor inicial mayor es la temperatura alcanzada por la muestra a un dado valor de humedad para la misma temperatura de bulbo seco. Este fenómeno influencia la relación entre la velocidad de se-

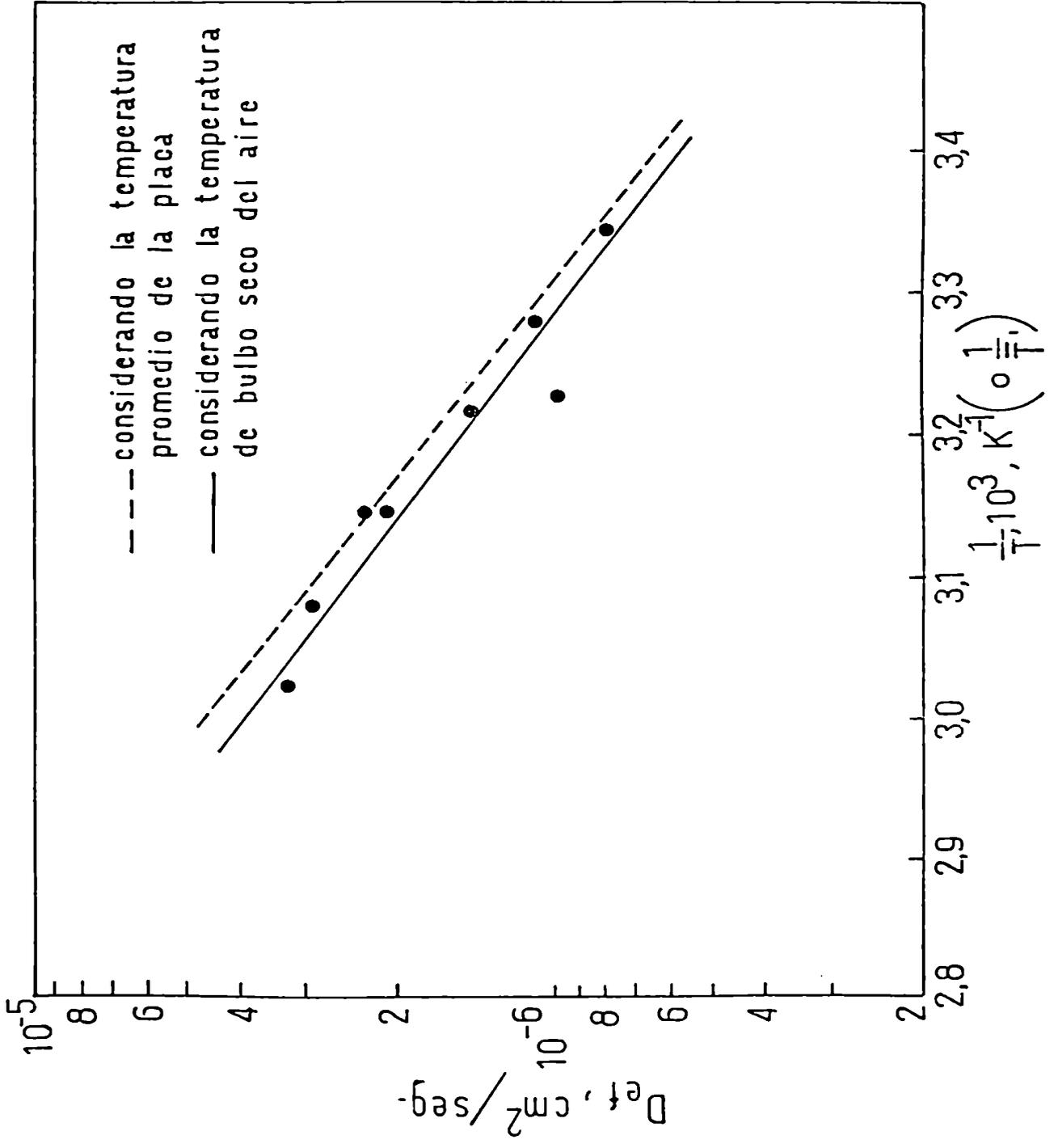


Figura 17 - Efecto de la temperatura de bulbo seco del aire y de la temperatura de la muestra en el coeficiente efectivo de difusión del agua.

cado y el espesor de la muestra.

La pendiente  $m$  es proporcional al coeficiente de difusión efectivo y éste a su vez depende de la temperatura a través de la ecuación de Arrhenius. Entonces  $m$  no sólo está afectada por el espesor sino también por la temperatura.

Este hecho puede ser tenido en cuenta definiendo un factor  $f$  (Vaccarezza y Chirife, 1.978):

$$f = \frac{D_{ef} (a T=T_{bs})}{\bar{D}_{ef}}$$

donde

$$\bar{D}_{ef} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} D_{ef}(T=g(t)) dt}{t_2 - t_1}$$

y  $T=g(t)$  es la temperatura instantánea de la muestra predicha por la ecuación (15).

Con este procedimiento es posible tener en cuenta las distintas temperaturas de las placas de diferente espesor. Para evaluar entonces adecuadamente la dependencia de  $m$  con el espesor se representó gráficamente  $\log(m f)$  versus  $\log L_0$  en la figura 18. Por análisis de regresión lineal se obtuvo ahora la

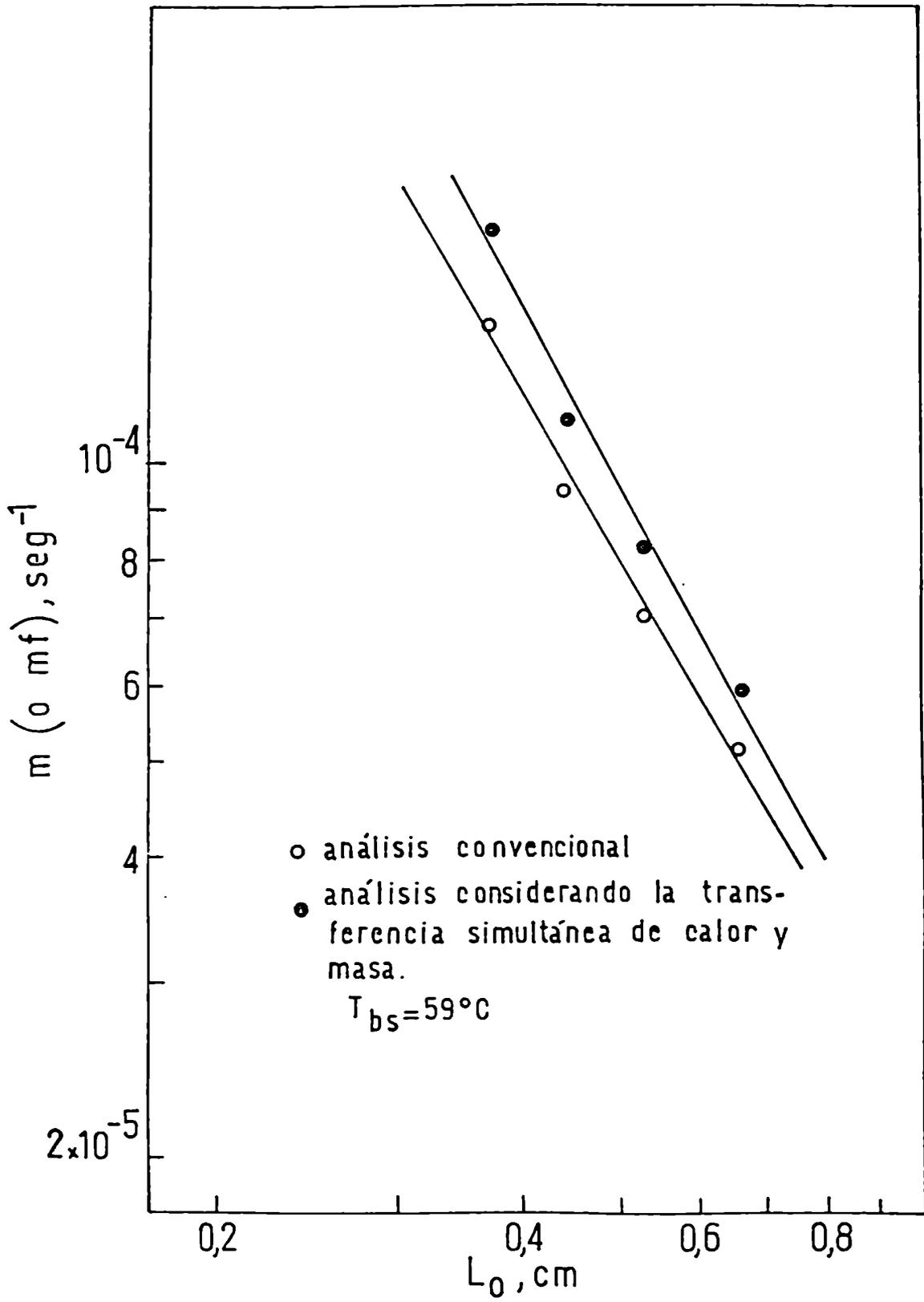


Figura 18 - Efecto del espesor inicial en la velocidad de secado de palta.

siguiente expresión:

$$m = 2,70 \cdot 10^{-5} L_0^{-1,81}$$

#### IV - 2-5 Conclusiones

Si bien no se resolvieron rigurosamente las ecuaciones de calor y masa acopladas, el modelo semiempírico desarrollado permite una representación bastante aproximada de los datos experimentales de temperatura-tiempo.

Los resultados también muestran que el análisis de los datos de secado a través de la ley de Fick puede mejorarse considerando el cambio de la temperatura de la muestra. Pero también puede concluirse desde un punto de vista práctico que el análisis comúnmente realizado en el área de deshidratación de alimentos (esto es, sin tener en cuenta la variación de la temperatura con el tiempo) no conduce a un error muy importante en la evaluación de la energía de activación y en la dependencia de la velocidad de secado con el espesor.

## V - PREDICCIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DURANTE LA DESHIDRATACIÓN DE VEGETALES EN CORRIENTE DE AIRE

### V - 1 Introducción

Durante el secado de un alimento se producen una serie de fenómenos que afectan adversamente la calidad y el valor nutricional del producto final. Entre ellos se puede mencionar: pérdida de aromas, destrucción de la semipermeabilidad de membranas, reacciones químicas de deterioro: pardeamiento no enzimático, destrucción de vitaminas y pigmentos, oxidación de lípidos, desarrollo de aromas desagradables, etc.

La cinética de dichos fenómenos es función de la temperatura y del contenido de humedad del alimento durante su deshidratación (Labuza, 1.972; Aguilera y col., 1.975; Wanninger, 1.972; Denison y Kirk, 1.978; Riemer y Karel, 1.977). Por esta razón es importante conocer la evolución de humedad y temperatura en el alimento en función del tiempo de secado y así poder predecir la pérdida de nutrientes y el deterioro de la calidad (Labuza, 1.972; Aguilera y col., 1.975; Saguy y col., 1.978).

Con miras a este objetivo, se analiza en este capítulo la validez del modelo de transferencia de calor desarrollado en capítulo anterior, aplicándolo a diversos vegetales.

V - 2 Predicción de la evolución de la temperatura. Límites de aplicabilidad del modelo

La figura 19 muestra los valores de  $\log(\bar{W}/W_0)$  versus tiempo para una placa de papa de 0,528 cm de espesor inicial secada a 68°C. Se observa una porción recta y luego los datos se desvían de la relación lineal. La pendiente de la zona recta se utilizó luego conjuntamente con las propiedades físicas y térmicas de la papa fresca para predecir la evolución de la temperatura usando la ecuación (15). Dichas propiedades se obtuvieron de la literatura (Dickerson, 1.968; Rha, 1.975). Los resultados aparecen en la figura 20. Puede observarse un ajuste razonable entre las temperaturas experimentales y las predichas. Lo mismo que en el caso de la palta, la predicción de la temperatura es satisfactoria más allá del final del período de línea recta, el que en este caso se extiende hasta aproximadamente sesenta minutos del secado.

En la figura 21 se representó la evolución de la temperatura experimental de una placa de remolacha azucarera de 1,081 cm de espesor inicial secada a una temperatura de bulbo seco de 81°C, obtenida por Vaccarezza (1.975), y se la comparó con la temperatura predicha en base a la ecuación (15). Las propiedades térmicas de la remolacha azucarera usadas son las reportadas por Dickerson (1.968).

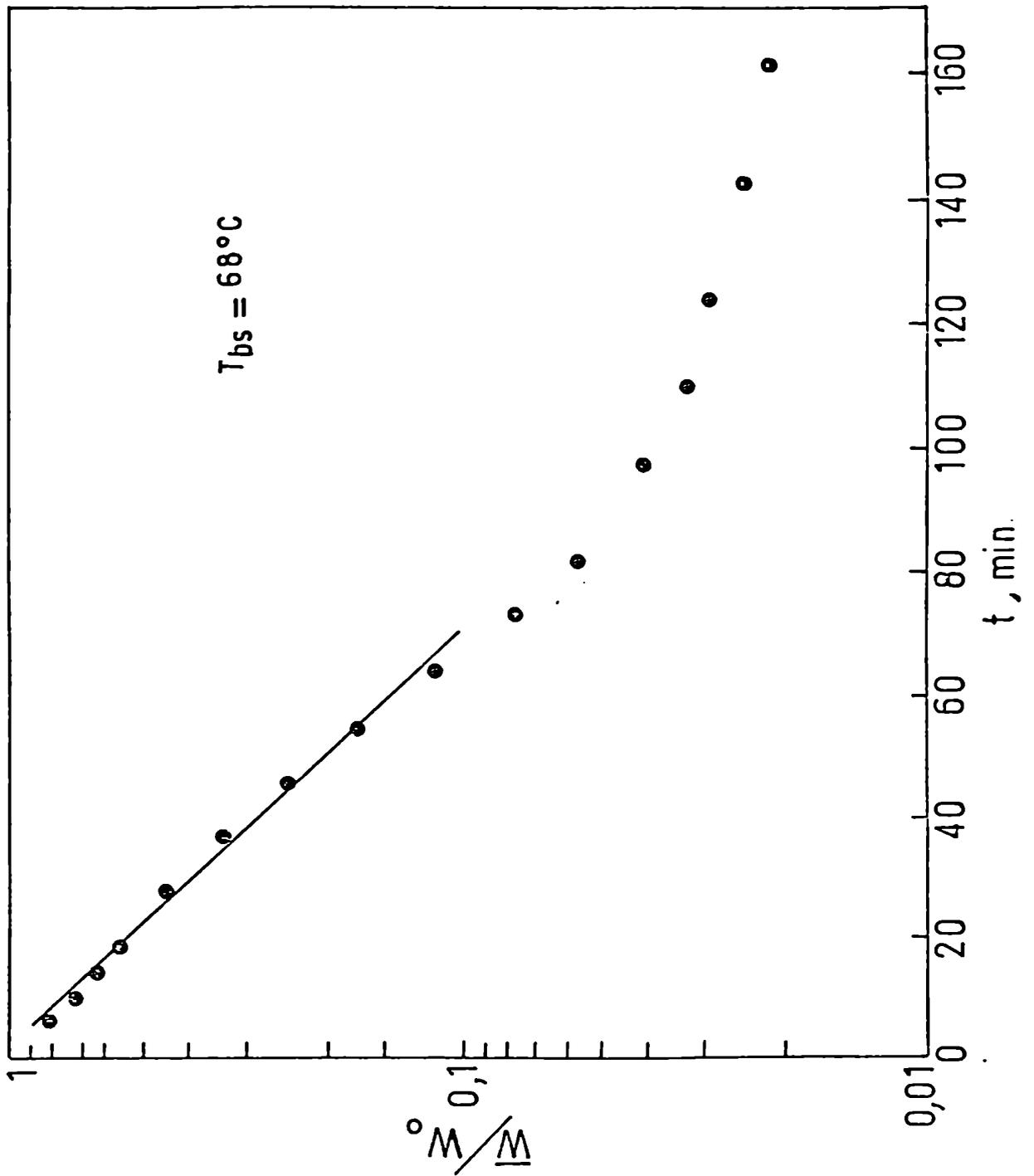


Figura 19 - Curva de secado de una placa de papa.

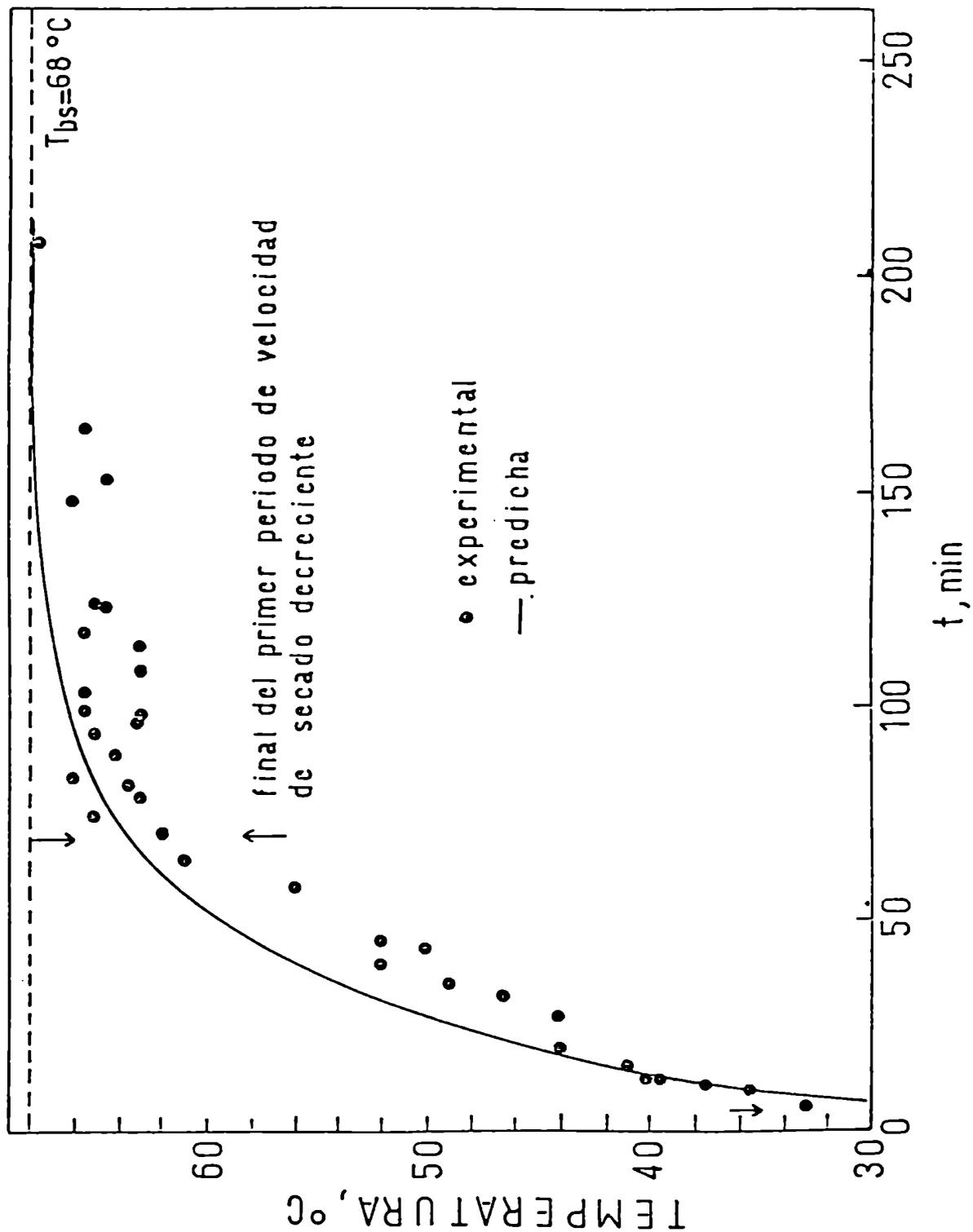


Figura 20 - Comparación de la evolución de la temperatura predicha y experimental en el secado de papa.

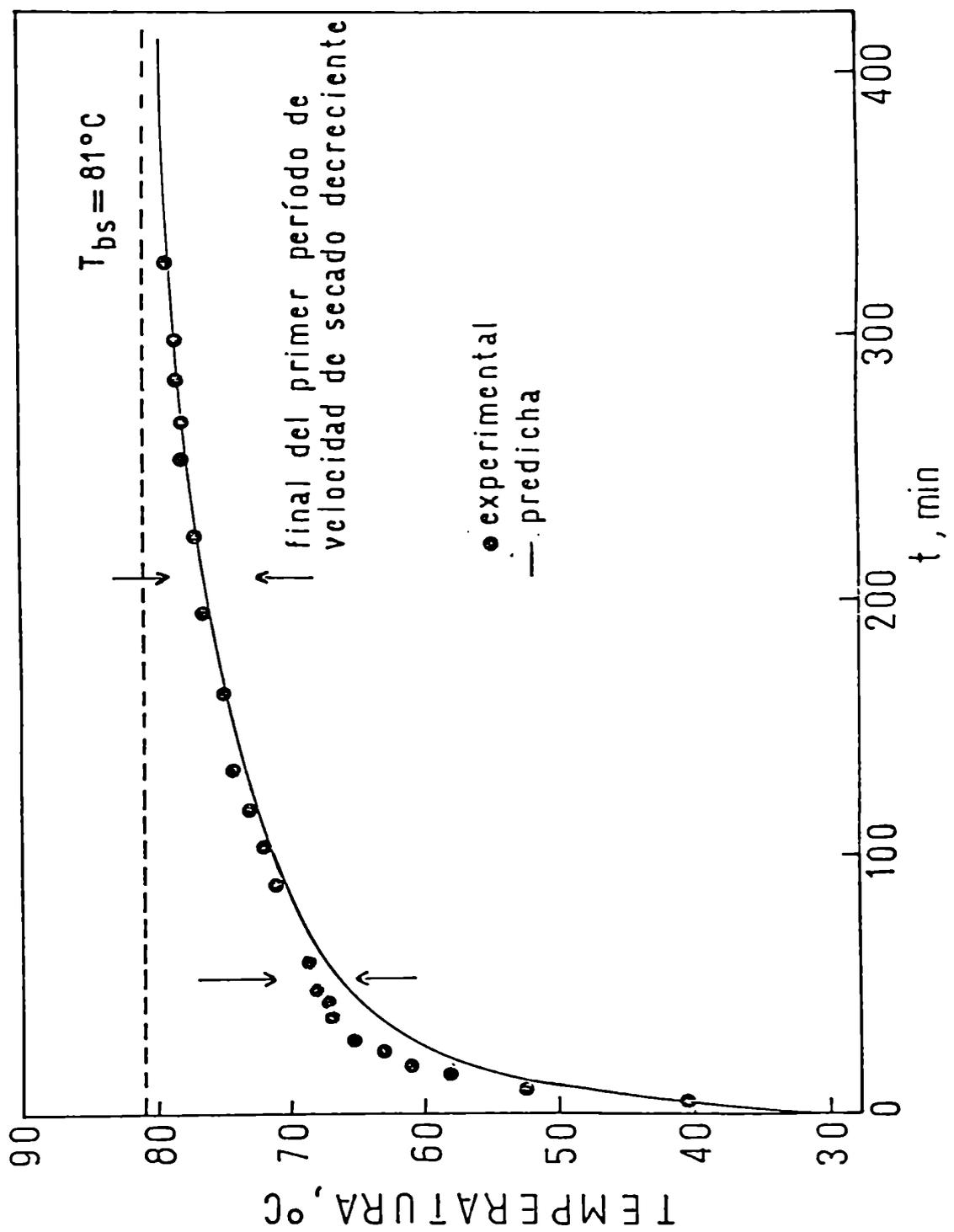


Figura 21 - Comparación de la evolución de la temperatura predicha y experimental en el secado de remolacha azucarera.

La figura 22 muestra en coordenadas semilogarítmicas la relación  $\bar{W}/W_0$  versus tiempo para una placa de manzana. Puede observarse que la curva de secado de esta fruta presenta dos segmentos lineales de diferente pendiente. Esta variación se traduce en el comportamiento presentado por la temperatura experimental, como puede verse en la figura 23, en donde hay una discontinuidad en la curva de evolución de la temperatura justamente en el momento en que se produce el cambio en la pendiente de la recta de secado.

La temperatura se predijo para este caso de dos maneras diferentes: sin tener en cuenta la variación de la pendiente en la curva de secado, obteniéndose así la curva discontinua de la figura 23, y luego, considerando dicha variación, esto es, adoptando nuevos valores de los parámetros  $T_0$ ,  $m'$  y  $u_0$  a partir del punto de discontinuidad. De esta última forma se logra un mejor ajuste a la curva experimental.

### V - 3 Análisis de la influencia del valor de las propiedades térmicas en la predicción de la temperatura

Todas las predicciones anteriores se realizaron utilizando los valores de  $k$ ,  $c_p$  y  $\rho$  correspondientes a los alimentos frescos. En este punto es importante reconocer que dichas propiedades son función de la humedad y de la temperatura y varia-

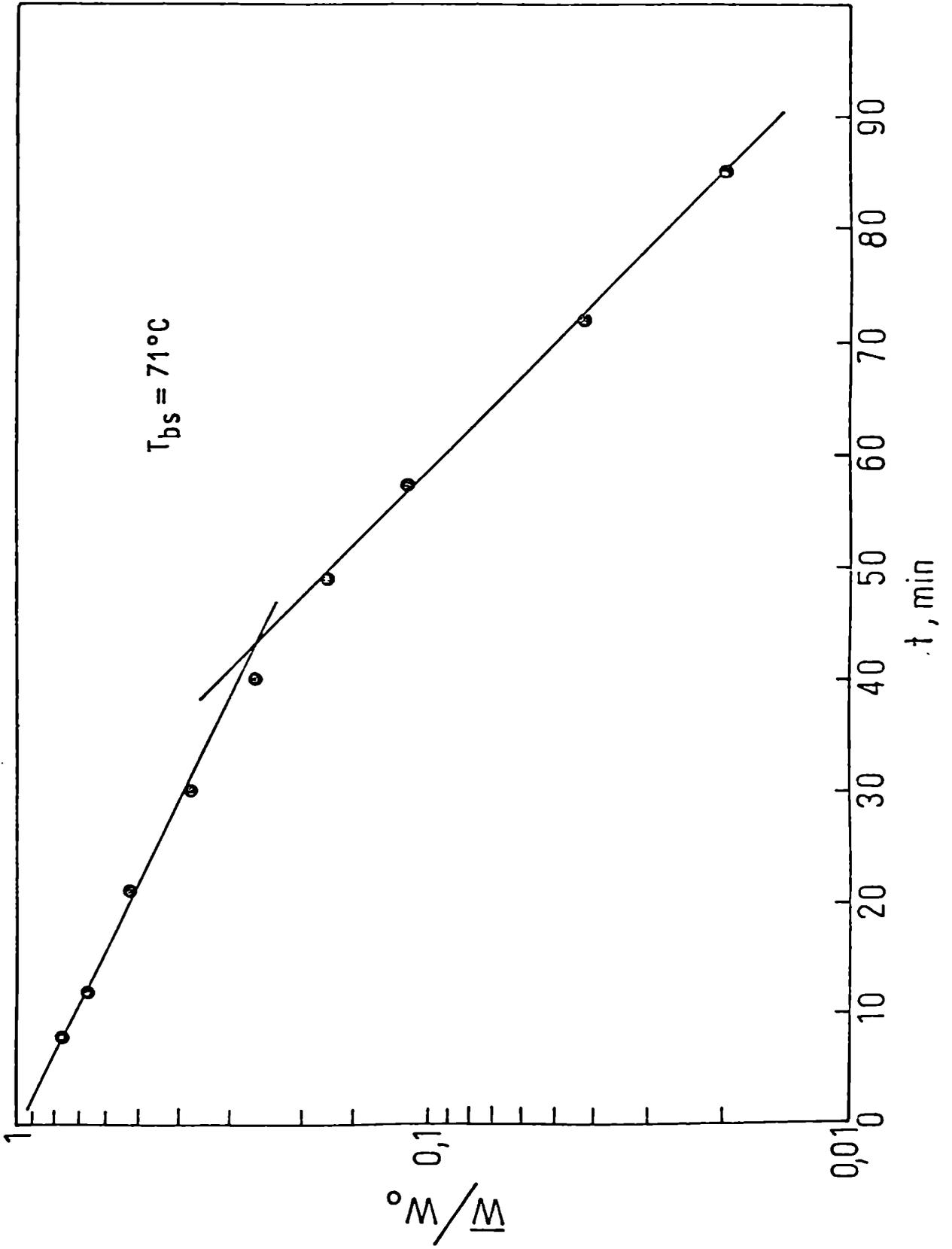


Figura 22 - Curva de secado de una placa de manzana.

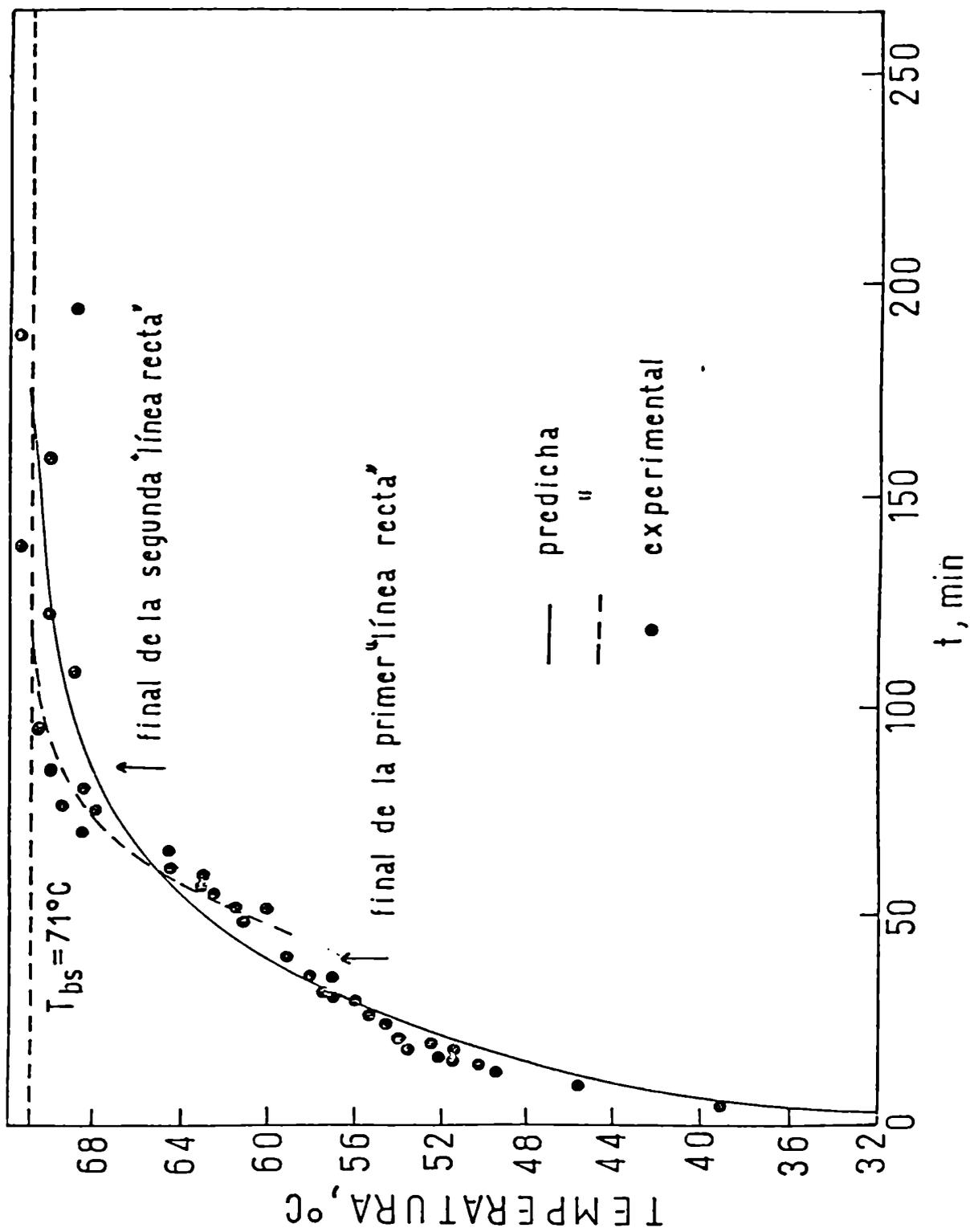


Figura 23 - Comparación de la evolución de la temperatura experimental y predicha en el secado de manzana.

rán en consecuencia durante el secado. Dado que dichas propiedades aparecen en la ecuación (15) se introduciría un error al no tener en cuenta su variación.

Para estimar la sensibilidad paramétrica de la ecuación (15) a las variaciones de  $k$ ,  $c_p$  y  $\rho$  se comparó en la figura 24 la evolución de la temperatura predicha usando las propiedades térmicas de la palta fresca y las correspondientes a la palta "seca" (obtenidas de Chokyun Rha, 1.975). Se observa que ambas curvas difieren en no más de 1°C en los primeros treinta minutos para hacerse luego coincidentes.

La escasa sensibilidad de la ecuación (15) a cambios tan radicales de las propiedades térmicas surge del análisis de los términos de la misma. Para los valores numéricos de los parámetros encontrados normalmente en el secado de placas de vegetales, la temperatura de los mismos está determinada fundamentalmente por la velocidad de evaporación. De hecho, el coeficiente de la exponencial del segundo término de la ecuación (15) es la pendiente de la curva de secado, y los términos restantes, a través de los cuales influirían más las diferencias en las propiedades térmicas, sólo son significativos al comienzo del secado para números de Fourier bajos, que es precisamente donde se observan las mayores discrepancias.

Además, para criterios de Biot pequeños (en las expe-

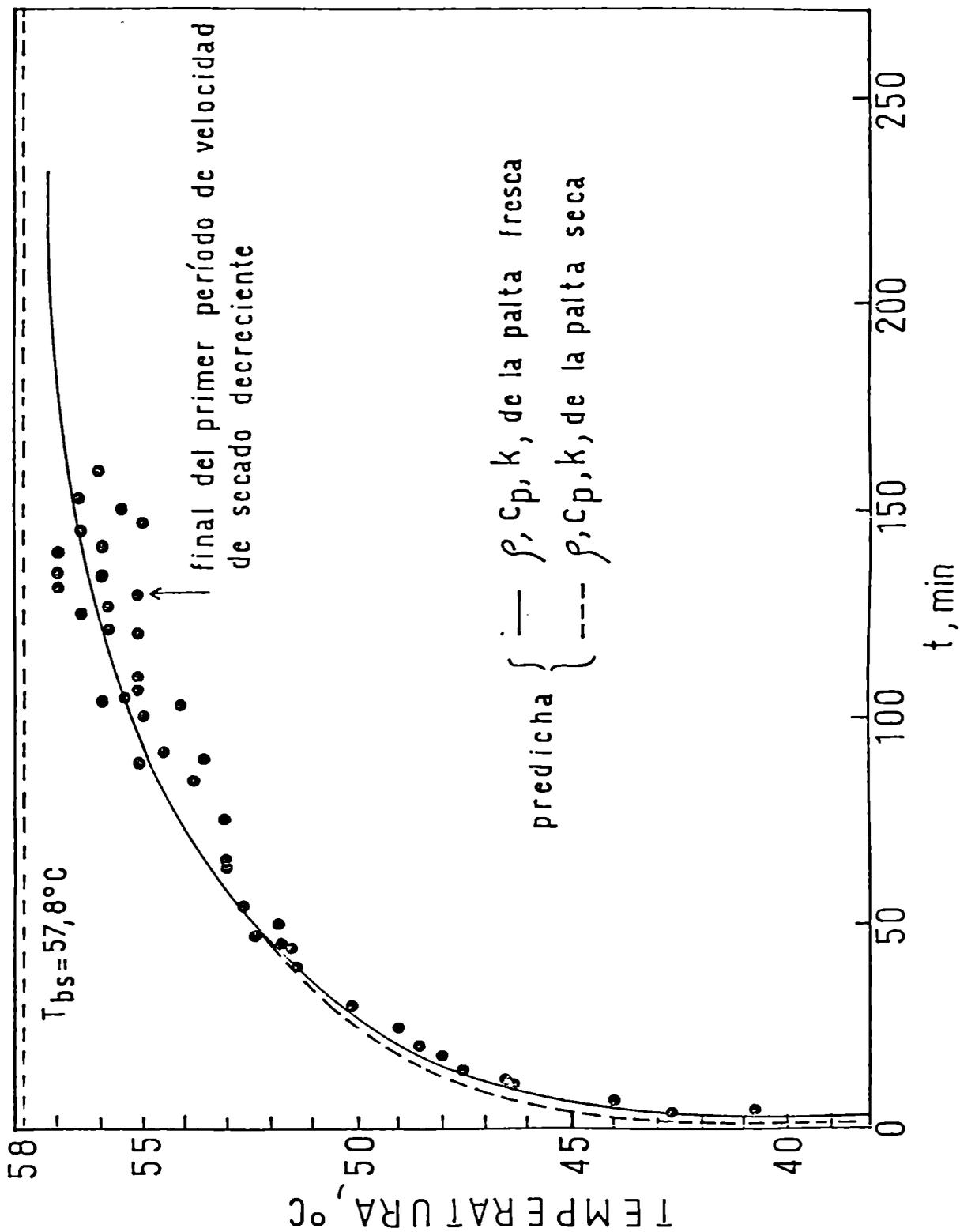


Figura 24 - Efecto de las variaciones de  $\rho$ ,  $k$  y  $c_p$  en la predicción de la temperatura durante la deshidratación.

riencias de deshidratación llevadas a cabo en este trabajo sus valores oscilan entre 0,2 y 0,6), todos los términos de la serie son despreciables frente al primero, aún para números de Fourier bajos, ya que  $\mu_n \rightarrow (n-1)\pi$  y por lo tanto  $A_n \rightarrow 0$ , con excepción de  $A_1$  que tiende a 1.

El cálculo de la evolución de la temperatura requiere el conocimiento del coeficiente de transferencia de calor,  $h$ , la conductividad térmica,  $k$ , y la capacidad calorífica,  $\rho$  cp.

El coeficiente de transferencia pelicular puede obtenerse a partir de las correlaciones de la literatura. No resulta tan fácil, sin embargo, el conocimiento de los demás parámetros, ya que no existen muchos datos experimentales de propiedades térmicas de alimentos. Con miras a solucionar esta dificultad, el análisis anterior induce a suponer que podría adoptarse una propiedad térmica "universal" para caracterizar a cualquier vegetal, y así simplificar la predicción de la evolución de la temperatura durante el secado.

Esta observación se verificó en la siguiente forma. Rha (1.975) ha reportado valores de  $\rho$ , cp y  $k$  para un gran número de frutas y vegetales. La tabla 6 muestra el valor promedio de los mismos calculados en base a dichos datos, conjuntamente con los valores máximo y mínimo.

Luego se procedió a simular la evolución de la tempera-

TABLA 6

	valor promedio	valor máximo	valor mínimo
calor específico cp (cal/g °C)	0,89	0,95	0,72
densidad $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,94	1,10	0,88
conductividad térmica k (cal/cm seg °C)	$1,12 \cdot 10^{-3}$	$1,91 \cdot 10^{-3}$	$0,58 \cdot 10^{-3}$

tura adoptando un valor arbitrario de la constante cinética de secado y diferentes combinaciones de los valores extremos (altos y bajos) de  $\rho$ ,  $k$  y  $c_p$ . Dichas combinaciones se hicieron en forma tal de generar los valores máximos y mínimos posibles de los criterios de Biot y Predvoditelev. Los resultados se representaron en la figura 25, la cual ilustra sobre la diferencia a esperar en la predicción de la temperatura cuando se consideran valores diferentes de las propiedades térmicas del alimento. Puede notarse que la diferencia entre las curvas predichas (caso 1 y caso 2) disminuye rápidamente con el tiempo de secado; así, la diferencia en la predicción de la temperatura a los cincuenta minutos del secado (aproximadamente un 20% del tiempo total de secado) es de sólo 2°C.

#### V - 4 Conclusiones

El modelo semiempírico planteado permite predecir analíticamente en forma aproximada la evolución de la temperatura durante la deshidratación de vegetales en corriente de aire.

El error cometido en la predicción no es grande si no se tiene en cuenta el efecto de la variación de las propiedades físicas  $\rho$ ,  $k$  y  $c_p$  durante el secado.

Surge además la posibilidad de utilizar una propiedad térmica "promedio" cuando no se dispone de los valores apropiados y así poder predecir la temperatura a partir del sólo conocimiento de la curva experimental de secado.

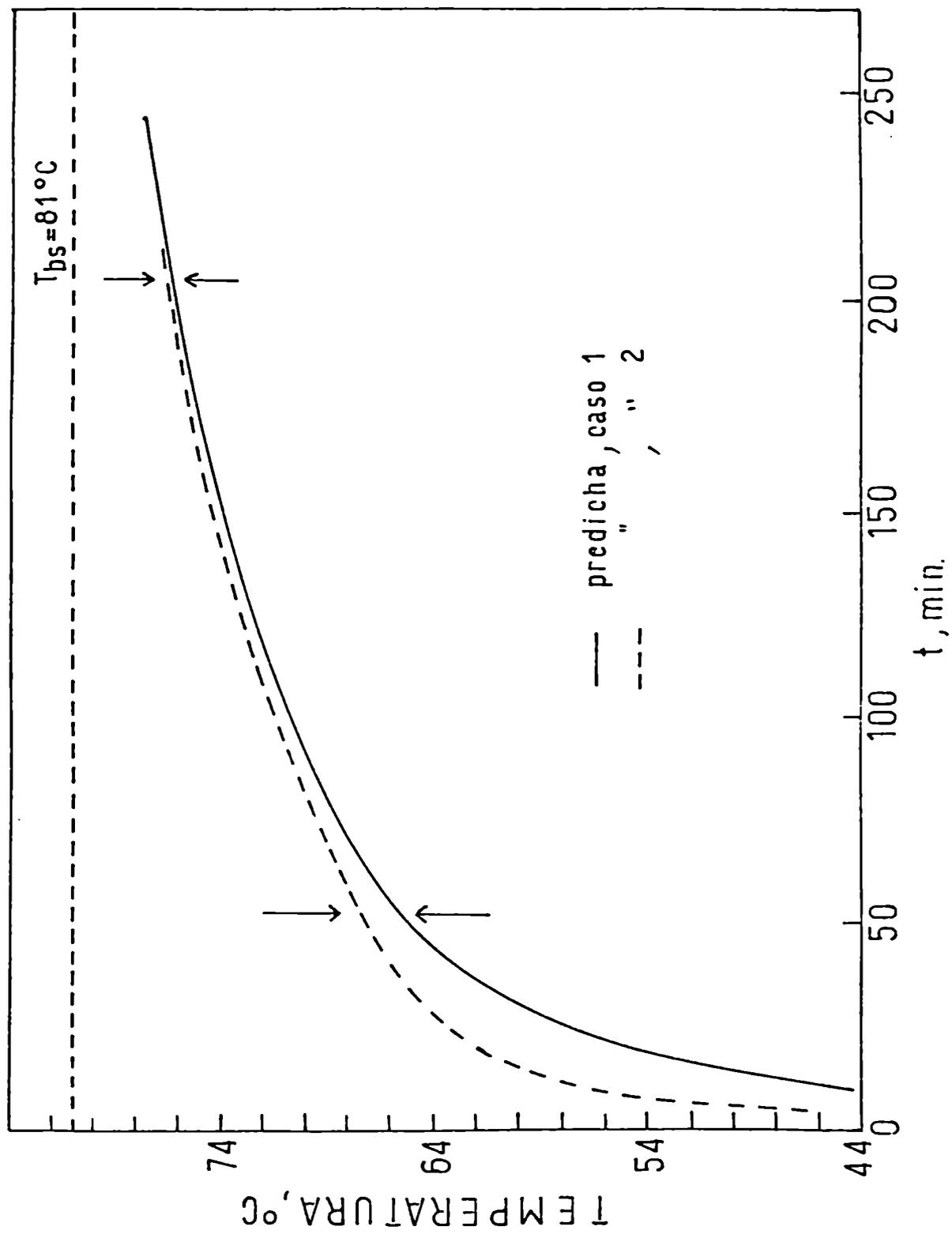


Figura 25 - Evolución de la temperatura calculada a partir de los valores extremos de las propiedades térmicas.

VI - CONCLUSIONES GENERALES

a) Se determinó el efecto de diversas variables y pre-tratamientos en la velocidad de secado de palta.

b) Se demostró que se puede utilizar la ley de Fick para interpretar la cinética de secado y se calculó el coeficiente de difusión correlacionándolo con las diversas variables que lo afectan.

c) Se planteó un modelo cuantitativo que permite predecir la evolución de la temperatura de la palta durante el secado.

d) Se demostró cómo el análisis de los datos de secado de palta a través de la ley de Fick se puede mejorar considerando la transferencia de calor simultánea que ocurre.

e) Generalizando los resultados del punto (c) se planteó un modelo para predecir la evolución de la temperatura durante la deshidratación de vegetales en general.



VII - APENDICES

APENDICE A

Cálculo del criterio de Biot de masa

El criterio de Biot de masa para una placa que se deshidrata y en la cual hay encogimiento durante el secado se define como (Hartley y Crank, 1.949):

$$Bi_m = \frac{kg L_s}{2 D_{A)B} M \rho_s}$$

donde  $D_{A)B}$  está dado por la expresión

$$D_{A)B} = D_{ef} (L_s/L_o)^2$$

Los valores extremos de la pendiente de la isoterma de adsorción,  $M$ , calculada para una humedad relativa del 5%, y de los coeficientes de difusión efectivos,  $D_{ef}$ , fueron, de acuerdo a la temperatura de trabajo:

$$D_{ef}(60^\circ C) = 1,786 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{seg.}$$

$$D_{ef}(25^\circ C) = 0,818 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{seg.}$$

$$M(60^\circ C) = 0,473 \text{ gH}_2\text{O/gMS atm.}$$

$$M(25^\circ C) = 4,792 \text{ gH}_2\text{O/gMS atm.}$$

Los valores de los espesores usuales en las condiciones de trabajo fueron:

$$L_o = 0,371 \text{ cm}$$

$$L_s = 0,104 \text{ cm}$$

$$L_o = 0,659 \text{ cm}$$

$$L_s = 0,252 \text{ cm}$$

La densidad del material seco,  $\rho_s$ , se tomó igual a  $1,4 \text{ g/cm}^3$ .

El coeficiente de transferencia de materia en la película gaseosa,  $k_g$ , se calculó a partir de la correlación para sistemas aire-agua:

$$\frac{h}{k_y} = 0,227$$

donde  $k_y$  está vinculado a su vez a  $k_g$  a través de la expresión:

$$k_g M_B p_{BM} = k_y$$

donde  $M_B$  = peso molecular del aire.

$p_{BM}$  = variación de presión medio logarítmica del aire en la película.

El valor de  $k_g$  calculado a  $60^\circ\text{C}$  de acuerdo a la expresión anterior fue:

$$k_g = 3,56 \cdot 10^{-3} \text{ gH}_2\text{O/atm seg cm}^2.$$

Como su variación con la temperatura no es apreciable, se lo conside-

ró constante en el rango de temperaturas de trabajo.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores el criterio de Biot tomó valores entre 278 y 783.

## APENDICE B

### Cálculo del criterio de Biot de calor

El criterio de Biot de calor está dado por la expresión:

$$Bi = \frac{h L_o}{2 k}$$

donde  $k = 1,3 \cdot 10^{-3}$  cal/seg  $cm^2 \text{ } ^\circ C$  para la palta y los valores de  $L_o$  con los que se trabajó están en el rango de 0,300 á 0,926 cm.

El coeficiente pelicular de transferencia de calor se calculó a partir de la correlación para una placa de longitud  $l$  en condiciones de flujo laminar (Welty, Wicks y Wilson, 1.969):

$$Nu = h l / k_a = 0,66 Re^{1/2} Pr^{1/3}$$

obteniéndose el valor

$$h = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ cal/seg } cm^2 \text{ } ^\circ C$$

De acuerdo a estos parámetros, el criterio de Biot adoptó valores entre 0,20 y 0,60.

VIII - NOMENCLATURA

A = área de evaporación,  $\text{cm}^2$ .

a = difusividad térmica,  $k/\rho c_p$ ,  $\text{cm}^2/\text{seg}$ .

A<sub>w</sub> = actividad del agua.

A<sub>n</sub> = función del criterio de Biot de calor,

$$(-1)^{n+1} 2Bi(Bi^2 + \mu_n^2)^{1/2} / \mu_n (Bi^2 + Bi + \mu_n^2), \text{ adimensional.}$$

Bi = criterio de Biot de calor,  $h L_o / 2k$ , adimensional.

Bi<sub>m</sub> = criterio de Biot de masa,  $kg L_s / 2 D_{A)B} M \rho_s$ , adimensional.

c<sub>p</sub> = calor específico,  $\text{cal/g } ^\circ\text{C}$ .

D<sub>A)B</sub> = coeficiente de difusión de A, marco de referencia fijo a B,  
 $\text{cm}^2/\text{seg}$ .

D<sub>ef</sub> = coeficiente de difusión efectivo,  $\text{cm}^2/\text{seg}$ .

D<sub>∞</sub> = coeficiente de difusión específico,  $\text{cm}^2/\text{seg}$ .

E<sub>a</sub> = energía de activación para la difusión de agua,  $\text{Kcal/mol}$ .

F<sub>o</sub> = número de Fourier,  $4 a t / L_o^2$ , adimensional.

h = coeficiente de transferencia de calor,  $\text{cal/cm}^2 ^\circ\text{C seg}$ .

k = conductividad térmica del vegetal,  $\text{cal/cm seg } ^\circ\text{C}$ .

k<sub>a</sub> = conductividad térmica del aire,  $\text{cal/cm seg } ^\circ\text{C}$ .

kg = coeficiente pelicular de transferencia de masa,  
 $\text{gH}_2\text{O/cm}^2 \text{seg atm}$ .

L<sub>o</sub> = espesor inicial de la placa,  $\text{cm}$ .

L<sub>s</sub> = espesor de la placa seca,  $\text{cm}$ .

m = pendiente de las líneas rectas experimentales,  $\log(\bar{w}/w_o)$

- versus  $t$ ,  $\text{minuto}^{-1}$ .
- $m'$  = pendiente de las líneas rectas experimentales,  $\ln(\bar{W}/W_0)$  versus  $t$ ,  $\text{segundo}^{-1}$ .
- $M$  = pendiente de la isoterma de adsorción,  $\text{gH}_2\text{O}/\text{gMS atm}$ .
- $MS$  = masa del material seco, g.
- $Pd$  = criterio de Predvoditelev,  $m' L_0/4 a$ , adimensional.
- $T$  = temperatura de la muestra,  $^{\circ}\text{C}$ .
- $T'$  = temperatura de la muestra,  $^{\circ}\text{K}$ .
- $T_{bs}$  = temperatura de bulbo seco del aire,  $^{\circ}\text{C}$ .
- $T'_{bs}$  = temperatura de bulbo seco del aire,  $^{\circ}\text{K}$ .
- $T_0$  = temperatura inicial de la muestra,  $^{\circ}\text{C}$ .
- $t$  = tiempo, minutos.
- $u$  = velocidad de evaporación,  $\text{gH}_2\text{O}/\text{cm}^2\text{seg}$ .
- $u_0$  = velocidad de evaporación a  $t=0$ ,  $\text{gH}_2\text{O}/\text{cm}^2\text{seg}$ .
- $W$  = humedad local de la muestra, base seca,  $\text{gH}_2\text{O}/\text{gMS}$ .
- $\bar{W}$  = humedad promedio de la muestra, base seca,  $\text{gH}_2\text{O}/\text{gMS}$ .
- $W_0$  = humedad inicial de la muestra, base seca,  $\text{gH}_2\text{O}/\text{gMS}$ .
- $\bar{W}_c$  = humedad crítica de la muestra, base seca,  $\text{gH}_2\text{O}/\text{gMS}$ .
- $W_e$  = humedad de equilibrio de la muestra, base seca,  $\text{gH}_2\text{O}/\text{gMS}$ .
- $X$  = contenido porcentual de humedad, base húmeda,  
 $\text{gH}_2\text{O}/100(\text{gH}_2\text{O}+\text{gMS})$ .
- $Y$  = contenido porcentual de aceite, base húmeda,  
 $\text{g aceite}/100(\text{gH}_2\text{O}+\text{gMS})$ .

$\rho$  = densidad inicial, g/cm<sup>3</sup>.

$\rho_s$  = densidad del material seco, g/cm<sup>3</sup>.

$\lambda$  = calor latente de vaporización, cal/g.

$f_n$  = función del criterio de Biot de calor,

$\cot f_n = (1/Bi) f_n$ , adimensional.

$\theta_{wb} = u_o \lambda / h(T_{bs} - T_o)$ , adimensional.

$\sigma$  = ordenada al origen de las líneas rectas experimentales,

$\ln(\bar{W}/W_o)$  versus  $t$ , adimensional.

IX - REFERENCIAS

- AGUILERA, J.M.; CHIRIFE, J.; FLINK, J.M.; KAREL, M. (1.975) - "Computer simulation of non-enzymatic browning during potato dehydration", *Lebensm. - Wiss. - u - Technol.* 8, 128.
- BECKER, H.A.; SALLANS, H.R. (1.955) - "A study of internal moisture movement in the drying of the wheat kernel", *Cereal Chemistry*, 32, 212.
- BERTONI, M.H.; KARMAN de SUTTON, G.; CATTANEO, P. (1.967) - "Estudio sobre paltas argentinas", *Anales Asoc. Quím. Argentina*, 55, 257.
- CEAGLSKE, N.H.; HUGGEN, D.A. (1.937) - "Drying granular solids", *I & E.C.*, 29, 805.
- CRANK, J. (1.956) - "The mathematics of diffusion", Oxford University Press, 1ª edición.
- CRUESS, W.V.; GIBSON, A.; BREKKE, J. (1.951) - "Avocado products experiments", *Canner*, 112/2, 11.
- CHEN, C.S.; JOHNSON, W.H. (1.969 a) - "Kinetics of moisture movement in hygroscopic materials. I- Theoretical considerations of drying phenomena", *Trans. of the ASAE*, 12, 109.
- CHEN, C.S.; JOHNSON, W.H. (1.969 b) - "Kinetics of moisture movement in hygroscopic materials. II- An application to foliar materials", *Trans. of the ASAE*, 12, 478.

- CHEN, E.C. (1.975) - "The influence of freezing-thawing on the stability of crude oil-in-water emulsions", J. of Can. Petroleum Technology, abril-junio.
- CHATFIELD, C; ADAMS, G. (1.940) - "Proximate composition of American food materials".
- CHIRIFE, J.; CACHERO, R.A. (1.970) - "Through-circulation drying of tapioca root", J. Food Sci., 35, 364.
- CHIRIFE, J. (1.971) - "Diffusion process in drying of tapioca root", J. Food Sci., 36, 327.
- CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H.A. (1.978) - "Equations for fitting water sorption isotherms of foods: Part I- A review", J. Food Technology, 13, 159.
- CHIRIFE, J. (1.979) - "Fundamentals of drying mechanism during air dehydration of foods", a publicar en "Advances in drying", ed. A.S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Co., New York, USA.
- DEL VALLE, F.R.; NICKERSON, J.T.R. (1.968) - "Salting and drying fish. 3- Diffusion of water", J. Food Sci., 33, 499.
- DENNISON, D.B.; KIRK, J.R. (1.978) - "Oxygen effect on the degradation of ascorbic acid in a dehydrated food system", J. Food Sci., 43, 609.
- DICKERSON, R.W. (1.968) - "Thermal properties of foods" en "The freezing preservation of foods", 4ª edición, vol. 2,

AVI Publishing Co, Westport, Conn., USA.

- EL-ZEFTAWI, B.M. (1.978) - "Physical and chemical changes in fruit of seven avocado cultivars at Mildura", Austr. J. Agric. Res., 29, 81.
- FISH, B.P. (1.958) - "Diffusion and thermodynamics of water in potato starch gel" en "Fundamental aspects of the dehydration of foodstuffs", Soc. for Chem. Ind., London, p. 143.
- GANE, R.; WAGER, H.G. (1.958) - "Plant structure and dehydration" en "Fund. aspects of the dehydration of foodstuffs", p. 3.
- GEJL-HANSEN, F.; FLINK, J.M. (1.977) - "Freeze-dried carbohydrate containing oil-in-water emulsions: microstructure and fat distribution", J. Food Sci., 42, 1.049.
- HARMATHY, T. (1.969) - "Simultaneous moisture and heat transfer in porous systems with particular reference to drying", I&EC Fund., 8, 92.
- HARTLEY, G.S.; CRANK, J. (1.949) - "Some fundamental definitions and concepts in diffusion processes", Trans. Far. Soc., 45, 801.
- HUGHES, J.P. (1.971) - Fmrs. Wkly., S. Afr., p. 61.
- HUSAIN, A.; CHEN, C.S.; CLAYTON, J.T. (1.973) - "Simultaneous heat and mass diffusion in biological materials", J. Agric. Eng. Res., 18, 343.
- JASON, A.C. (1.958) - "A study of evaporation and diffusion processes in the drying of fish muscle" en "Fundamental

- aspects of the dehydration of foodstuffs", Soc. for Chem. Ind., London, p. 103.
- JASON, A.C. (1.965) - "Effects of fat content on diffusion of water in fish muscle", J. Sci. and Food Agric., 16, 281.
- KING, C.J. (1.968) - "Rates of moisture sorption and desorption in porous, dried foodstuffs", Food Technology, 22, 509.
- KISAKUREK, B.; PECK, R.E.; ÇAKALOZ, T. (1.975) - "Generalized drying curves for porous solids", The Can. J. of Chem. Eng., 53, 53.
- KISAKUREK, B.; GEBIZLIOĞLU, O. (1.978) - "Capillary mechanism in drying" en "Proceedings of the First International Symposium on Drying", Mc Gill University, Montreal, Canadá, agosto 3-5, p. 59.
- LABUZA, T.P.; SIMON, I.B. (1.970) - "Surface tension effects during dehydration", Food Technology, 24, 712.
- LABUZA, T.P. (1.972) - "Nutrient losses during drying and storage of the dehydrated foods", CRC Critical Reviews in Food Technology, 3, 217.
- LAWRENCE, J.G.; SCOTT, R.P.W. (1.966) - "Determination of the diffusivity of water in biological tissue", Nature, 210, 301.
- LEWIS, C. (1.978) - "The maturity of avocados. A general review", J. of Sci. and Food Agric., 29, 857.
- LIME, B.J. (1.969) - "Autoxidation of fatty acid lipids and carotene

- of freeze-dried avocado salad", Food Technology, 23, 569.
- LUIKOV, A.V.; MIKHAILOV, Y.A. (1.961) - "Theory of energy and mass transfer", Prentice Hall, 1ª edición.
- LUIKOV, A.V. (1.968) - "Analytical heat diffusion theory", Academic Press, 2ª edición.
- LLADSER, M.; PINAGA, F. (1.975) - "Criodeshidratación de aguacates- I", A.T.A., 15, 547.
- PALUMBO, S.A.; KOMANOWSKY, M.; METZGER, V.; SMITH, J.L. (1.977) - "Kinetics of pepperoni drying", J. of Food Sci., 42, 1.029.
- PEARSON, D. (1.975) - J. of Sci. and Food Agric., 26, 207.
- RHA, C.K. (1.975) - "Theory, determination and control of physical properties of food materials", D. Reidel Publishing Co., 1ª edición.
- RIEMER, J.; KAREL, M. (1.977) - "Shelf-life studies of vitamin C during food storage: prediction of L-ascorbic acid retention in dehydrated tomato juice", J. Food Process. and Preserv., 1, 293.
- ROTSTEIN, E.; NAMOR, M.S.S.; SICA, A.M.; ELUSTONDO, M.P. (1.968) - "Tecnología de la deshidratación de manzanas", Industria y Química, 26, 284.
- ROTSTEIN, E.; CORNISH, R.H. (1.978) - "Influence of cellular membrane permeability on drying behaviour", J. Food Sci., 43,

926.

- ROTSTEIN, E.; CORNISH, R.H. (1.978) - "A transport phenomena analysis of air drying of foodstuffs", en Proceedings of the First International Symposium on Drying", Mc Gill University, Montreal, Canadá, agosto 3-5, p. 24.
- SAGUY, I.; MIZRAHI, S.; VILLOTA, R.; KAREL, M. (1.978) - "Accelerated method for determining the kinetic model of ascorbic acid loss during dehydration", J. Food Sci., 43, 1.861.
- SALAS, F.; LABUZA, T.P. (1.968) - "Surface active agents effects on drying characteristics of model food systems", Food Technology, 22, 1.576.
- SARAVACOS, G.D.; CHARM, S.E. (1.962) - "A study of the mechanism of fruit and vegetable dehydration", Food Technology, 16, 78.
- SHERWOOD, T.K. (1.929 a) - "The drying of solids - I", I&EC, 21, 12.
- SHERWOOD, T.K. (1.929 b) - "The drying of solids - II", I&EC, 21, 976.
- SHERWOOD, T.K. (1.932) - "The drying of solids - IV", I&EC, 24, 307.
- VACCAREZZA, L.M.; LOMBARDI, J.L.; CHIRIFE, J. (1.974 a) - "Kinetics of moisture movement during air drying of sugar beet root", J. Food Technology, 9, 317.
- VACCAREZZA, L.M.; LOMBARDI, J.L.; CHIRIFE, J. (1.974 b) - "Heat transfer effects on drying rate of food dehydration", Can.

J. of Chem. Eng., 52, 576.

VACCAREZZA, L.M. (1.975) - Tesis: "Cinética y mecanismo de transporte del agua durante la deshidratación de remolacha azucarera", Departamento de Industrias, Fac. de Cs. Exactas y Naturales, UBA.

VACCAREZZA, L.M.; CHIRIFE, J. (1.978) - "On the application of Fick's law for the kinetics analysis of air drying of foods", J. Food Sci., 43, 236.

VAN ARSDEL, W.B. (1.963) - "Food dehydration. I- Principles", Avi. Publ. Co., Westport, Conn. .

WANNINGER, L.A. Jr. (1.972) - "Mathematical model predicts stability of ascorbic acid in food products", Food Technology, 26, 42.

WELTY, J.R.; WICKS, C.E.; WILSON, R.E. (1.968) - "Fundamentals of momentum, heat and mass transfer", Wiley & Sons, 1<sup>o</sup> ed. .

WOLF, W.; SPIESS, W.E.L.; JUNG, G (1.972) - "Die wasserdampfsorptionsisothermen einiger, in der Literatur bislang wenig berücksichtigter Lebensmittel", Lebensm.- Wiss. u. Technol., 6, 94.

X - TABLA DE DATOS

.

---

---

FE DE ERRATAS

---

---

## FE DE LIBRATAS

1) Sustituir la figura 13 por la que se adjunta.

2) Cambiar la ecuación que aparece en la página 55 por la siguiente:

$$D_{ef}(60^{\circ}\text{C}) = 1,20 \cdot 10^{-5} - 5,41 \cdot 10^{-7} Y$$

3) ~~Corregir los valores de~~  $D_{ef}$  ~~de aceite que aparecen en la tabla 5 por~~  
los siguientes:

<u><math>D_{ef}</math> (cm<sup>2</sup>/seg)</u>	<u>Observaciones</u>
5,7. 10 <sup>-6</sup>	9,2% de aceite
6,6. 10 <sup>-6</sup>	7,9% " "
10,8. 10 <sup>-6</sup>	4,7% " "

