

**UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA
IZTAPALAPA**

**SECADO DE AMARANTO: SIMULACION Y
MODELADO EN LECHOS FLUIDIZADOS.**

**TESIS QUE PRESENTA:
I. Q. FRANCISCO VIDAL CABALLERO DOMINGUEZ.**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERIA QUIMICA.
JUNIO DE 1999.**

DIVISION DE CIENCIAS BASICAS E INGENIERIA.

**Secado de Amaranto: Simulación y Modelado en Lechos
Fluidizados**

Tesis

**Para Obtener el grado de:
Maestro en Ingeniería química**

Presenta:

Ing. Francisco Vidal Caballero Domínguez.

Director: Dr. Mario Vizcarra Mendoza

Junio 1999.

Universidad Autónoma Metropolitana.

División de Ciencias Básicas e Ingeniería.

AGRADECIMIENTOS.

A **Vidal Caballero (QPD)** y **Fidelía Domínguez**. Mas que padres han sido amigos de toda la vida. Asimismo a todos y cada uno mis familiares, y por supuesto a mi hermano **Sabino Caballero Domínguez**.

A la **ENEP Zaragoza (UNAM)** mi primera escuela a nivel superior.

A la **UAM Iztapalapa** y a todo su equipo de profesionales del Postgrado en Ing. Química y muy especialmente a:

Dr. Mario Vizcarra Mendoza por la dirección e interés al presente trabajo.

Dr. Richard S. Ruiz M. y **M en I. Q. Carlos Martínez V.** Cuyas correcciones y comentarios contribuyeron al presente trabajo. Y obviamente por formar parte del jurado

Al **IPN** y en especial al **Dr. Roberto Limas B.** Por sus observaciones y correcciones. Y por ser parte del jurado.

A mis amigos del laboratorio de fluidización por su ayuda y comprensión.

En todo mi camino académico y laboral he conocido a gente extraordinaria y es grato contar con su amistad. El hecho de mencionar a mis amigos y omitir el nombre de alguno de ellos, sería un error más grave que los que pueda contener el presente trabajo.

A **Ana María Adams**. Por estar siempre a mi lado, mi amor y respeto.

Sinceramente:

Francisco Vidal Caballero Domínguez.

INDICE.

RESUMEN

I.	INTRODUCCION.	1
	I.1 El cultivo del amaranto en el mundo y en México.....	1
	I.2 La operación del secado.....	2
	● Mecanismos de secado.....	4
	I.3 Propiedades de transporte y termodinámicas del amaranto.....	6
	● Coeficiente de difusividad.....	6
	● Capacidad calorífica.....	8
	● Coeficiente de actividad de agua	9
	I.4 La tecnología de los lechos fluidizados.....	12
	● Diámetro de la partícula.....	12
	● Densidad de la partícula.....	13
	● Velocidad mínima de fluidización	13
	I.5 Justificación.....	15
	I.6 Objetivos.....	16
II.	DESARROLLO TEORICO.	17
	II.1 Antecedentes.....	17
	II.2 Modelo Homogéneo.....	19
	II.3 Modelo de dos Fases.....	21
III.	DESARROLLO EXPERIMENTAL.	27
	III.1 Material.....	27
	III.2 equipo experimental	27
	III.3 Determinación de propiedades físicas	27
	● Diámetro de partícula	27
	● Fracción de espacios vacíos	29

• Esfericidad	29
• Densidad empacada	29
• Densidad aparente	29
III.4 Determinación de propiedades hidrodinámicas	30
• Velocidad mínima de fluidización	30
• Fracción de espacios vacíos mínimo de fluidización	30
III.5 Determinación de propiedades termodinámicas y de transporte.....	30
• Capacidad calorífica del grano	30
• Coeficiente de difusividad efectiva	32
• Coeficiente de actividad de agua	33
III.6 Metodología experimental	34
• Determinación de las curvas de secado	34
IV. RESULTADOS Y DISCUSION.	35
IV.1 Propiedades físicas	35
IV.2 Propiedades hidrodinámicas	35
IV.3 Propiedades termodinámicas y de transporte.....	37
• Difusividad efectiva	37
• Capacidad calorífica	39
• Actividad de agua	40
IV.4 Cinéticas de secado	41
IV.5 Simulación del comportamiento del secador de lecho fluidizado por lotes	43
IV.6 Análisis de sensibilidad de parámetros	49
• Actividad de agua	49
• Humedad de aire	50
• Capacidad calorífica	51
• Difusividad de humedad	52
• Masa de sólido en el lecho y Temperatura inicial	52
V. CONCLUSIONES.	54
VI. NOMENCLATURA.	55

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	58
Apéndice I. Métodos para determinar la difusividad.	63
Apéndice II. Valores utilizados en las simulaciones.....	64
Apéndice III. Registros experimentales y márgenes de error.....	66

RESUMEN.

Se determinó experimentalmente las cinéticas de secado para el amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*), en un intervalo de temperatura de 40 a 70 °C con un contenido de humedad entre 0.05 y 0.20 (kg. de agua/ kg. de sol. seco) utilizando un secador de lecho fluidizado. El comportamiento anterior fue comparado con simulaciones utilizando dos modelos matemáticos propuestos en la literatura, uno denominado modelo homogéneo, el cual no toma en cuenta las burbujas formadas por el aire alimentado, mientras que el llamado modelo de dos fases distingue la fase burbuja y la fase densa ó emulsión considerando que la totalidad de los sólidos se encuentra en esta última.

Los modelos mencionados demandaron parámetros que al no encontrarse en la literatura se evaluaron de forma experimental, dividiéndose en hidrodinámicos (d_p , ϕ_s , ρ_B , ρ_a , ϵ , ϵ_{mf} , U_{mf}), termodinámicos (C_B , a_w) y de transporte (D_m).

De los resultados obtenidos se pudo comprobar una mejor predicción con el modelo homogéneo en el dominio experimental estudiado, lo anterior se explica debido a las restricciones que tiene el modelo de dos fases, en cuanto a considerar que el gas que atraviesa la fase emulsión, se encuentra en condiciones de fluidización mínima. Y al realizar un análisis de sensibilidad de parámetros fue demostrado.

Las predicciones alcanzadas con los modelos estudiados, dan cierto grado de confiabilidad a las determinaciones experimentales hechas de los parámetros antes mencionados. Asimismo los resultados recomiendan un estudio mas detallado en el coeficiente de actividad de agua.

I. INTRODUCCION.

I.1. - El cultivo del amaranto en el mundo y en México.

La palabra amaranto proviene del griego $\alpha\mu\alpha\rho\alpha\nu\tau\omicron\zeta$ y significa inmarcesible, es decir que no se marchita. Este término puede referirse a una especie, a un género o hasta toda una familia botánica. El género se divide en dos subgéneros *Amaranthus* y *Acnida*; y el subgénero *Amaranthus* se compone de dos secciones *Amaranthus* y *Blitopsis*, en la primera de éstas secciones se encuentra la especie *Amaranthus hypochondriacus* una de las más explotadas en México. Estas plantas son muy resistentes y se adaptan a muchos ambientes tolerando su adversidad porque usan un tipo de fotosíntesis muy eficaz que convierte la materia del suelo, luz solar y agua en fibra vegetal (Sistema C4 de fijación de carbono). Este sistema es particularmente eficiente a altas temperaturas, luz brillante y condiciones secas.

Los cereales producidos por esta especie poseen excelentes propiedades nutritivas, a tal grado que han sido muy apreciados por la humanidad; sin embargo son poco explotados en la actualidad, aunque artículos como el de Singhal y Kulkarni (1988) y Bresani y col. (1984), lograron girar la atención hacia este cereal. Las principales características de este grano, son las siguientes:

- El grano es conocido en diversos lugares del planeta como México, Centro y Sudamérica, India, Nepal, China y algunas partes de Africa.
- Las diversas variedades del amaranto son resistentes a enfermedades y plagas.
- El amaranto posee un amplio valor nutritivo tanto en los granos como en las mismas hojas, sus proteínas, fibras, aminoácidos, minerales y características digestivas son abarcadas en los estudios de Teutonico y Knorr (1985), Behari y Andhiwal (1976), Vasi y Kalintha (1980), y Schmidt y col. (1974)
- De sus semillas se han derivado compuestos de gran valor industrial, como en el caso de la escualina, sustancia muy apreciada en la industria de los cosméticos, (Lyon y Becker, 1987). Otras sustancias igualmente derivadas del amaranto, poseen sustancias antivirales (Taniguchi, 1977), asimismo se han aislado de sus hojas pigmentos de gran calidad (Huang y Von Elbe, 1986).

En nuestro país hay vestigios (Tehuacán Puebla) de su existencia desde 4000 años A. C. En el mundo prehispánico fue un alimento fundamental, además la semilla fue utilizada para pagar tributo. Se tienen registros efectivos que datan de la época del emperador Moctezuma, donde 17 provincias dominadas por el imperio azteca, entregaban anualmente

20 mil toneladas por este concepto (Cole, 1979). Los guisos y usos del amaranto se encuentran plasmados en el Códice Florentino¹; y la utilización del grano en ritos, ceremonias religiosas y sacrificios, también se encuentran registrados.

En la Actualidad, el amaranto se cultiva en diversos estados destacando el Distrito federal (Tulyehualco), Morelos y Puebla (BOSTID 1987), siendo éste último estado, el que concentra el 70% de la producción total (ver Fig. 1).

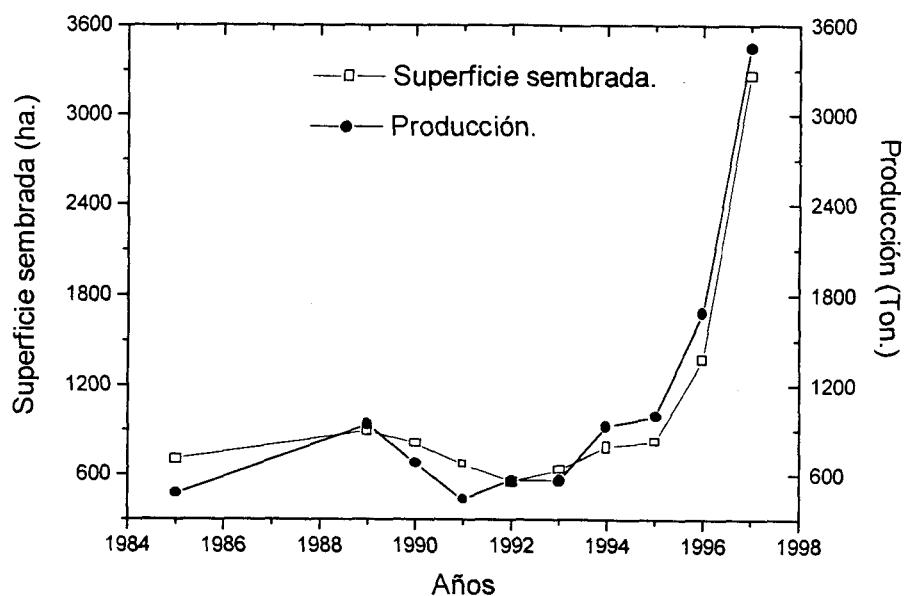


Figura 1. Producción de amaranto con relación a la superficie sembrada.
(Fuente: SAGAR, Anuarios Estadísticos de la Producción Agrícola)

Es de notarse que en años recientes existe un aumento en su producción, lo que puede atribuirse a la colocación cada vez más importante de los alimentos dietéticos y naturales.

I.2. – La operación del secado.

Curvas de secado.

El secado es un proceso simultáneo de transferencia de masa y energía, en el cual se emplea calor para evaporar la humedad, la cual a su vez se remueve de la superficie del sólido, por medio de un agente externo (aire). En términos generales, el proceso de secado de un sólido puede presentar dos periodos de secado, uno a velocidad constante y el otro, a velocidad decreciente, lo cual dependerá del mecanismo que lo controla.

¹ Citado por Cole N. J., 1979: Sahagún B., 1576 Códice Florentino V. III, Ed. Facsímil 1980, Archivo General de la Nación, México D.F.

El periodo constante de secado se observa en productos donde la resistencia interna al transporte de humedad es menor que la resistencia externa para remover el vapor de agua de la superficie del producto. Lo anterior significa abundancia de agua libre en el producto a secar y se puede tratar como si el sólido no existiera. En la figura 2, corresponde a la zona en la que M varia linealmente con el tiempo. Una manera de aproximar su tratamiento matemático para el establecimiento de los balances de masa y energía, es el proponer que la velocidad de evaporación se lleva a cabo por el mismo mecanismo que el existente en un termómetro de bulbo húmedo (T_w), tal que el flux de calor hacia el sólido se define como:

$$q = h(T - T_w) \quad (1)$$

Y el flux másico de vapor de agua de la superficie del sólido hacia la corriente de aire es:

$$n_v = k_y(y - y_1) = k_y \frac{M_A}{M_w} (Y - Y_1) \quad (2)$$

Suponiendo que solo prevalece el mecanismo de evaporación, el flux de calor será igual a:

$$q = M_w n_v \lambda_w = M_A \lambda_w k_y (Y - Y_1) \quad (3)$$

Pueden igualarse (1) y (3) para obtener una expresión general, que permita el cálculo del flujo de agua durante el proceso de secado:

$$R_C = \frac{h(T - T_w)A}{\lambda_w} = k_y M_A (Y - Y_1) A \quad (4)$$

La ecuación (4) indica que en una operación de secado con periodo de velocidad de secado constante, la velocidad de transferencia de masa equivale a la velocidad de transferencia de calor. En la figura 2 es posible observar que la curva de humedad se comporta linealmente con respecto al tiempo hasta alcanzar la no – linealidad en el proceso, este punto de transición se denomina humedad crítica y depende de la forma, tamaño y naturaleza del sólido, así como de sus condiciones de operación.

En general los cereales no presentan periodos de velocidad de secado constante a menos que sean cosechados sin estar maduros, o que hayan atrapado agua por condensación ó de lluvias.

Productos con altos contenidos de humedad como las papas y betabeles, presentan este comportamiento durante su secado.

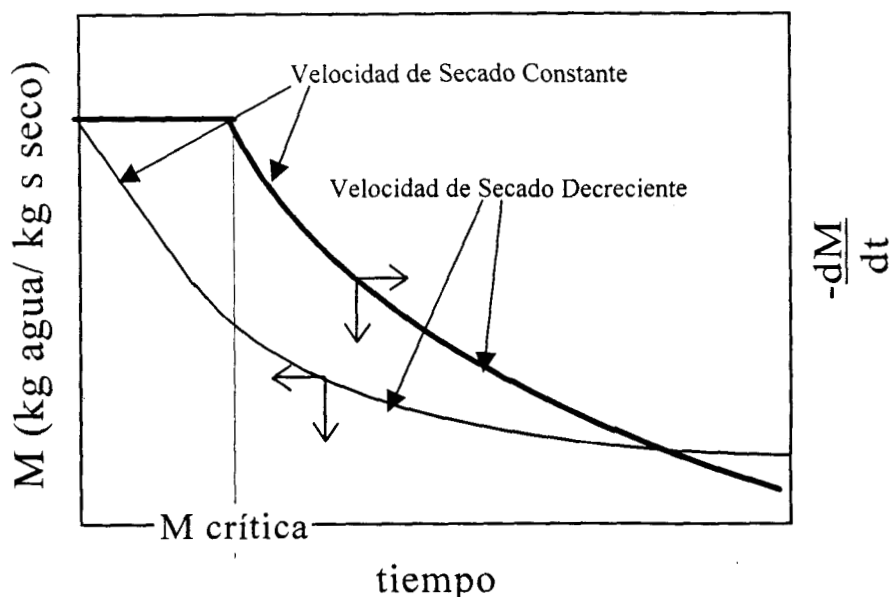


Fig. 2. Curva de secado mostrando los mecanismos que puede presentar

En el periodo de velocidad decreciente la superficie de la partícula a secar no está cubierta por una capa de agua, por que la resistencia interna a la humedad es mayor que la resistencia externa, esto trae como consecuencia una disminución de la velocidad de secado durante el curso del proceso, la figura 2 muestra lo anterior en la parte baja de la curva de secado y su derivada. Otra característica importante es la existencia de un gradiente de humedad dentro del producto. Esto limita el proceso de secado en los cereales.

Mecanismos de secado.

Muchos mecanismos se han propuesto para describir la transferencia de humedad en productos porosos capilares como lo son los cereales

1. Movimiento de líquido debido a fuerzas superficiales (**Capilaridad**). - En éste mecanismo interviene la tensión superficial en sólidos que contienen poros y canales interconectados de diversos tamaños; los materiales alimenticios granulares y húmedos se deforman fácilmente, el agua mantiene el cuerpo hinchado aunque su interior se encuentra bajo compresión debido a las fuerzas superficiales, a medida que el agua se elimina de la superficie, las fuerzas que actúan afectan a los componentes débiles del sólido y lo deforman, a tal grado que ocupan menos volumen existiendo encogimiento, el agua se mueve a velocidades que dependen de la fuerzas que se oponen al movimiento como lo es la viscosidad y el radio efectivo de los poros, el agua se va eliminando de los poros e intersticios y los meniscos formados aumentan su concavidad

por lo que debe aumentarse la succión. Es obvio que los poros pequeños generan fuerzas mayores que los poros grandes; esto explica la disminución en la velocidad de secado. Finalmente se menciona que llegará el instante en que la fuerza superficial no aplica para el secado del agua remanente; Krischer (1956) menciona que las primeras etapas de secado se controlan por esta relación de las fuerzas capilares, proponiendo la siguiente expresión para la correlación de datos experimentales:

$$n_v = -k_w \rho_B \frac{dM}{dl} \quad (5)$$

La expresión es del tipo primera ley de Fick, el factor k_w se denomina conductividad de humedad y agrupa los efectos de la distribución de los diámetros de poro dentro del material, así como la tensión superficial y la viscosidad del líquido. Experimentalmente k_w depende de la humedad del material, puede graficarse k_w versus M ; si los valores de k_w son altos mientras M permanece constante la capilaridad se encuentra presente y será el mecanismo principal hasta que la humedad varíe apreciablemente, Görling (1956) presentó detalles de lo anterior para un tubérculo conocido como es la papa.

2. Contracción del sólido al disminuir la humedad (**Encogimiento**). - Materiales fibrosos como los vegetales y productos alimenticios, presentan tensión en sus paredes celulares al aumentar su contenido líquido, las paredes son elásticas y volverán a su estado original si no se exceden sus límites permisibles, en caso contrario el material perderá sus dimensiones. Si los tejidos del material mueren (temperaturas elevadas) las paredes aumentan su permeabilidad, y la deformación aumenta debido a daños como rupturas en los tejidos, los productos en ocasiones formarán una capa dura en la superficie que impide el flujo de líquido ó vapor, disminuyendo la velocidad del proceso. Esto trae como consecuencia una disminución en la calidad del producto.
3. Transferencia difusional del agua (**Difusión**). - En general las etapas tempranas del secado se gobiernan por fenómenos de capilaridad; posteriormente el fenómeno de difusión controla el proceso y se lleva en el interior de los capilares, poros y pequeños espacios ocupados por vapor, el cual se difunde hacia el exterior hasta que los capilares se vacían, el vapor se aleja por el movimiento de una corriente de aire. Krischer (1938) señala la presencia de aire estancado dentro de los poros, el agua al evaporarse se mueve desde el interior de los poros; desde las regiones de alta presión de vapor hacia las de baja. La siguiente ecuación describe el flux del vapor de agua:

$$n_v = -\frac{D}{\phi} \frac{1}{R_v T} \frac{P}{P - p_v} \frac{dp_v}{dl} \quad (6)$$

ϕ es el factor de resistencia a la difusión y depende de la estructura geométrica del interior del sólido; si se trata de un material higroscópico también dependerá fuertemente del contenido de humedad. Görling (1958) presenta valores de este factor para la papa y Krischer (1956) presenta valores para distintos alimentos y combina las ecuaciones 5 y 6 para mostrar un mecanismo global.

No obstante el antecedente mencionado, los trabajos de Marshall y Friedman (1950) aprecian un efecto del agua líquida en el interior del sólido, sobre todo por la existencia de una solubilidad mutua entre los componentes sólidos y el líquido existente; sistemas como semolinas, féculas, textiles y maderas, presentan éste mecanismo, y ecuaciones como 5 y 6 no aplican para la complejidad mencionada. Si además se toma en cuenta la posibilidad de que el agua se encuentra adsorbida en sitios internos del sólido, la dificultad del secado aumenta. La forma de atacar esta problemática es por medio de la segunda ley de Fick; implementando un coeficiente de difusión que tome en cuenta de una manera global, los aspectos ya mencionados.

I.3.- Propiedades de transporte y termodinámicas del amaranto.

Coefficiente de difusividad.

Numerosos autores han encontrado que el secado de cereales depende esencialmente del transporte interno ó difusivo (Brooker y Bakker, 1974) y aplicando la segunda ley de Fick, se explica su comportamiento

$$\frac{\partial(\rho_s M)}{\partial t} = \nabla(D_m \rho_B \nabla M) \quad (7)$$

La difusión de humedad puede considerarse una función exponencial de la temperatura, del tipo ley de Arrhenius:

$$D_m = D_0 \exp\left[\frac{E_0}{RT}\right] \quad (8)$$

Donde D_0 y E_0 a su vez, pueden ser función de la humedad, lo que sugiere la aplicación de correlaciones empíricas (Zogzas et al. 1996). Si se considera la difusividad constante a una temperatura fija, sin cambios de volumen en el sólido, la ecuación (7) se reduce a:

$$\frac{\partial(M)}{\partial t} = D_m \nabla^2 M \quad (9)$$

La solución de ésta ecuación dependerá de la geometría del sólido y de las condiciones de frontera que prevalezcan en la interfase sólida. Para el caso de la semilla de amaranto, se considera una geometría esférica y (9) se modifica a:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_m \left[\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right] \quad (10)$$

Con las siguientes condiciones inicial y a la frontera:

$$t = 0; M = M_0 \quad (11)$$

$$r = 0; M \rightarrow \text{finito}; \frac{dM}{dr} = 0 \quad (12)$$

$$r = R_p; M = M_{eq} \quad (13)$$

Como la humedad es función de la posición, se define un contenido promedio de humedad en los granos como:

$$M_p(t) = \frac{4\pi}{V_S} \int_0^R r^2 M(r,t) dr \quad (14)$$

Resolviendo (10) con las condiciones (11) – (13); y posteriormente (14) para obtener el perfil de concentración, la expresión final es:

$$\frac{M_p(t) - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{6}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[\frac{-n^2 \pi^2 D_m t}{R^2} \right] \quad (15)$$

La ecuación (15) puede ajustar datos experimentales de secado, y el límite de términos a utilizar en la sumatoria obtenida, se fijará de acuerdo a la precisión deseada. Cabe mencionar que algunos grupos de investigadores prefieren soluciones numéricas para (7) debido a las diversas condiciones a la frontera posibles y la funcionalidad de la difusividad, esto contempla una amplia variedad de experimentos para poder elegir el más adecuado. (Zogzas y col. , 1994). De manera que los métodos para resolver esta clase de perfiles, se complica más, como ejemplo puede revisarse el trabajo de Dutta, y col. (1988)

Capacidad calorífica.

En una sustancia el calor propagado por diferencia de temperaturas, dependerá de las condiciones constantes de presión ó volumen. (Mohsenin 1980) Para materiales agrícolas como lo es el amaranto, este calor se considera constante a menos de trabajar a condiciones de presiones extremas.

La cantidad de calor a emplear dependerá de la masa que sufre el cambio de temperaturas y la relación de proporcionalidad es directa.

$$C_p m = \frac{d\bar{Q}}{dT} \quad (16)$$

$$\text{Si } Q = \bar{Q}/m$$

$$dQ = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (17)$$

Para efectuar la integración debe conocerse la funcionalidad de C_p con T ; para cambios pequeños de temperatura puede considerarse C_p constante, para rangos de variación considerables debe establecerse la funcionalidad y determinar si un valor promedio puede utilizarse.

La necesidad de datos para la capacidad calorífica conduce a trabajos pioneros del siglo anterior (Mohsenin, 1980). Siebel² (1892) propuso que la determinación del C_p para frutas, carnes y vegetales debe ser la suma de la capacidad calorífica del alimento en cuestión y la capacidad calorífica del agua. Con el paso del tiempo autores como Stitt y Kennedy³ (1945) han demostrado que solo para ciertos materiales la regla anterior funciona, y el argumento es atribuido a los enlaces del agua con el alimento lo que significa que se

² Citado por Mohsenin (1980) Siebel E., 1982, Specific heats of Various Products, *Ice & Refrigeration*, 2, 256-257.

³ Citado por Mohsenin (op. Cit.) Stitt F. y Kennedy E. K., 1945, Specific Heats of Dehydrated Vegetables and Egg Powder, *Food Research*, 10, 426-436.

incrementa el valor del calor específico. Sin embargo se plantea una funcionalidad que puede ser diferente para diversos contenidos de agua lo que implica la determinación del C_p para niveles varios de humedad.

Los procedimientos para la determinación del C_p son: el método de las mezclas por calorímetro y el método de la placa protegida (Mohsenin 1980). Con la modernización instrumental es posible la utilización de un calorímetro diferencial de barrido (DSC). El procedimiento es medir pequeños efectos térmicos provenientes de procesos térmicos registrados en una gráfica llamada termograma que muestra pérdidas ó ganancias de energía detectadas por el equipo, dada la tasa de incremento en temperatura previamente seleccionada.

El área del termograma es proporcional al calor absorbido ó liberado durante el proceso de calentamiento ó enfriamiento. El sistema consiste de dos contenedores, uno para la muestra, y el otro para el material de referencia; un programador de temperatura y un registrador. Es conveniente encapsular las muestras debido a la presencia de humedad en los materiales. La importancia de esta técnica es la precisión de las determinaciones si el aparato se encuentra calibrado, otra ventaja es que el análisis de los termogramas indica posibles descomposiciones en el rango de estudio y por consiguiente la obtención de productos de calidad.

Coefficiente de actividad de agua.

En la industria alimenticia este parámetro determina la estabilidad de un alimento, tal que la investigación hacia estos ámbitos es basta; termodinámicamente se presenta como el cociente de la fugacidad del agua en una mezcla (f_{wi}) sobre la fugacidad de esta como componente puro a la misma temperatura (f_w^0)

$$a_w = \frac{f_{wi}}{f_w^0} \quad (18)$$

De la misma termodinámica se conoce que la fugacidad es una presión que se corrige y de esta forma representa realmente a esta variable de estado; para temperaturas alrededor de la ambiental se justifica que el vapor de agua se comporte idealmente, así que las fugacidades de la ecuación (18) se sustituyen por la presión de vapor del agua en el sistema (p_w) dividida por la presión de vapor del agua como componente puro a la misma temperatura. La presión de operación es generalmente la ejercida por la atmósfera.

$$a_w = \frac{p_w}{p_w^0} \quad (19)$$

Es importante hacer hincapié en los siguientes aspectos de acuerdo a lo establecido por Strumillo (1996):

- La actividad del agua se refiere a un estado de equilibrio real, y lamentablemente no siempre se alcanza en los alimentos.
- El estado de referencia se selecciona a una temperatura y presión de tal forma que se trabaja libremente, por lo que la necesidad de un estándar para las determinaciones experimentales se trata de implementar.

No obstante lo anterior, la actividad de agua en los alimentos se ha relacionado con sus propiedades físicas, químicas y biológicas más que con el contenido de humedad presente; cambios específicos en color, aroma, sabor, textura, estabilidad y calidad se relacionan a rangos reducidos de a_w . Lo anterior ha dado pie a numerosos estudios destacando: Rockland y Beuchat (1987) muestran gráficamente la estabilidad y calidad de alimentos y productos naturales como función de la actividad; Rizvi (1986) limita los valores de la actividad de agua para evitar el crecimiento de microorganismos y Homma y Fujimaki (1982) presentan cambios de color y concentración de carbonilos en las proteínas de soya.

El producto que cede agua a sus alrededores alcanza el contenido de humedad en equilibrio de desorción; y cuando un material relativamente seco absorbe agua de ambientes muy húmedos alcanza la humedad en equilibrio de absorción; a éstas condiciones, se determinan las actividades de agua correspondientes. Sin embargo para un valor fijo de actividad, existen diferencias en los valores para los dos fenómenos mencionados. La humedad en equilibrio de desorción es mayor al de absorción; esto es un efecto de histéresis, autores como Chung y Pfof (1967) y Ngoddy y col. (1972) proponen teorías para la explicación del fenómeno mencionado. En el presente caso se utilizan datos de desorción ya que el principal interés es el secado de cereales

Otra característica importante de la actividad implica la evaluación del calor isostérico de vaporización desorción (ΔH). El cual incluye la entalpía del equilibrio líquido vapor del agua en el alimento y la entalpía parcial del agua absorbida; es decir el calor requerido para eliminar (desorber) y vaporizar una cantidad de agua de una masa de absorbente. Lo anterior se relaciona con la ecuación de Clausius - Clapeyron, y la ecuación de presión de vapor del agua pura a la temperatura del lecho (Kiefer, 1941 y Zuritz y Singh, 1982):

$$p_v^0 = 100 \exp \left[27.0214 - \frac{6887}{T} - 5.31 \ln \left(\frac{T}{273.15} \right) \right] \quad (20)$$

Zahed (1992) desarrolla la ecuación de Clausius - Clapeyron para finalmente obtener:

$$\Delta H = R_v T^2 \left[\frac{6887}{T^2} - \frac{5.31}{T} + \frac{\left. \frac{da_w}{dT} \right|_M}{a_w} \right] \quad (21)$$

La ecuación (21) requiere la obtención de una expresión de a_w , Zahed (1992) utilizó la ecuación modificada de Henderson y posteriormente obtuvo su derivada.

$$a_w = 1 - \exp[-K(100M_e)^N(T - 273.16 + c)] \quad (22)$$

Puede observarse que la ecuación para a_w posee tres constantes y el valor M_e (de acuerdo a Zahed, 1992) se obtiene al resolver (10) con el valor $M(R_p, t) = M_e$, esta correlación no es la única para el ajuste de a_w ; Rizvi y Benado (1984) presentan un resumen de las ecuaciones utilizadas y su aplicación para diversos alimentos.

Existe una problemática sobre la estandarización de los métodos para la determinación de isothermas de absorción y desorción relacionando los coeficientes de actividad. Este interés en la investigación alimenticia ha generado proyectos importantes, (COST 90, Jowitt y col. 1983); los primeros resultados se encaminan al uso de la ecuación GAB (de Guggenheim - Anderson - De Boer) con tres parámetros ajustables:

$$\frac{k(1-C)}{Cm_m} a_w^2 + \left[\frac{(C-2)}{Cm_m} - \frac{1}{M_e} \right] a_w + \frac{1}{kCm_m} = 0 \quad (23)$$

La ecuación (23) ha sido utilizada exitosamente por Tolaba (1995, 1997); m_m es el contenido de humedad de saturación de los sitios primarios (anteriormente monocapa de acuerdo a la teoría BET) y se relaciona con la estabilidad de alimentos deshidratados (Iglesias y Chirife, 1984); C es la constante de Guggenheim; y k es el factor de corrección para las moléculas en multicapas con respecto al seno del líquido, las constantes mencionadas varían en función de la temperatura con un comportamiento de tipo Arrhenius:

$$k = K11 \exp\left[\frac{K22}{T}\right] = K11 \exp\left[\frac{H_l - H_e}{RT}\right] \quad (24)$$

$$C = C_{11} \exp\left[\frac{C_{22}}{T}\right] = C_{11} \exp\left[\frac{H_m - H_l}{RT}\right] \quad (25)$$

$$m_m = N_{11} \exp\left[\frac{N_{22}}{T}\right] \quad (26)$$

I.4.- La tecnología de los lechos fluidizados.

Los sistemas que involucran sólidos y gases se pueden clasificar por el movimiento que presentan los sólidos. A bajas velocidades de gas, el fluido se filtra por los huecos de las partículas sin movimiento alguno, el sólido se encuentra en un lecho fijo. Si la velocidad aumenta, las partículas se alejan entre sí y llegan a arrastrarse por el fluido, los sólidos se encuentran en fluidización.

En el universo de las tecnologías relacionadas con el secado; el lecho fluidizado aplicado para este fin ofrece las siguientes ventajas:

- Altas velocidades de transferencia de masa y calor entre las partículas y el gas, provocada por el mezclado intensivo debido a la presencia de burbujas
- Control adecuado de temperaturas evitando posibles degradaciones térmicas en sólidos biológicos y alimenticios.

Entre las desventajas a tomar en cuenta se mencionan:

- Un aumento de potencia en el compresor ó ventilador, por las altas caídas de presión que se presentan en el lecho fluidizado al aumentar el tamaño del secador.
- Los sólidos a secar en estos equipos deben ser resistentes para no sufrir desgaste ó roturas, si este factor no es de importancia para la selección, debe tenerse en mente la necesidad de recuperaciones periódicas de finos.

Diámetro de la partícula.

Estrictamente hablando la mayoría de las partículas son irregulares por lo que se menciona un diámetro equivalente definido de la siguiente forma (Kunni y Levenspiel 1991):

d_{sph} = diámetro de una esfera obtenido del volumen de la partícula

El concepto anterior permite determinar un diámetro efectivo definido como:

$$d_{eff} = \phi_s d_{sph} \quad (27)$$

Para fines prácticos este valor representa el tamaño de las partículas en el lecho; ϕ_s es el valor de la esfericidad, definido como:

$$\phi_s = \left(\frac{\text{superficie de la esfera}}{\text{superficie de la partícula}} \right) \text{ al mismo volumen} \quad (28)$$

Donde $\phi_s = 1$ para las esferas y $0 < \phi_s < 1$; para las demás geometrías.

Densidad de la partícula.

Estrictamente se conocen tres tipos de densidades: La densidad empacada ó densidad formada por el sólido y su fracción de espacios vacíos tomadas como un todo; la densidad aparente ó la densidad del sólido aislada del aire que puede interferir en su determinación la cual se obtiene a partir de métodos volumétricos y gravimétricos, cuya aplicación en el campo de la fluidización es necesaria. Finalmente la densidad real que se obtiene a partir del volumen real, eliminando espacios intra e interpartículas que interfieren en el cálculo.

Velocidad mínima de fluidización.

Para un lecho con partículas descansando sobre la placa distribuidora, la fluidización inicia cuando las fuerzas de arrastre del aire igualen al peso de las partículas (Ergun 1952); de tal forma que la fracción de espacios vacíos mínimo de fluidización es mayor a la fracción del lecho fijo y puede estimarse sí se determina adecuadamente el incremento en el volumen provocado por el aumento del flujo de aire. Si esto sucede la velocidad mínima de fluidización puede obtenerse de acuerdo a lo siguiente:

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \left[\frac{d_p \rho_A U_{mf}}{\mu_A} \right] + 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \left[\frac{d_p \rho_A U_{mf}}{\mu_A} \right] = \frac{d_p^3 \rho_A (\rho_B - \rho_A) g}{\mu_A^2} \quad (29)$$

El término de la derecha se conoce como el número de Arquímedes (ó Galileo según otros autores).

Es de importancia mencionar que el comportamiento de la fluidización depende del tipo de partículas, y Geldart (1973) las clasificó en términos de la diferencia de densidades (partícula-gas) y el diámetro promedio de las partículas; formando cuatro grupos **A** ($30 < d_p < 100 \mu\text{m}$ y fuerzas interpartículas importantes), **B** ($40 < d_p < 500 \mu\text{m}$; $1400 < \rho_B < 4000 \text{ kg/m}^3$, de fácil fluidización), **C** (partículas más finas que **A** con fuerzas interpartículas muy grandes en comparación con la velocidad del gas) y **D** (partículas gruesas $d_p > 1\text{mm}$. que no permiten la expansión del lecho, muchos granos se clasifican en éste tipo); lo anterior es reforzado por las excelentes gráficas de régimen de flujo para varios contactos gas-sólido recopiladas por Kunni y Levenspiel (1991), donde se implementa la definición de las variables adimensionales (Haider y Levenspiel 1989):

$$d_p^* = d_p \left[\frac{\rho_A (\rho_S - \rho_A) g}{\mu^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (30)$$

$$U^* = U_0 \left[\frac{\rho_A^2}{\mu (\rho_S - \rho_A) g} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (31)$$

Con los valores anteriores es posible la ubicación del régimen de fluidización que puede presentarse en un sistema; los más importantes son los siguientes:

- Régimen corpuscular.- Se presenta en partículas tipo **A**, el gas pasa por los huecos sin formar burbujas, el lecho se observa como una fase, las condiciones de velocidad del gas son estrechas, expandiendo un poco el rango cuando se opera a presiones altas ó densidades altas del gas.
- Régimen burbujeante.- Se presenta en partículas del tipo **B** y **D**; las burbujas de aire aparecen tan pronto como se alcanza la velocidad mínima de fluidización y agitan vigorosamente los sólidos. Aunque la existencia de coalescencia es ineludible al aumentar la velocidad formando dos fases llamadas fase burbuja y fase densa ésta última contiene la mayoría de las partículas.

- Régimen turbulento.- Al aumentar la velocidad se abandona el régimen burbujeante a tal grado que las dos fases constituyentes no llegan a distinguirse, debido a la explosión de las burbujas, y en este caso la altura del lecho es difusa.
- Taponamiento (Cortocircuito).- Este régimen se caracteriza por la presencia de burbujas del tamaño del lecho y forma tapones de aire, estos se presentan en diámetros pequeños o en relaciones altura/diámetro $\gg 1$. Estos tapones se rompen en la superficie del lecho. Si hay un aumento en la velocidad del gas se cambia al régimen de lecho rápido.
- Régimen en Erupción.- Este régimen surge cuando el gas se inyecta verticalmente en una abertura pequeña en el fondo del lecho, las partículas se arrastran por el chorro de gas hasta la superficie y regresan al lecho, pegado a las paredes del mismo, esto provoca un mezclado más regular y cíclico que el lecho burbujeante.
- Formación de canales.- El régimen se forma en partículas del tipo C donde los sólidos forman agregados por las fuerzas cohesivas presentes, de tal manera que el gas no puede fluidizar al sólido y solo forma ductos ó agujeros por donde éste pasa y abandona el lecho.

La presencia de mamparas y serpentines así como cambios geométricos en el interior del secador pueden afectar el comportamiento del régimen por lo que debe tomarse en cuenta para casos de estudio.

1.5.- Justificación.

Este trabajo se orienta al estudio del secado de amaranto, cultivo de gran importancia en México por sus cualidades nutritivas y que además posee la ventaja de ser una semilla prácticamente esférica, lo cual le permite ser un sólido ideal desde el punto de vista de la fluidización.

Dadas las características de este sólido, es posible adaptar los modelos: homogéneo y de dos fases propuestos por Zahed y col. (1992 y 1997) para predecir su comportamiento, su elección se debe a que ambos modelos no manejan parámetros ajustables. Por lo contrario estos parámetros (termodinámicos, físicos y de transporte) son obtenidos de experimentos independientes a la cinética de secado. El modelo de dos fases además de lo anterior presenta parámetros hidrodinámicos como el diámetro de la burbuja, lo que proporciona un gran peso teórico a la descripción del comportamiento de los secadores de lecho fluidizado.

Con lo anterior es posible también realizar un análisis de sensibilidad de parámetros que contribuya al diseño de este tipo de equipos.

I.6.- Objetivos.

El Objetivo principal de este trabajo es contribuir a la validación de los modelos de Zahed, con el fin de aplicarse al modelamiento de secadores de lecho fluidizado para diferentes cereales y demás materiales que presenten el mismo comportamiento. Esto a su vez conduce a los siguientes objetivos particulares:

1. Determinar las propiedades físicas, de transporte y termodinámicas del amaranto.
2. Con los parámetros hidrodinámicos y físicos determinados, ubicar el régimen de fluidización que se tendrá en los diferentes experimentos.
3. Basándose en los parámetros mencionados en el enunciado (1) y utilizando los modelos de Zahed (1992 y 1996), predecir la evolución de la humedad y de la temperatura en el grano.
4. Comparar los resultados de las cinéticas de secado experimentales con los valores obtenidos en las predicciones.
5. Evaluar y analizar los resultados para de esta forma emitir las conclusiones que permitan una comparación objetiva de los modelos mencionados.

II. DESARROLLO TEORICO.

El presente capítulo menciona algunos antecedentes importantes relacionados a la tecnología del secado de cereales publicados en la literatura, posteriormente se presentan las principales ecuaciones de los modelos homogéneo y de dos fases y la metodología a implementar en la simulaciones.

II.1.- Antecedentes.

Una revisión del secado, y sus fundamentos se puede apoyar en artículos como los de Vanecek (1965, 1968), Barker (1965), Kunni y Levenspiel (1968, 1991), Luikov (1973) y su excelente revisión de la descripción matemática de los fenómenos de transferencia de masa y energía en cuerpos con huecos capilares, y Brooker y Bakker (1974), los cuales publican un texto pionero con respecto al secado de cereales, en donde se menciona a la difusión como mecanismo que controla, como en el caso del trigo (Becker y Sallans 1955), maíz (Chu y Hustrulid 1968), arroz (Kameoka et. al., 1986), y lenteja (Karatas, 1997).

Basándose en lo anteriormente mencionado, se pueden analizar modelos de secado como: Hoebink y Rietema (1980), que publican un artículo en dos partes sobre el secado de sólidos granulares en lechos fluidizados, los cuales consideran al lecho dividido en fases burbuja, nube y densa respectivamente, para sólidos sin limitaciones difusionales o sólidos que presenten un mecanismo interno que controla la transferencia de masa. Viswanathan (1986) utilizó con buenos resultados una relación empírica lineal que correlaciona la temperatura de entrada del aire y el contenido de humedad en el sólido alimentado, con una constante empírica k individual para cereales como trigo, maíz, arroz y chícharos.

En otro trabajo Viswanathan (1986) presenta un modelo para un secador continuo perfectamente mezclado, en el que el proceso de secado es controlado por difusión y en el que la variable crítica es la humedad inicial, tal que las expresiones analíticas pueden predecir temperaturas a estado estacionario, lo cual es de importancia para el control de secadores.

Derivado de éste análisis, los modelos seleccionados para realizar las simulaciones fueron los propuestos por Zahed et al. (1992 y 1995), debido a que poseen parámetros no ajustables, lo que significa que el modelo requiere la alimentación de los valores de las propiedades provenientes de experimentos independientes; esto robustece teóricamente los modelos a la vez que valida los parámetros utilizados. Las consideraciones necesarias para utilizar los modelos mencionados se enuncian en la tabla 1.

Tabla 1. Consideraciones importantes de los modelos de secador de lecho fluidizado.
 Simbología: A= aplicable; NA= no aplicable

Consideraciones.	Modelo Homogéneo.	Modelo de 2 Fases.
1. Los granos poseen alta esfericidad, son de tamaño uniforme e isotropicas.	A	A
2. El encogimiento ó merma de los granos durante el proceso de secado es despreciable.	A	A
3. El agua se difunde radialmente del interior de la partícula a la superficie por difusión molecular.	A	A
4. Los gradientes de temperatura dentro de las partículas, pueden despreciarse.	A	A
5. Las paredes del secador son adiabáticas, es decir bien aisladas o con pérdidas despreciables si se comparan con la transferencia de calor entre el aire y al grano.	A	A
6. Los granos se encuentran lo suficiente mezclados, que cualquier muestra tomada del lecho es representativa para determinar su humedad y temperatura en cualquier tiempo.	A	Solo para la fase densa.
7. El aire utilizado para secar abandona el sistema en equilibrio térmico con las partículas.	A	A
8. Las propiedades físicas del aire y el sólido no varían significativamente en el proceso.	A	A
9. Las partículas fluidizadas con aire se encuentran en un régimen de lecho burbujeante.	NA	A
10. El aire atraviesa la fase burbuja en forma de flujo pistón.	NA	A
11. Las burbujas son de un tamaño semejante, calculado a la altura media del lecho, y éstas se distribuyen uniformemente en el mismo.	NA	A
12. Los fenómenos hidrodinámicos provocados por las burbujas (coalescencia, y formación de una estela), y sus efectos, se desprecian.	NA	A
13. No existen partículas sólidas en la fase burbuja.	NA	A
14. Las variaciones radiales de concentración dentro de las dos fases se desprecian.	NA	A
15. La resistencia a la transferencia de masa a través de la nube se desprecia.	NA	A
16. La fracción de espacios vacíos mínimo de fluidización obtenida es la misma en la fase densa; viajando en condiciones de U_{mf} .	NA	A
17. El agua se transfiere de la superficie de la partícula al gas de la fase densa, como en la transferencia de masa convectiva en lechos empacados.	NA	A

II.2.- Modelo homogéneo.

De acuerdo a Zahed (1992), el modelo propuesto se resuelve con las siguientes ecuaciones:

Balance de masa y energía considerando la temperatura a la salida del aire (igual a la del grano) para cualquier tiempo t , como función de las incógnitas, Y , M_p y ΔH

$$\text{Balance de masa:} \quad m_A(Y - Y_1) = -m_B \frac{dM_p}{dt} \quad (32)$$

Balance de energía:

$$m_A[(C_A + Y_1 C_v)(T_1 - T) - (Y - Y_1)\Delta H] = m_B(C_B + M_p C_w) \frac{dT}{dt} \quad (33)$$

$$t=0; \quad T=T_0; \quad M_p=M_0 \quad (34)$$

La forma de calcular M_p proviene de la solución a la ecuación de difusión en coordenadas esféricas (10) y las condiciones en la frontera e inicial modificadas de la siguiente forma:

$$t = 0, \quad 0 \leq r \leq R_p, \quad M = M_0 = M_p \quad (35)$$

$$t \geq 0, \quad r = 0, \quad \frac{\partial M}{\partial r} = 0 \quad (36)$$

$$t \geq 0, \quad r = R_p, \quad \frac{\partial M}{\partial r} = -\frac{m_A(Y - Y_1)V_s}{m_B D_M A_s} \quad (37)$$

La condición frontera en $r = R_p$ toma en cuenta el balance de masa de (32), los detalles son presentados por Zahed (1992). La forma de resolver (10) con (35) – (37) involucra métodos numéricos y una opción son las diferencias finitas implícitas (Burden y Faires 1993, Ozisik 1968 y Morton y Mayers 1994), al aplicarlas, es posible la obtención de la humedad en los $(n+1)$ puntos: $M(0, t)$, $M_1(h, t)$, $M_2(2h, t)$ $M_{n-1}((n-1)h, t)$, $M(nh, t)$, donde:

$$h = \frac{R}{n} \quad (38)$$

Con dichos puntos se procede a integrar numéricamente y obtener la humedad promedio en volumen de una semilla esférica de amaranto aplicando la ecuación (14).

El coeficiente de actividad se relaciona directamente con la humedad en equilibrio, presente en la superficie de la semilla ($M_{eq}=M(R_p, t)$), obtenido de la solución del sistema 10 y 35 - 37); los trabajos anteriores han ocupado la ecuación de Henderson modificada (22) ya que representa adecuadamente a los cereales estudiados.

El calor de vaporización - desorción (ó isostérico) se calcula con la ecuación (21) y su dependencia del coeficiente de actividad y su derivada fue establecida por Zahed y Epstein (1992)

$$\left. \frac{da_w}{dT} \right|_M = (1 - a_w) K M_e^N \quad (39)$$

Para el empleo de la ecuación GAB; la derivada es necesaria. Con el valor $M_e=M(R_p, t)$ obtenido de la solución de (10) con (35-37) y sustituido en (22 ó 23) para la obtención de a_w , es posible calcular la humedad del aire en equilibrio con la ecuación de Brooker (1974):

$$Y = \frac{0.622 a_w p_v}{(P - a_w p_v)} \quad (40)$$

Para la obtención de la presión de vapor se utiliza la ecuación (20). La correlación a obtener para el C_B por medio del calorímetro también se utiliza en las simulaciones; tomando la parte correspondiente al sólido seco:

$$C_B = A' T - B' \quad (41)$$

Finalmente se implementa la difusividad efectiva del agua en el amaranto a obtener por datos experimentales y ser ajustada con la ecuación (8). Proporcionando los valores de $m_A, m_B, C_A, C_V, C_W, M_0, T_0, T_1, Y_1$; el sistema descrito por: el balance de energía del sistema (33), la ecuación diferencial parcial (10) con sus condiciones iniciales y a la frontera (35-37) y el tamaño de paso (38), además de las ecuaciones (8), (20), (21), (22 ó 23), y (39) a (41); pueden resolverse para conocer M_p, Y y T como función del tiempo para

un secador batch bien mezclado, utilizando aire como medio de secado. El procedimiento de cálculo, así como las rutinas empleadas se presenta en la fig. (3).

II.3.- Modelo de dos fases.

Al igual que el modelo homogéneo; el modelo de 2 fases de Zahed y col. (1995), presenta consideraciones importantes sin embargo en esta parte solo se describen las ecuaciones que participaran en las simulaciones. El balance de masa y energía para el aire alimentado a un secador con las fases burbuja (b) y densa (d), se expresa como función de las incógnitas, Y_d (equivalente a Y en el modelo homogéneo), M_p , ΔH , Y_b , d_b y k_c :

$$\text{Balance de masa:} \quad m = -\rho_B (1 - \varepsilon_{mf})(1 - \varepsilon_b) \frac{dM_p}{dt} \quad (42)$$

Balance de energía:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\rho_A G_d (C_A + Y_1 C_V)(T_1 - T) - \Delta H [\rho_A G_d (Y_d - Y_1) - \frac{6k_c \rho_A \varepsilon_b}{d_b} (Y_b - Y_d)]}{\rho_B (1 - \varepsilon_{mf})(1 - \varepsilon_b)(C_B + C_W M_p)} \quad (43)$$

$$t=0; \quad T=T_0; \quad M_p=M_0 \quad (44)$$

Nuevamente el control de la humedad está en el interior de la semilla tal que la ecuación de difusión (10) y sus respectivas condiciones: inicial (35), a la frontera $r=0$ (36), y una condición exterior ($r=R_p$) modificada, proveniente del balance de masa de (42), la expresión resultante es:

$$t \geq 0, \quad r = R_p, \quad D_M \frac{\partial M}{\partial r} = - \frac{d_p \left[\rho_A G_d (Y_d - Y_1) - \frac{6k_c \rho_A \varepsilon_b}{d_b} (Y_b - Y_d) \right]}{6\rho_B (1 - \varepsilon_{mf})(1 - \varepsilon_b)} \quad (45)$$

Zahed (1995) enuncia una frontera convectiva con resultados similares a la aplicación de (45), no es el caso del presente estudio definido anteriormente por un control de la difusión en el grano. No obstante, se pretende realizar una comparación cuantitativa dado que se cuenta con todos los parámetros necesarios, la condición en cuestión es la siguiente:

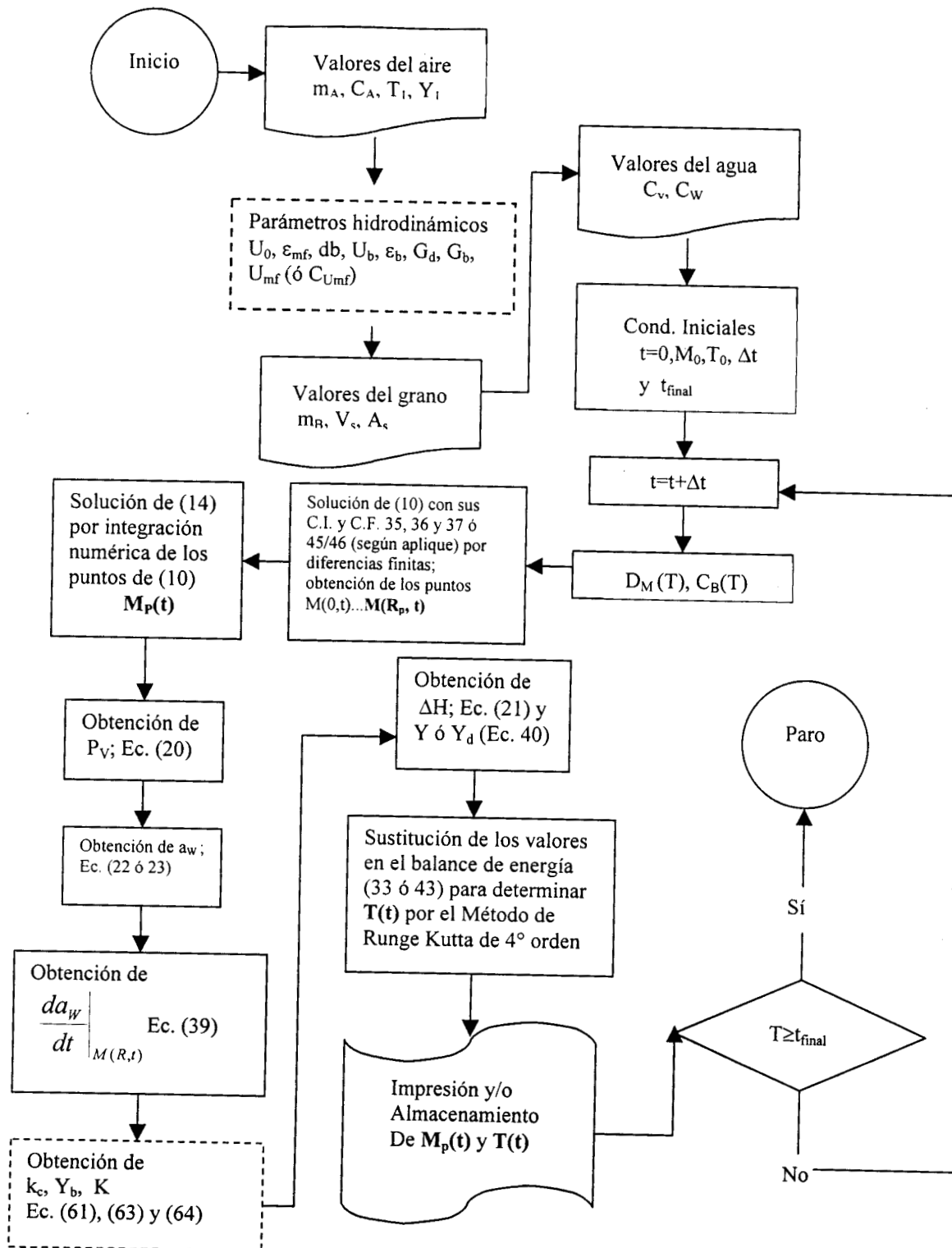


Figura 3. Algoritmo empleado para la solución del modelo Homogéneo y el modelo de dos fases.

$$t \geq 0, r = R_p, D_M \frac{\partial M}{\partial r} = - \frac{\rho_A K \left[\rho_A G_d (Y_d - Y_1) - \frac{6k_c \rho_A \varepsilon_b}{d_b} (Y_b - Y_d) \right]}{\rho_p \left[\rho_A G_d + \frac{6k_c \rho_A \varepsilon_b}{d_b} + \frac{6\rho_A K (1 - \varepsilon_{mf})(1 - \varepsilon_b)}{d_p} \right]} \quad (46)$$

Donde d_b es el diámetro de la burbuja y depende de la altura del secador, el número de orificios en el distribuidor y la velocidad mínima de fluidización. de acuerdo a Mori y Wen (1975) se expresa de la siguiente forma:

$$d_b = d_{bm} - \frac{(d_{bm} - d_{b0})}{0.3 L} d_l \left[1 - \exp\left(\frac{-0.3 L}{d_l}\right) \right] \quad (47)$$

$$d_{b0} = \frac{1.38}{g^{0.2}} \left[\frac{A(U_0 - U_{mf})}{N_o} \right]^{0.4} \quad (48)$$

$$d_{bm} = 1.64 \left[A(U_0 - U_{mf})^{0.4} \right] \quad (49)$$

Al obtener el diámetro de la burbuja se calcula la velocidad de una sola burbuja: (Grace 1982)

$$U_{br} = 0.71 \sqrt{gd_b} \quad (50)$$

La velocidad con la influencia de las burbujas adyacentes en lechos burbujeantes debe tomarse en cuenta tal que Davidson y Harrison (1963) proponen:

$$U_b = U_{br} + (U_0 - U_{mf}) \quad (51)$$

Werther⁴ (1981) propone una corrección para la ecuación anterior, aclarando que los ajustes fueron publicados por Hilligardt y Werther⁵ (1986):

⁴ Citado por Kunni y Levenspiel (1991): Werther J., 1978, *German Chem. Eng.*, 1, 166; Werther et al., 1981, *German Chem. Eng.*, 4, 291

$$U_b = \alpha U_{br} + \psi(U_0 - U_{mf}) \quad (51')$$

Donde $\psi=0.65$ y $\alpha = 2 \sqrt{d_t}$ sí $.1(m) \leq d_t \leq 1 (m)$ para sólidos tipo **B**

El flujo volumétrico en la fase burbuja se expresa como: (Toomey y Johnstone, 1952)

$$Q_b = A(U_0 - U_{mf}) \quad (52)$$

La ecuación anterior sobrestima el flujo en la fase burbuja (Peters et al. 1982) y puede modificarse de la siguiente manera:

$$Q_b = wA(U_0 - U_{mf}) \quad (52')$$

Donde considerando:

$$\varepsilon_b = 1 - \frac{L_{mf}}{L} \quad (53)$$

Se puede definir:

$$w = \frac{\varepsilon_b U_b}{(U_0 - U_{mf})} \quad (54)$$

Peters (ibid) obtuvo lo anterior para un reactor catalítico de lecho fluidizado, sin embargo es atractivo realizar simulaciones con (51), (52), y (51'), (52'), (53), (54) para observar los efectos en secadores de lecho fluidizado.

El modelo necesita también los valores siguientes: difusividad molecular del vapor de agua en aire (D) se obtiene según Hines y Maddox⁶ (1987) quienes utilizan los potenciales de Lennard Jones, y su corrección por presión, obteniendo las siguientes expresiones:

⁵ Citado por Kunni y Levenspiel (Ibid): Hilligardt K. y Werther J., 1986, *German Chem. Eng.*, 9, 215.

⁶ Hirschfelder J. O., Curtis C. F. y Bird R. B., 1954, *Molecular Theory of Gases and Liquids*, John Wiley & Sons, New York.

$$\left(\frac{kT}{\varepsilon_{AB}}\right) = \frac{T}{252.2} \quad (55)$$

$$\Omega = 0.33\left(\frac{kT}{\varepsilon_{AB}}\right)^2 - 1.3054\left(\frac{kT}{\varepsilon_{AB}}\right) + 2.4125 \quad (56)$$

$$D = 8.78 \times 10^{-5} \frac{T^{3/2}}{\Omega} \quad (57)$$

La viscosidad cinemática del aire se utiliza de acuerdo a los datos experimentales⁷ llegando a la siguiente correlación:

$$\nu = 4.57 \times 10^{-8} T + 4.73 \times 10^{-6} \quad (58)$$

Esta correlación no se corrigió por presión, debido a que aplica para presiones bajas y se considera muy poco efecto en estas condiciones.

La densidad del aire se obtiene por la ecuación de gases ideales ($T_0=273.15$, $P_0=760$ mm Hg):

$$\rho_A = \left(\frac{29 \text{ kg} / \text{kg} - \text{mol}}{22.4 \text{ m}^3 / \text{kg} - \text{mol}}\right) \left(\frac{T_0}{T}\right) \left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (59)$$

Dadas las condiciones de operación ($P_{\text{ciudad de mex}}=585$ mm Hg) se sustituyen para obtener la siguiente expresión:

$$\rho_A = \frac{272}{T} \quad (60)$$

Con los valores anteriores es posible obtener el coeficiente de transferencia de masa que atraviesa la fase burbuja (Sit y Grace, 1981)

⁷ Obtenidas de: Tables of Thermal Properties of Gases, *Nat. Bur. Standards Circ.*, (464), 1955, Cap. 2.

$$k_c = \frac{U_{mf}}{3} + \left(\frac{4D\varepsilon_{mf}U_b}{\pi d_b} \right)^{0.25} \quad (61)$$

La ecuación anterior considera que la fase densa se encuentra a U_{mf} , solo que si se considera una corrección vía las ecuaciones (52'), (53) y (54); debe sustituirse la velocidad de la fase densa, es decir:

$$C_{U_{mf}} = U_0 - w(U_0 - U_{mf}) \quad (62)$$

Lo anterior se realiza en todas las ecuaciones donde aparece U_{mf} , utilizando su sustitución, la ecuación (62). Esto ocasiona una corrección necesaria en las ecuaciones (47) – (50) y (51') para un nuevo valor del diámetro de la burbuja, el análisis contempla que el valor de w se consigue mediante un procedimiento iterativo

Zahed (1995) propuso una humedad en la fase burbuja al realizar balances de materia para obtener la humedad en la fase burbuja:

$$Y_b = \frac{6k_c\varepsilon_b Y + d_b G_b Y_1}{6k_c\varepsilon_b + d_b G_b} \quad (63)$$

Finalmente se puede estimar el coeficiente de transferencia de masa en la superficie del sólido en la fase densa⁸:

$$K = \frac{D(1+Y)}{d_p} \left[2 + 1.8 \left(\frac{d_p U_{mf}}{\nu} \right)^{0.5} \left(\frac{\nu}{D} \right)^{1/3} \right] \quad (64)$$

Esta última ecuación es necesaria para la condición (46). Sin olvidar que esta frontera es convectiva; se pueden realizar simulaciones para mostrar las diferencias de un modo gráfico y representativo. En la fig. 3 se presentan las modificaciones necesarias para implementar el algoritmo para el modelo de 2 fases, dichas modificaciones se presentan en los cuadros de cálculo punteados; esto indica realizar cálculos adicionales respecto al modelo homogéneo.

⁸ Citada por Zahed (1995): Ranz W. E., 1952, Friction Transfer Coefficients for Single Particles and Packed Beds, *Chem. Eng. Prog.*, **48**, 247-256.

III. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

La metodología experimental puede dividirse en los siguientes apartados:

- Determinación de parámetros.
- Pruebas de secado en el lecho fluidizado.

III.1.- Material.

La especie *hypochondriacus* de amaranto se utilizó para los presentes experimentos, y se escogió por ser la más consumida en el país, la segunda variedad en importancia es la especie *cruentus*. El porcentaje de agua que poseen las semillas mencionadas oscila entre 11 y 13% (Bresani y col. 1984 y Kulkarni 1988); sin embargo, en condiciones de saturación el porcentaje de agua es de 17%. Con ésta información la semilla utilizada se saturó antes de cargarse al secador.

III.2.- Equipo Experimental.

El equipo principal para la obtención de las curvas de secado consta de un secador de acrílico (D.I. 0.095m; H=.44m) con paredes aisladas y una placa distribuidora con 233 orificios de .001 m de diámetro en arreglo triangular el cual se muestra en la figura 4. El secador se alimentó con una corriente de aire anhídrico por medio de un compresor con líneas de acero galvanizado (D.I 0.02 m) y sus filtros, dicha corriente se reguló por medio de un banco de rotámetros que permite una alimentación de 0.028 a 0.425 m³ estándar por minuto a 391.9 kPa (man.).

Para el calentamiento del aire de alimentación se empleó una batería de 10 resistencias tipo abrazadera montadas en la tubería, y por medio de un controlador (Chromalox mod. 3910) fue regulado su funcionamiento a la temperatura deseada. Los datos de la evolución de la temperatura en el lecho fueron tomados con un termopar espárrago unido a un registrador (Zipp & Zonen mod. Bd 112) generando las cartas de lectura.

III.3.- Determinación de las propiedades físicas.

Diámetro de partícula (dp).

Se obtuvo a partir de un análisis de tamizado colocando 130 grs. de amaranto proveniente de un lote de 0.9 kgs. en mallas de apertura: 1.18, 1.00, 0.71 y 0.50⁹ mm (Automation Mod. 52). Y dispuestos en un vibrador (Endecotts Mod. 1380). Al final de la

⁹ Los valores corresponden a las designaciones 16, 18, 25 y 35 de la clasificación estándar Tyler.

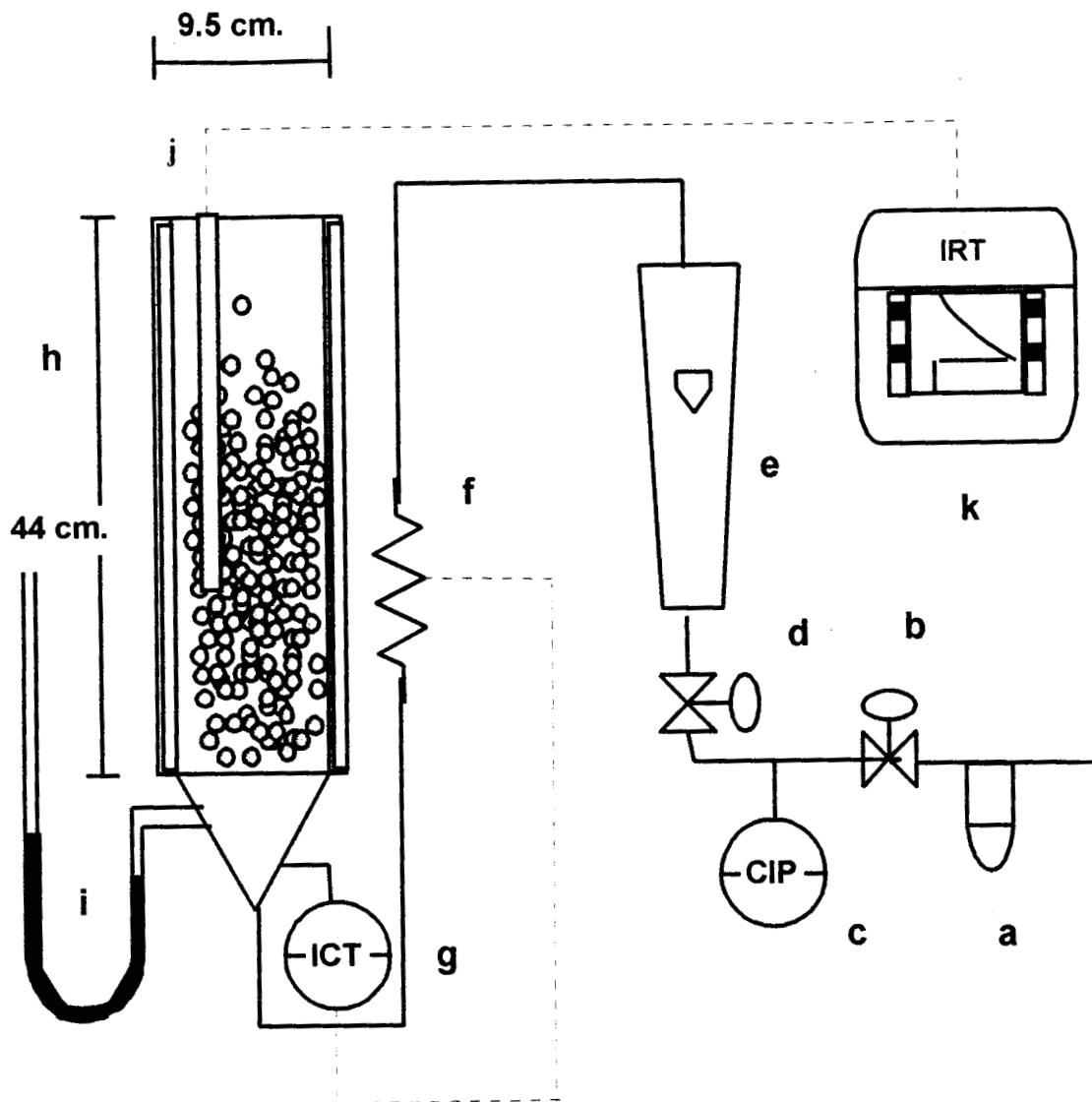


Fig. 4. Arreglo y disposición del lecho fluidizado, el cual consta de los siguientes dispositivos: a. trampa de condensados evita la introducción de humedad al sistema, b. válvula reguladora del flujo de aire, c. manómetro indicador de la presión a la que el aire entra al sistema, d. válvula reguladora de aire medido en el rotámetro e., f. batería de resistencias eléctricas reguladas por el controlador de temperatura Chromalox mod. 3910 g., h. Secador de lecho fluidizado con las paredes aisladas, i. Manómetro, j. termopar espárrago unido al registrador k con un aparato de pluma (Kipp & Zonen) Mod. BD 112.

corrida se analizó la fracción peso de cada tamaño con una balanza analítica (Ohaus Mod. Analytical plus) y se obtuvo el diámetro promedio correspondiente.

Fracción de espacios vacíos.

Con semillas secas empacadas en una probeta volumétrica de 500 ml, se desplazó el aire de la probeta con un líquido, etanol en éste caso, hasta lograr el aforo, obteniendo el volumen de los espacios vacíos con la siguiente fórmula:

$$\varepsilon = \frac{\text{volumen del liquido de aforo}}{\text{volumen total}} \quad (65)$$

Esfericidad.

Mas que determinado al ser el amaranto una partícula esférica se considero $\phi_s=1$.

Densidad empacada.

Se obtiene al dividir el peso de la muestra entre el volumen total ocupado por el sólido:

$$\rho_E = \frac{\text{peso del amaranto}}{\text{volumen total}} \quad (66)$$

Densidad aparente.

Esta densidad se obtiene dividiendo el peso de la muestra entre el volumen corregido, obtenido al eliminar el volumen correspondiente a los espacios vacíos entre partículas:

$$\rho_B = \frac{\text{peso del amaranto}}{\text{volumen de la probeta } (1 - \varepsilon)} \quad (67)$$

III.4.- Determinación de propiedades hidrodinámicas.

Velocidad mínima de fluidización (U_{mf}).

Esta propiedad se obtuvo vía el dispositivo mostrado en la fig. 3. donde el aire se reguló mediante la válvula **d**, determinando el flujo de aire a alimentar a partir del rotámetro, y la caída de presión en el manómetro **i**. En el lecho fluidizado se cargaron 0.90 kgs. de amaranto. Al inicio de la prueba la válvula de alimentación del aire estaba totalmente cerrada, de tal forma que se fue aumentando gradualmente el flujo hacia el lecho, obteniendo una gráfica de velocidad del aire versus caída de presión en el lecho en escala logarítmica.

Fracción de espacios vacíos mínimo de fluidización (ϵ_{mf}).

Simultáneamente a la determinación de U_{mf} es posible obtener ϵ_{mf} a partir del volumen del lecho en condiciones mínimas de fluidización (V_{mf}) de acuerdo a la siguiente expresión:

$$V_{mf} = \frac{\pi}{4} d_t^2 L_{mf} \quad (68)$$

$$\epsilon_{mf} = \frac{V_{mf} (1 - x_s)}{V_{mf}} \quad (69)$$

x_s es la fracción volumen de la muestra y puede obtenerse de los resultados obtenidos del lecho fijo debido a que la cantidad de sólidos permanece constante.

III.5.- Determinación de propiedades termodinámicas y de transporte.

Capacidad calorífica del grano (C_B).

La capacidad calorífica del amaranto se determinó por medio de un calorímetro diferencial de barrido (DSC) (TA instruments) modelo 2010 (fig. 5) el cual se controla con un software comercial. El aparato es previamente calibrado, y utiliza al elemento Indio como material de referencia. Así fueron sujetos a prueba, muestras encapsuladas de 12 a 16 mg.

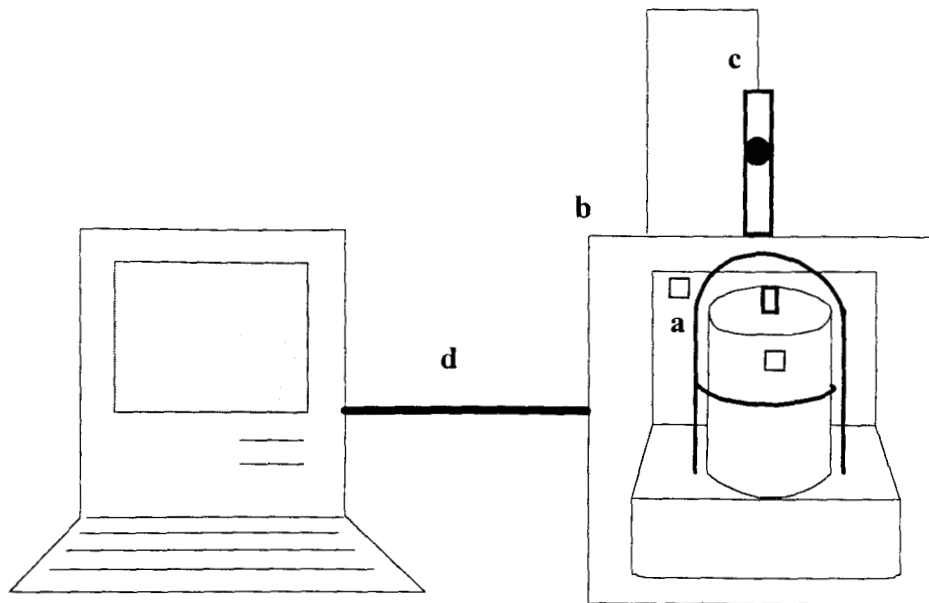


Fig. 5. Calorímetro diferencial de barrido mod. 2010 de TA instrument, consta de un a. calorímetro cilíndrico, b. panel de control, c. rotámetro, y d. una interface a la computadora.

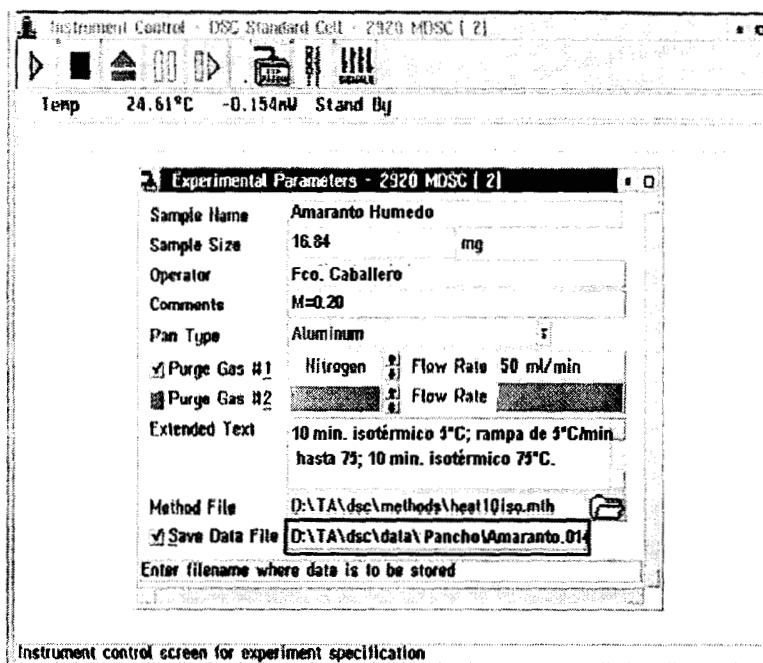


Fig. 6. Ventana del software correspondiente a una corrida típica en el calorímetro.

En un ambiente controlado con nitrógeno y con humedades de 0.2 y 0.05 respectivamente; el intervalo de operación fue de 5 a 75 °C. El aparato permite fijar la velocidad de calentamiento, la figura 6 muestra una ventana del software para éste propósito. La rampa de calentamiento utilizada fue de 5°C/min, posteriormente se sometió la muestra a la temperatura constante de 75°C por 10 min. De tal forma que se obtuvo la capacidad calorífica para el intervalo del interés requerido.

Coefficiente de difusividad efectiva.

El coeficiente de difusividad se obtuvo en una cámara de humedad diseñada de acuerdo a Karatas. (1997) La disposición del equipo se muestra en la figura 7, donde aire seco controlado por una trampa (a) se alimenta por una válvula (d) que permite leer el flujo en el rotámetro (e), también permite controlar la temperatura de alimentación del aire (g) en la cámara (h) donde se coloca una bolsa con granos de amaranto del género *hypochondriacus* de 10 gramos de peso; el equipo se estabiliza y posteriormente se abre la cámara (h) se deposita la bolsa en su interior y con la ayuda de un cronómetro se secan dichas muestras para diversos tiempos; al término del tiempo de prueba, las muestras se someten a la determinación de su humedad en una estufa de vacío donde una de ellas se toma sin secarse y la cual servirá para el tiempo inicial ($t=0$, $M=M_0=0.2 \pm 2\%$) y de acuerdo a lo establecido por Hart y Fisher (1971).

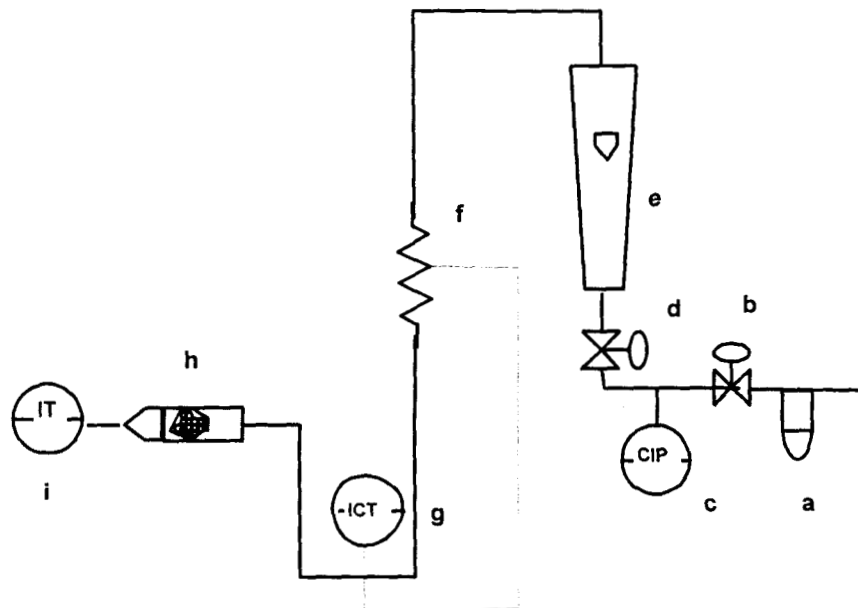


Fig. 7. Cámara de humedad para la determinación del coeficiente de difusividad efectiva; el dispositivo consta de: trampa de humedad a, válvula general b, manómetro c, válvula reguladora de aire d, rotámetro e, batería de resistencias que calientan el aire a alimentar f, por medio de un controlador de temperatura g, la muestra es depositada en sacos y colocada en la cámara h, inalmente se registra la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo i en el aire que abandona el dispositivo.

Coeficiente de actividad de agua a_w .

Se determinó con un medidor de actividad de agua que consta de una cámara de actividad modelo AWS 3000 (Ebro), en donde se colocó una muestra de semillas de amaranto asegurando que cubra el fondo de la misma; el aparato utilizado para registrar los valores obtenidos es un medidor modelo AWX 3001 (Ebro). La cámara mencionada posee una chaqueta que permite mantener la temperatura constante a través de un circuito de agua y el sensor que presenta se estabiliza manteniendo la muestra por un tiempo mínimo de 90 minutos; tiempo necesario para alcanzar el equilibrio del vapor de agua en la cámara y registrar la lectura de la actividad en la pantalla del registrador AWX 3001. Ambos aparatos se encuentran unidos por un conector eléctrico. La actividad de agua se determinó a 22, 25 30, 40 y 50 °C respectivamente. El aparato fue calibrado previamente con soluciones de contraste comerciales. El circuito de agua se estableció por medio de un baño de agua TC 500. (Brookfield). La figura 8 muestra un esquema del montaje del dispositivo.

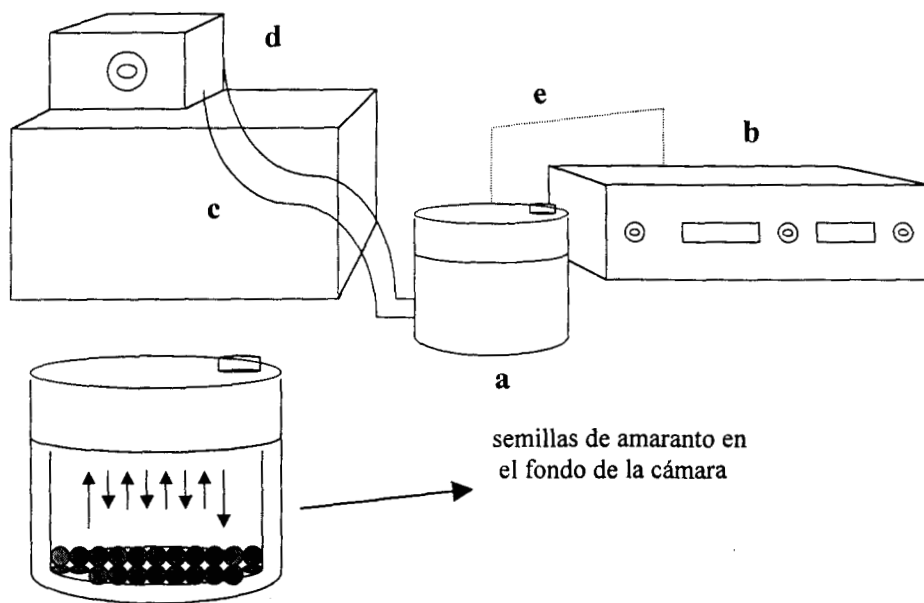


Fig. 8. Medidor de actividad de agua consta de: **a.** cámara de actividad AWS 3000, **b.** registrador de actividad AWX 3001, **c.** circuito de agua, **d.** baño de temperatura constante, y **e.** Conector.

III.6.- Metodología experimental.

Determinación de las curvas de secado.

El equipo experimental mostrado en la Fig. 3 se estabiliza térmicamente a una de las temperaturas previamente establecidas (40, 50, 60, y 70°C respectivamente) y a una determinada velocidad del aire (0.41, 0.565 y 0.742 m/s); alcanzado el equilibrio se adicionan al lecho 0.68 kg. de amaranto de humedad inicial conocida. Ese momento fue considerado el tiempo inicial del experimento. Accionando un cronómetro, la evolución de la temperatura fue detectada de forma continua con un registrador Modelo BD 112 de la (Zipp & Zonen), obteniendo así los registros de la temperatura del lecho durante todo el tiempo que dura la corrida

Simultáneamente para la determinación de la humedad, a diversos intervalos de tiempo se tomaron muestras de aproximadamente 0.01 kgs. de amaranto, con la ayuda de un muestreador. Estas muestras fueron almacenadas herméticamente para determinar su humedad de acuerdo al procedimiento proporcionado por Hart y Fisher (1971) utilizando una estufas de vacío Modelo 207370 (Hotpack) para dicho propósito

IV. RESULTADOS Y DISCUSION.

En éste capítulo, se presentan los resultados obtenidos de la caracterización física e hidrodinámica del lecho, luego se presentan y analizan los parámetros termodinámicos y de transporte, al final del capítulo se realizan las simulaciones del secador de lecho fluidizado con los valores precedentes.

IV.1.- Propiedades físicas.

En la tabla 2 se muestran las propiedades físicas del amaranto; las semillas poseen un tamaño promedio de 0.001m y una esfericidad de 1.0. La fracción de espacios vacíos correspondiente al lecho fijo no varía apreciablemente, si se compara con un lecho en condiciones mínimas de fluidización; lo anterior indica que el lecho de amaranto presenta poca expansión en las condiciones mencionadas.

IV.2.- Propiedades Hidrodinámicas.

La fracción de espacios vacíos representa un 38% en condiciones mínimas de fluidización, y puede mencionarse que el valor permanece constante si se compara con valores obtenidos en lechos fijos. Con las condiciones mencionadas se obtuvo una velocidad mínima de fluidización de 0.26 m/s (ver figura 9); sustituyendo $\phi_s \rightarrow 1$ para resolver la ecuación (29) corregida por presión se obtiene un valor de $U_{mf}=0.27$ m/s lo que significa un error del 5% comparado con las corridas experimentales mostradas en la tabla 2 y la figura 9. Es de mencionar que en el rango de humedad estudiado ($0.05 \leq M \leq 0.2$) la velocidad mínima de fluidización no sufre cambios de magnitud de tal forma que las simulaciones se harán con este valor. Es posible clasificar al grano de amaranto de acuerdo a lo establecido por Geldart (1973), como un sólido tipo **B**. A partir del valor de U_{mf} se estableció el intervalo de operación de la velocidad de alimentación del aire como: $1.6U_{mf}$, $2.2U_{mf}$ y $2.8U_{mf}$; de acuerdo al flujo máximo permisible en el secador.

Tomando en cuenta estos valores de la velocidad superficial del aire y calculando respectivamente los valores de U^* con la ecuación (31), tomando como referencia d_p^* (ecuación 30), es posible ubicar el régimen de fluidización inherente a este sólido.

Estos resultados se presentan en la figura 10, donde se constata que el lecho fluidizado de granos de amaranto se comporta en el límite entre el lecho burbujeante y el lecho en erupción, estas condiciones no son mencionadas en el trabajo de Zahed y col. (1996).

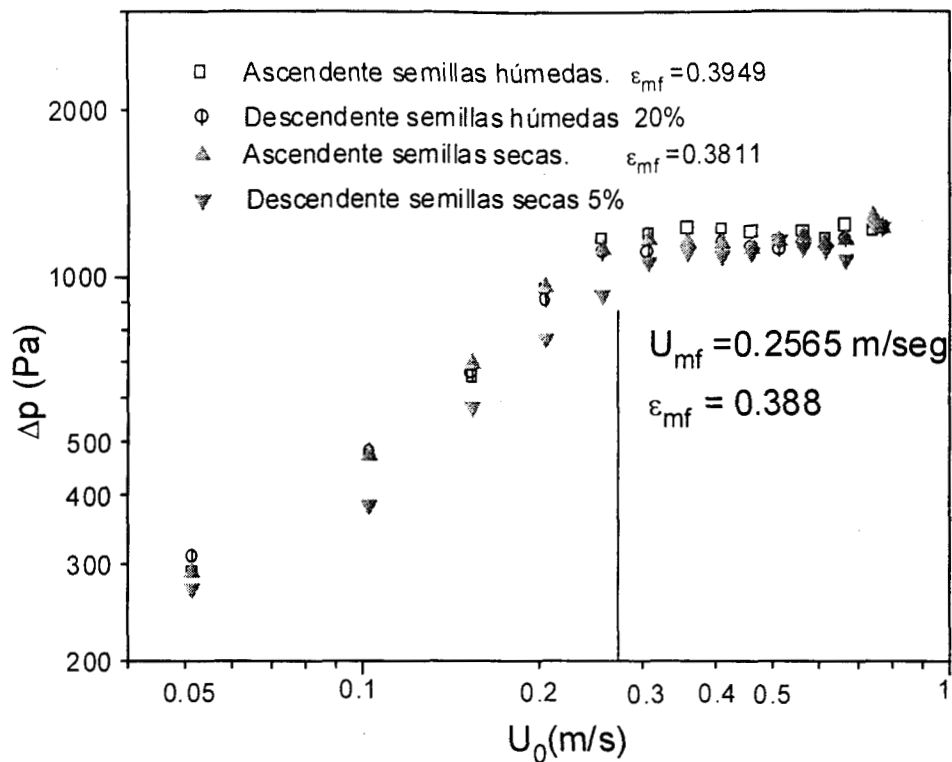


Figura 10. Ubicación del régimen de fluidización para las condiciones de operación en el secador.

Tabla 2. Caracterización del amaranto.

Propiedades Físicas.			
$d_p(\text{m})$	$\phi_s (-)$	$\rho_p(\text{kg/m}^3)$	$\rho_{emp}(\text{kg/m}^3)$
0.001	1	1371.6	858.6
Parámetros Hidrodinámicos.			
$\epsilon_m (-)$	$\epsilon_{mf} (-)$	$U_{mf}(\text{m/s})$	$U_{mf}(\text{teo.})$
0.374	0.38	0.257	0.27

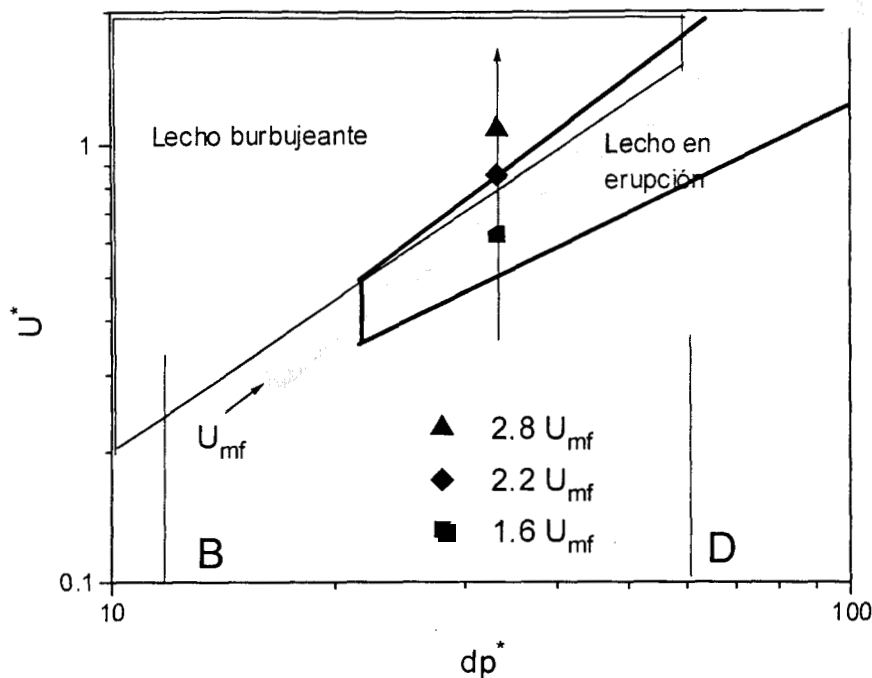


Figura 9. Ubicación del régimen de fluidización para las condiciones de operación en el secador.

IV.3. Propiedades termodinámicas y de transporte.

Difusividad efectiva.

Los resultados obtenidos con la cámara de humedad se muestran en la figura 11, donde la evolución de la humedad con respecto al tiempo se ajustó con la ecuación (15), considerando solo el primer término de la sumatoria se alcanzó un buen ajuste. Con los valores de la difusividad efectiva así obtenidos, se procedió a realizar un ajuste tipo Arrhenius con respecto a la temperatura, los resultados se observan en la figura 12. El ajuste encontrado indica que en el rango de humedad estudiado, no existe dependencia con respecto a esta variable. A manera de comparación el valor de energía de activación de la ecuación obtenida es 0.46 veces la energía que requiere el trigo¹⁰. Los registros promedio producto de tres corridas experimentales se muestran en el apéndice IV, expresando los márgenes de error por medio de la desviación estándar.

¹⁰ Citado por Zahed y Epstein (1992): Becker H. A. y Isaacson R. A., 1955, A Study of Internal Moisture Movement in the Drying of the Wheat Kernel, *Cereal Chem.*, 32(3) 212-226.

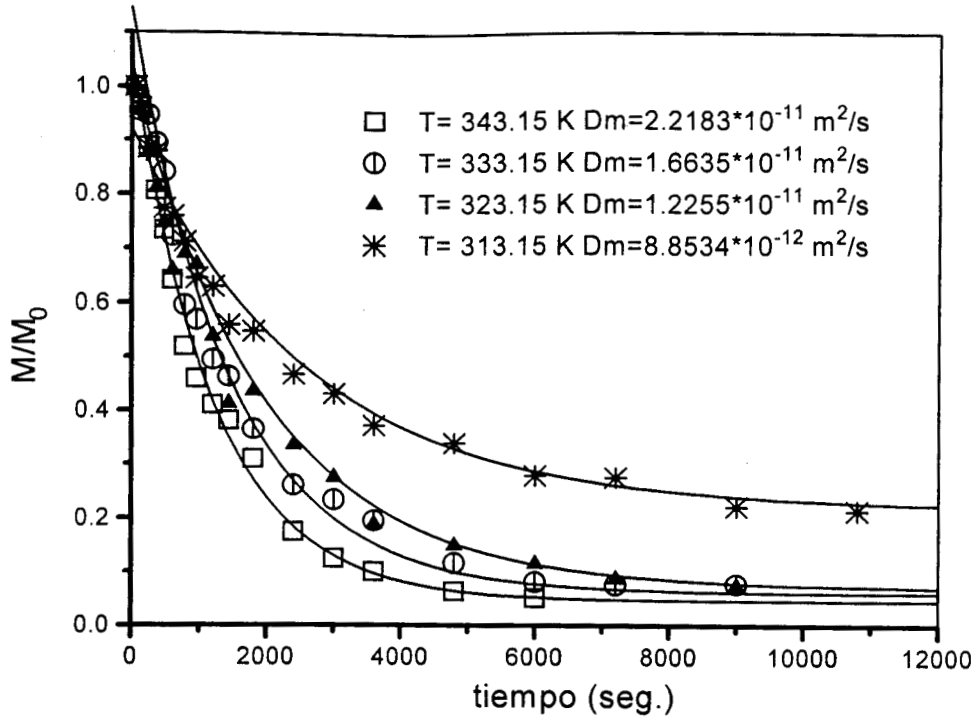


Fig. 11. Determinación de la difusividad efectiva a diferentes temperaturas.

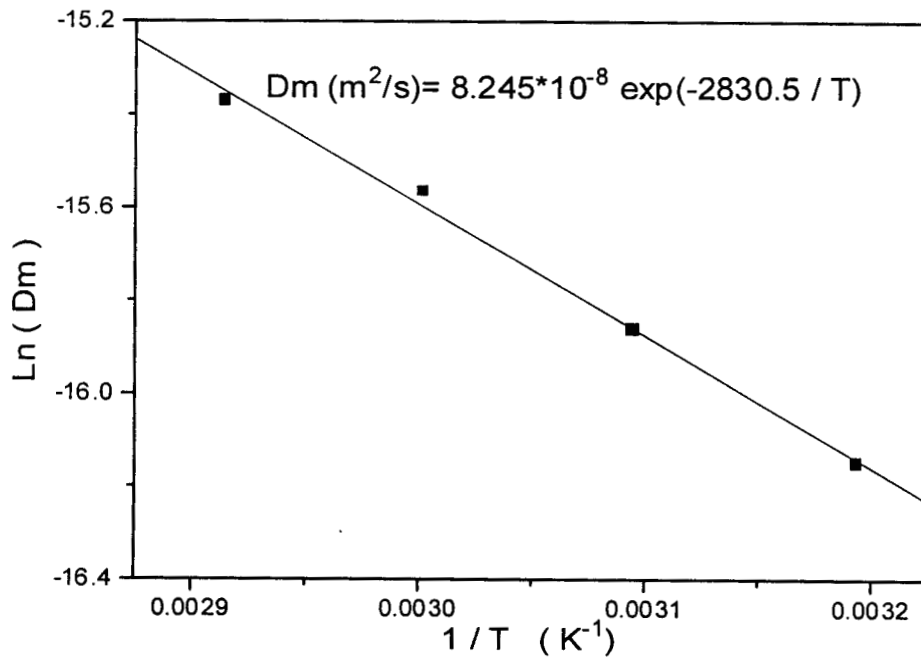


Fig. 12. Obtención de la expresión Arrhenius para la semilla de amaranto.

Capacidad calorífica.

La figura 13 muestra un termograma (gráfica de flujo de calor versus el tiempo de aplicación recordando que este tipo de prueba se programa en el calorímetro), la suavidad de la curva y la ausencia de máximos y mínimos al transcurrir el tiempo de aplicación de la rampa de calentamiento, permiten comprobar la nula descomposición de la semilla en el rango de humedad y temperatura elegido. Sin embargo no puede enunciarse alguna conclusión sobre la textura, sabor, u otras propiedades adicionales, para esto deben realizarse los análisis químicos correspondientes.

La capacidad calorífica en un rango de 20 a 70°C se muestra en la figura 14, donde se aprecia la influencia de la humedad; al aumentar su contenido ($M=0.2$) la capacidad calorífica es proporcional, y al disminuir ($M=0.05$) actúa de forma similar, aunque se pierde la linealidad mostrada en el rango alto. Es posible realizar el ajuste lineal global tomando en cuenta las observaciones del texto de Mohsenin (1980) ($r^2=0.98$, los registros experimentales se encuentran en el apéndice IV), y aplicar la correlación obtenida en el intervalo de estudio con confiabilidad. Otra alternativa adecuada implica utilizar un valor promedio de capacidad calorífica debido a los cambios pequeños que experimentan los sólidos en esta propiedad.

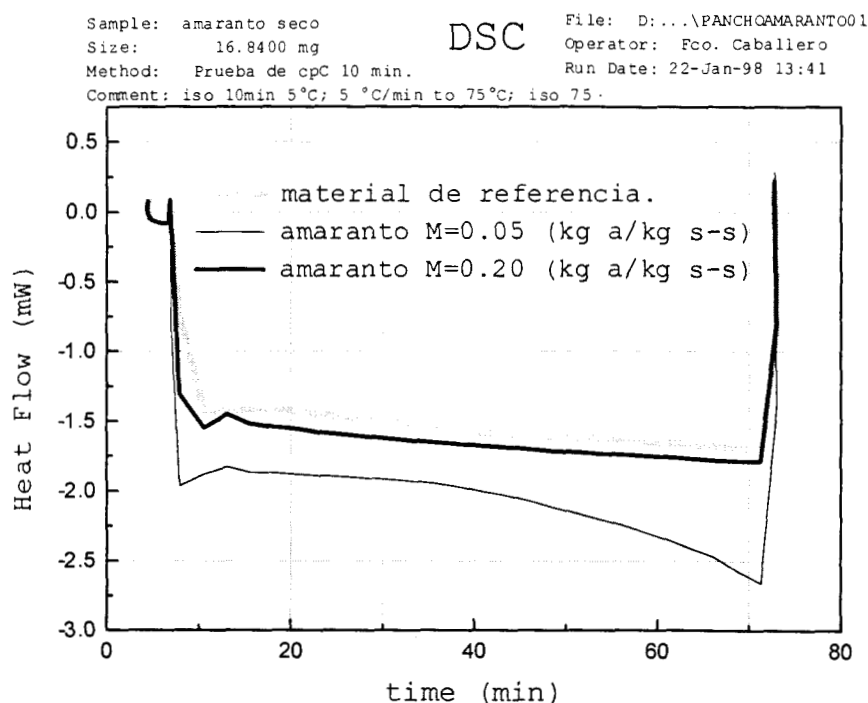


Fig. 13. Estabilidad térmica en la semilla de amaranto, vía flujo de calor programado en el calorímetro diferencial de barrido, no existe zona que indiquen descomposición.

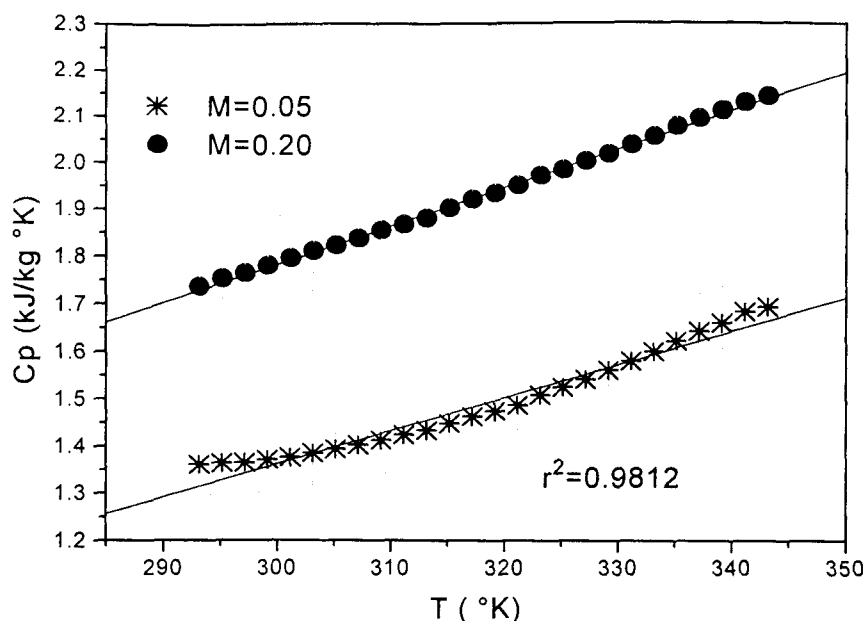


Fig. 14. Obtención de la capacidad calorífica del amaranto la correlación es: $C_p = M(7.53T + 556.8) + 6.72T - 793.5$ [J/kg K]

Actividad de agua.

Los valores determinados experimentalmente presentan poco comportamiento sigmoide que es una característica de muchos alimentos aunque no es única. Granos como el café (Jowwit 1983) muestran un comportamiento similar al amaranto; para bajas humedades existen valores altos de actividad. Los datos obtenidos se sometieron a diversos ajustes de acuerdo a las correlaciones propuestas en la literatura (Rizvi y Benado, 1984; Tolaba y col., 1995). La ecuación GAB muestra los mejores resultados en intervalos de humedad bajos ($M \leq 0.07$), pero su carácter cuadrático limita sus predicciones cuando $a_w \rightarrow 1$ (Mc Minn y Magee, 1997) y desafortunadamente los datos obtenidos para el amaranto presentan esta limitación (ver tabla XIII del apéndice IV para $M=0.158$)

Lo anterior justifica el uso de la ecuación modificada de Henderson que no posee la dificultad mencionada, la figura 15 muestra valores de actividad versus humedad a temperatura constantes, mientras que en la figura 16 se muestran valores de humedad versus temperatura a humedad constante. En las gráficas se observan pocos puntos para altas humedades, lo anterior se debió a la saturación del medidor indicando agua libre. y un valor constante $a_w=1$.

La importancia de los valores de a_w y su derivada, radican en el cálculo del calor de vaporización - desorción, necesarios en la ecuación (21). Posteriormente el valor se introduce en los balances de energía de los modelos a utilizar.

Las determinaciones experimentales a 22 y 25°C tienen la intención de ser corroboradas y cotejadas en la literatura de los alimentos, debido a que se han convertido en condiciones estándar para el reporte del coeficiente de actividad en esta rama de investigación.

Finalmente se menciona que una forma adicional aunque cualitativa de comprobar las ecuaciones de los parámetros mediante sus datos experimentales (los registros mencionados se muestran en el apéndice IV), es el ajuste con los modelos a simular, lo que es materia del último apartado de este capítulo.

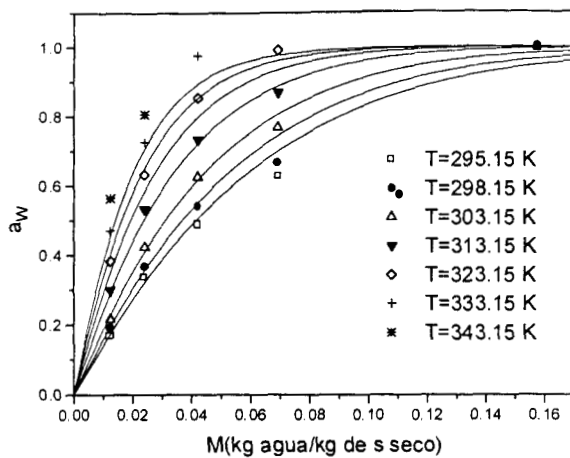


Figura 15. Isotermas obtenidas mediante la correlación de Henderson:

$$a_w = 1 - \exp\left[-(T - 273.15)M^{1.08496}\right]$$

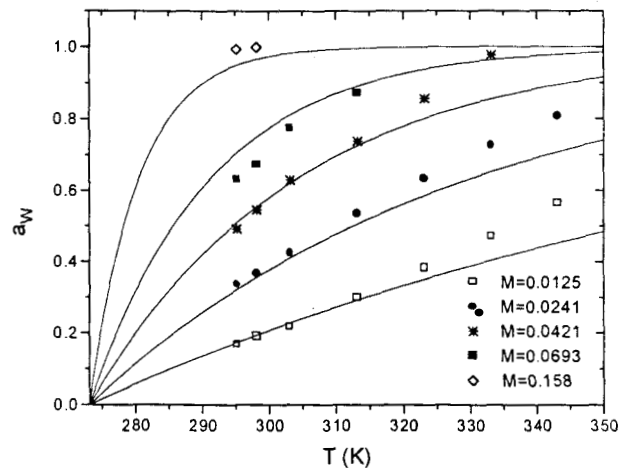


Figura 16. Ajuste de los valores de actividad a humedad constante a diversas temperaturas, utilizando la ecuación de Henderson.

IV.4.- Cinéticas de secado.

Los datos obtenidos en las distintas corridas experimentales se encuentran graficados en las figuras 17 a 20 y en el apéndice III se muestran los registros respectivos y su margen de error. Primeramente se observan curvas que presentan solo velocidad decreciente de secado indicando que la semilla de amaranto posee un comportamiento similar al de otros cereales.

Otra observación de importancia es que la rapidez de secado aumenta con la velocidad del aire; sin embargo una comparación con las diferentes temperaturas de alimentación del aire, muestran un mayor efecto de esta última y puede mencionarse que acelera en forma notoria la evaporación del agua, al grado que a la menor velocidad de operación del aire ($1.6 U_{mf}$) y 70 °C, el lecho iguala la temperatura a los 67 minutos de operación, para 60°C ocurre a los 90 minutos y para 50°C sucede hasta 101 minutos (ver figura 17).

Debe recordarse también que los lechos fluidizados a velocidades bajas, pueden mostrar zonas heterogéneas (sin mezclado perfecto en los sólidos), sobre todo en los bordes de la placa distribuidora donde es probable la existencia de zonas muertas que desaparecen con el aumento de la velocidad misma, y con el tiempo de secado mismo.

La velocidad de fluidización, favorece las condiciones de secado esto involucra transporte convectivo y puede apreciarse en los perfiles de humedad que muestran diferencias para las diferentes velocidades de alimentación del aire; sin embargo el efecto por temperatura es más apreciable, lo que corrobora que el mecanismo que controla el secado es el difusional observando curvas de velocidad decreciente de secado en todo el intervalo de operación.

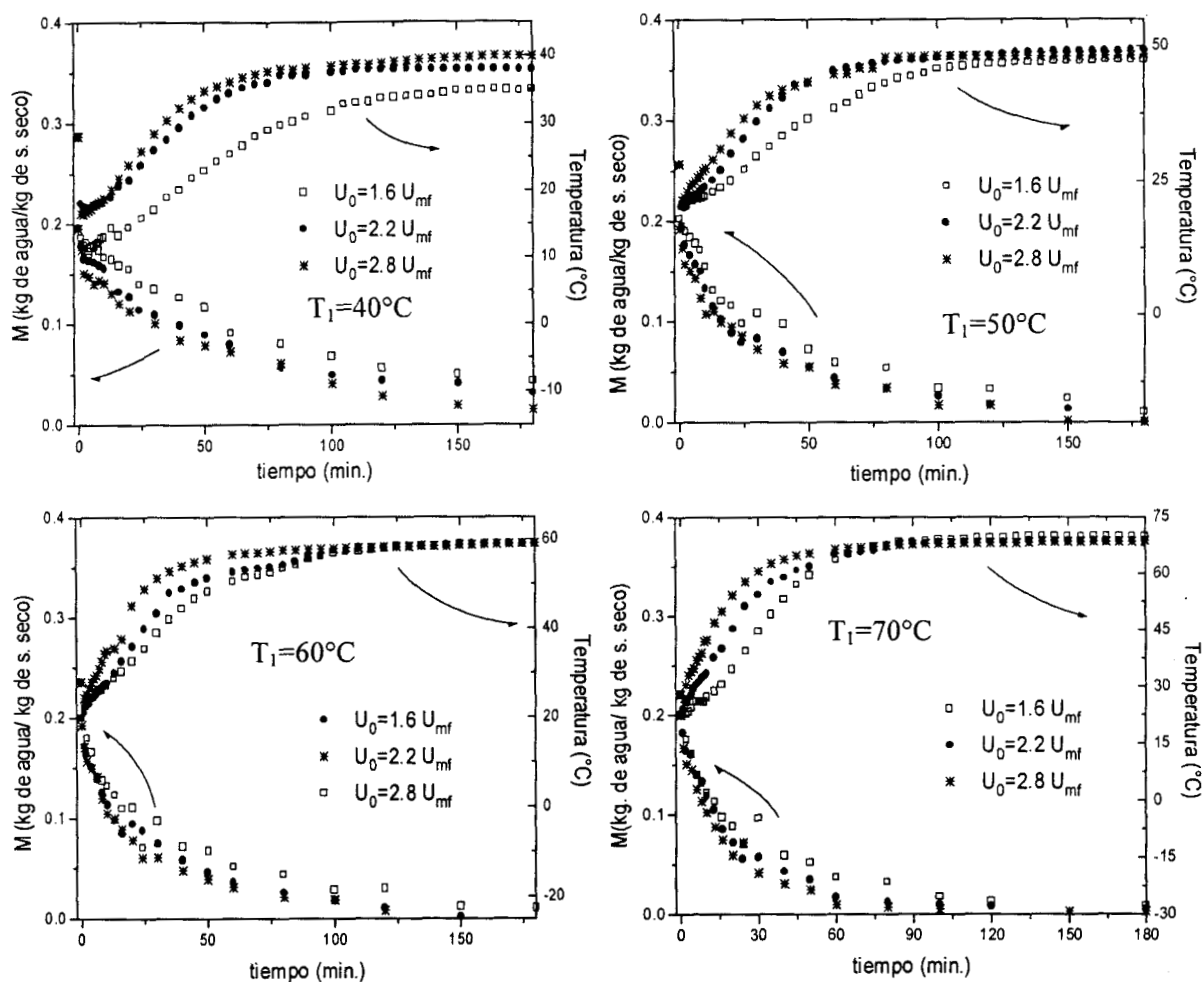


Figura 17. Registros experimentales de la temperatura y humedad del grano versus tiempo. Temperatura del aire alimentado: 40, 50, 60 y 70°C respectivamente.

IV.5.- Simulación del comportamiento del secador de lecho fluidizado por lotes.

Las simulaciones se llevaron a cabo siguiendo el algoritmo mostrado en la figura 3 del capítulo II. Los valores de los distintos parámetros utilizados se encuentran resumidos en la tabla II del apéndice II, las constantes de las ecuaciones se encuentran en la tabla III y las variables de operación se presentan en la tabla IV del mismo apéndice. La figura 18 muestra el comportamiento del lecho fluidizado a una temperatura de alimentación del aire de 50°C para los diferentes valores de U_0 ; el modelo homogéneo subestima los datos experimentales y no es comparable con el modelo de dos fases que estima con un apreciable margen de error, las correlaciones aplicadas para la fase burbuja son las mismas que utilizó Zahed (1996) en su estudio y que originalmente publicó Toomey y Jonhstone (1952).

Esta diferencia tan pronunciada entre ambos modelos hizo necesaria una búsqueda adicional en la literatura que permitió un análisis de los resultados obtenidos por Peters (1982), y basados en las desviaciones al modelo de dos fases, que Yacono y col. (1979) presentaron al realizar un compendio de datos experimentales. La teoría de Peters se encuentra basada en la inversión del flujo de la fase burbuja a la fase densa ó emulsión, lo anterior contempla una redistribución de las cantidades del fluido que viajan por ambas fases y la necesidad de cuantificarlo mediante un coeficiente de inversión para la fase emulsión representado por la ecuación (54) del capítulo II. Además se encuentra apoyado por la ecuación (51') para la velocidad promedio de las burbujas propuesta por Hillgardt y Werther (1986), y que cubre todo tipo de partículas de la clasificación de Geldart (1973).

Remplazando las ecuaciones (51), y (52) por (51'), (52') y (54), se realizaron nuevamente las simulaciones para la temperatura de 50°C. Los resultados de este análisis se encuentran en la figura 18 y es muy apreciable la mejora en predicción del modelo de dos fases debido principalmente a un mayor flujo por la fase densa y una disminución en el diámetro de la burbuja. Estos valores pueden apreciarse en la tabla 3

Tabla 3. Principales parámetros del modelo de dos fases.

U_0 (m/s)	w (-)	C_{umf} (m/s)	d_b (orig)(m)	d_b (final)(m)	ϵ_b (-)
0.4101	0.07676	0.3984	0.022	0.0078	0.091
0.5637	0.21149	0.4987	0.034	0.0180	0.286
0.7175	0.27524	0.5906	0.045	0.0270	0.412

La figura 18-d presenta las simulaciones realizadas con las dos correlaciones para la fase densa y puede apreciarse adicionalmente que la correlación original (Toomey y Johnstone 1952) se ve afectada por el aumento de la velocidad del aire en forma inversa para los perfiles de humedad y temperatura. Este aumento se refleja en una mayor fracción de burbujas que expande el lecho (ecuación 53) y un mayor diámetro y velocidad de las burbujas (ecuación 49 y 51 respectivamente).

El análisis anterior permitió seleccionar la correlación de Peters (1982) para las simulaciones restantes y pueden apreciarse en las figuras (19), (20), (21) y (22).

Conforme aumenta U_0 , las predicciones de ambos modelos tienden a diferenciarse sobre todo en el perfil de temperaturas, donde el modelo de dos fases es el que menos se aproxima a la curva experimental. Este resultado es muy lógico, ya que al predecir un menor perfil de temperaturas, se espera en consecuencia, que el mismo modelo prediga un perfil de humedad menos pronunciado, aun cuando en este caso, ajuste mejor la curva experimental de humedad.

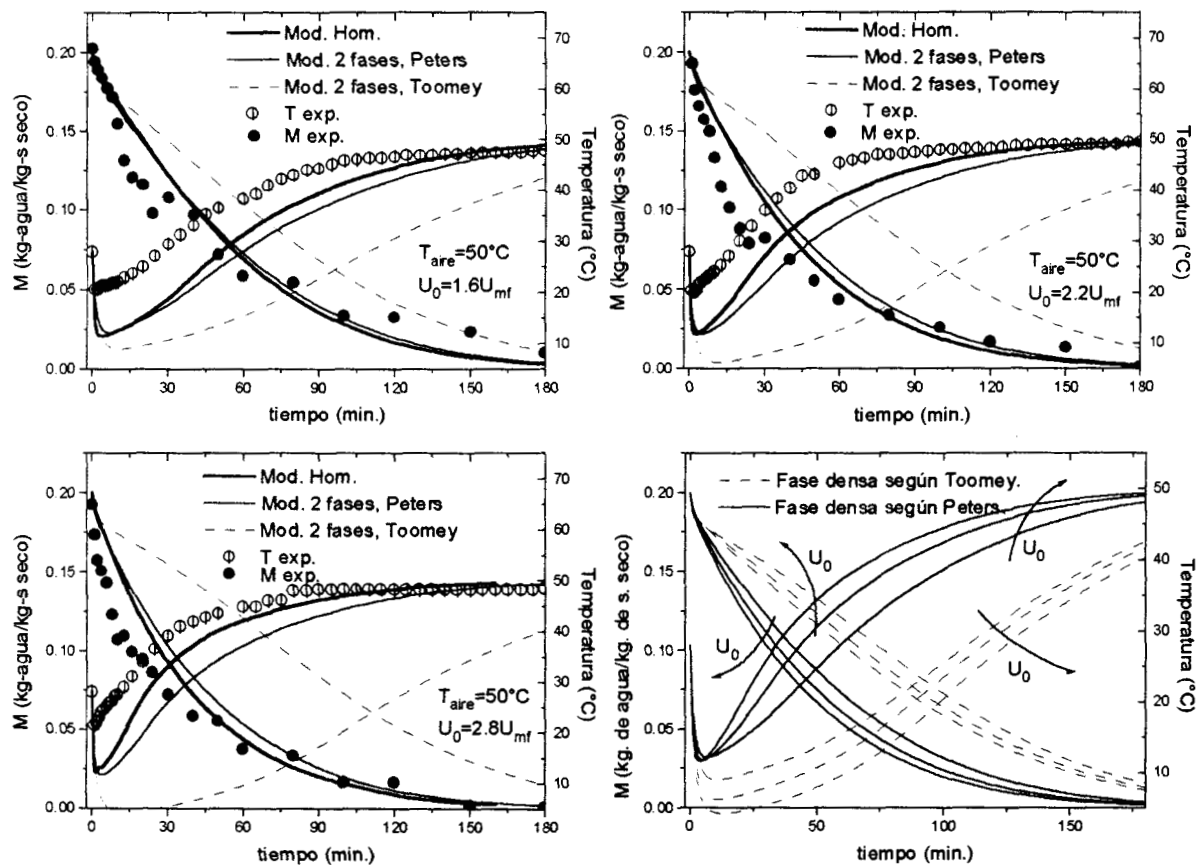


Fig. 18. Modelo de 2 fases con las dos alternativas de cálculo para la fase densa.

La figura 20 muestra el comportamiento del lecho fluidizado a una temperatura de alimentación del aire a 50°C. A $U_0=1.6 U_{mf}$, se observa la misma tendencia de los modelos reportados para la temperatura de 40°C (figura 19). Conforme aumenta U_0 el modelo homogéneo tiende a predecir mejor los perfiles de humedad y temperatura, sin embargo ahora ambos modelos, subestiman el patrón experimental de secado.

Para las temperaturas de 60 y 70°C. (figura 21 y 22 respectivamente.) Las predicciones del modelo homogéneo, son notablemente mejores, sobretodo a las velocidades de 2.2 y 2.8 veces el valor de U_{mf} .

Del análisis realizado se puede deducir que los modelos son sensibles, tanto a la variación de la velocidad del aire, como a la temperatura. Siendo más importante esta última. Aparentemente, las predicciones del modelo homogéneo no se ven efectuadas por el tamaño de los granos los cuales son pequeños si se comparan con los cereales más conocidos como el trigo, arroz y maíz.

Sorprendentemente, el modelo heterogéneo (dos fases), que involucra parámetros hidrodinámicos adicionales, es menos efectivo en sus predicciones que el homogéneo. Esto pudiera tener la siguiente explicación: No se debe perder de vista que el modelo de dos fases no toma en cuenta el calentamiento por burbujas; esto significa que la cantidad de aire que viaja por esta fase no contribuye al calentamiento del lecho. Reflejándose en la diferencia del perfil de temperaturas presentado por ambos modelos.

La expansión que experimentó el lecho al aumentar la velocidad del aire, no se presenta tan significativamente en granos como el trigo ó el maíz que son sólidos del tipo **D** de acuerdo a la clasificación de Geldart y que implementó Zahed (1996). Aunque en la figura 10 se muestra una ubicación para lechos burbujeantes y en erupción respectivamente, en forma visual se observó un régimen turbulento al aumentar la velocidad y la altura del lecho fue difusa, los valores mostrados en la tabla IV del apéndice II se obtuvieron como promedio de las fluctuaciones de altura en el lecho.

Es preciso señalar que la disposición del lecho utilizado para la determinación de las cinéticas de secado no contempló el control de la expansión en el mismo, esto es mantener la relación $L/D \rightarrow 1$. De acuerdo con Zahed (1996) esto permitiría una precisión en el modelo de dos fases, y se recomienda para trabajos futuros. Sin embargo se realizaron simulaciones que mantienen una altura constante en el lecho $L=0.11\text{m}$ (relación $L/D=1.2$), esto mantiene un valor fijo en la ecuación (53). Los resultados se muestran en la figura 23 y puede apreciarse una mejora en las predicciones al compararse con las simulaciones que sufren una expansión real representadas por los valores de $L/D > 1.2$.

Del mismo modo se realizaron simulaciones con las dos condiciones a la frontera (45) y (46), propuestas en el estudio de Zahed (1996); seleccionando la temperatura de alimentación del aire de 50°C en forma arbitraria para este análisis.

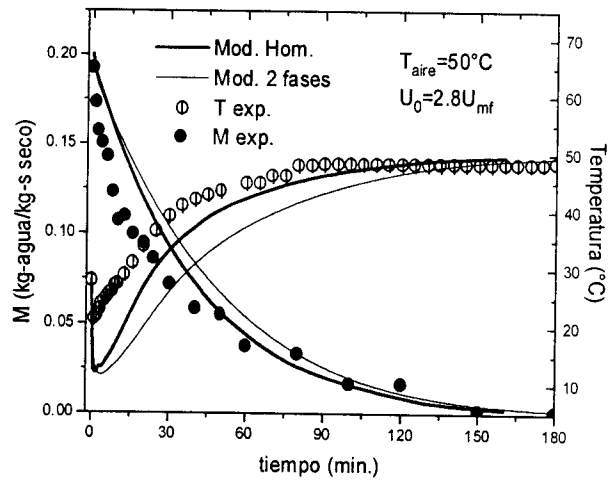
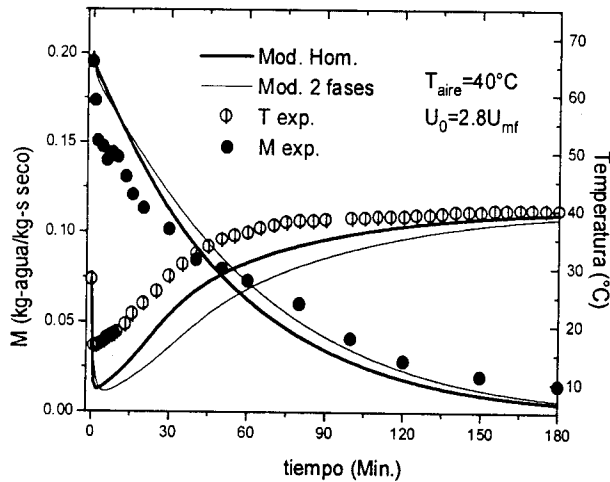
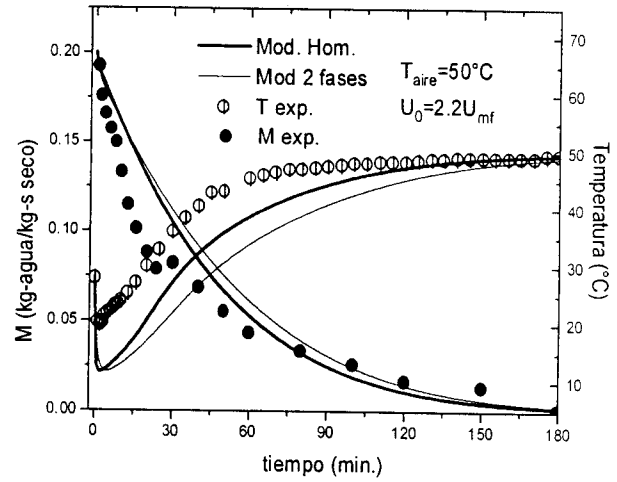
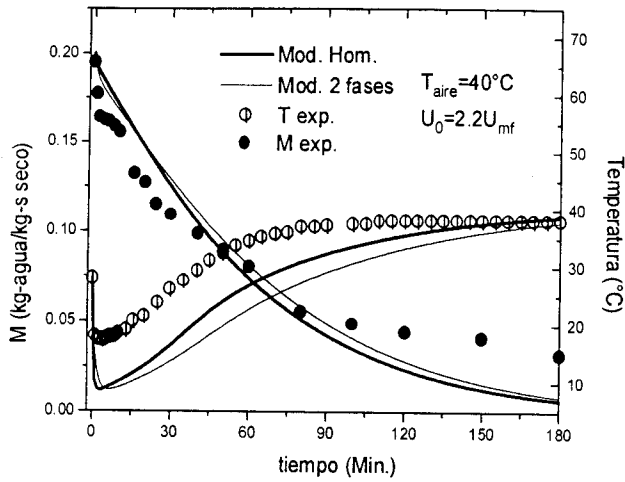
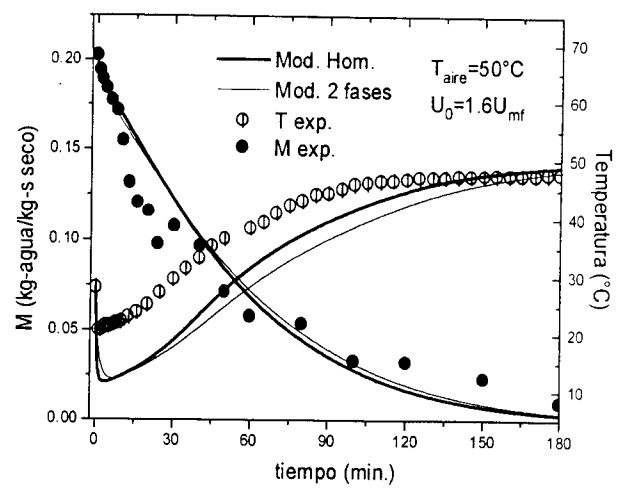
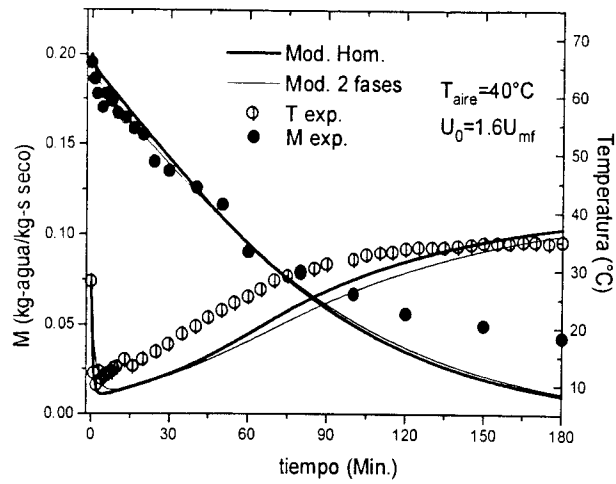


Figura 19. Comparación de los modelos para las distintas velocidades. Temperatura del aire = 40°C .

Figura 20. Comparación de los modelos para las distintas velocidades. Temperatura del aire = 50°C .

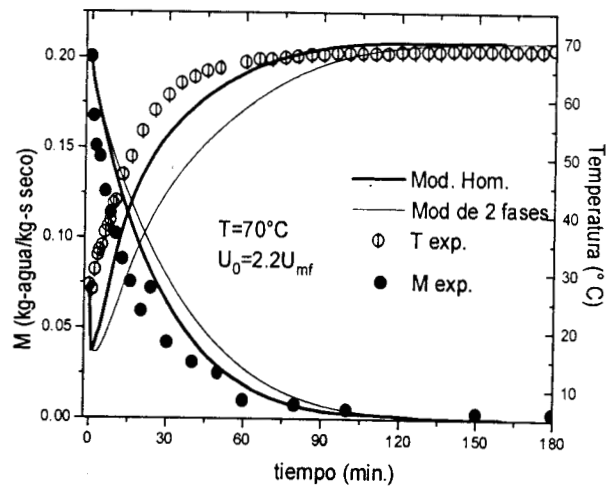
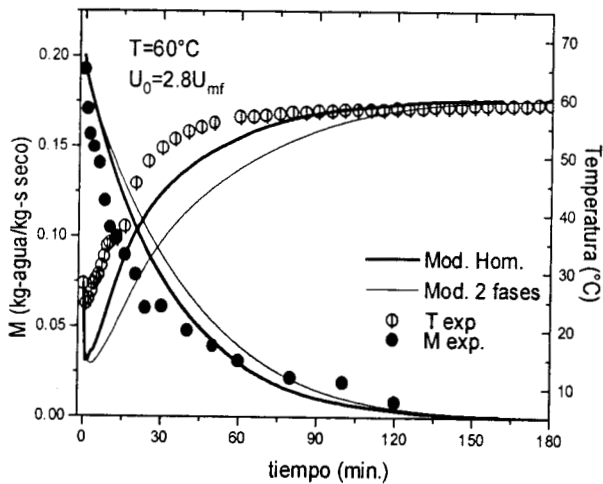
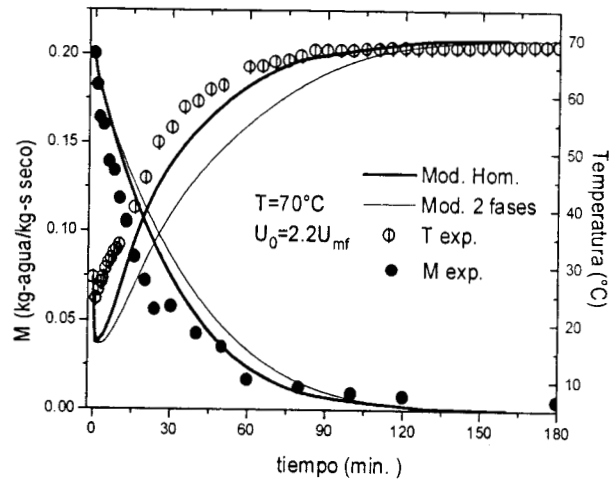
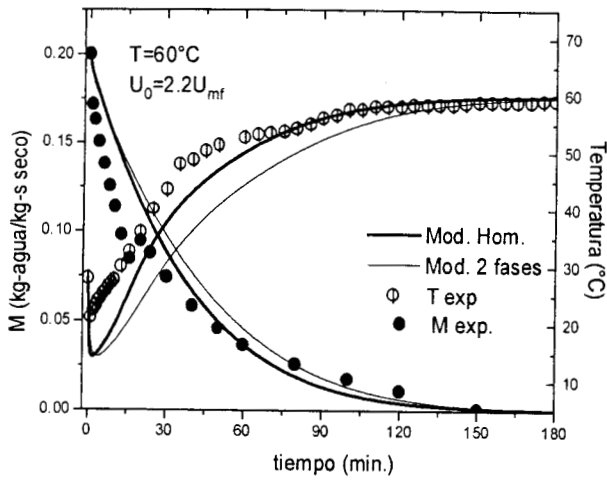
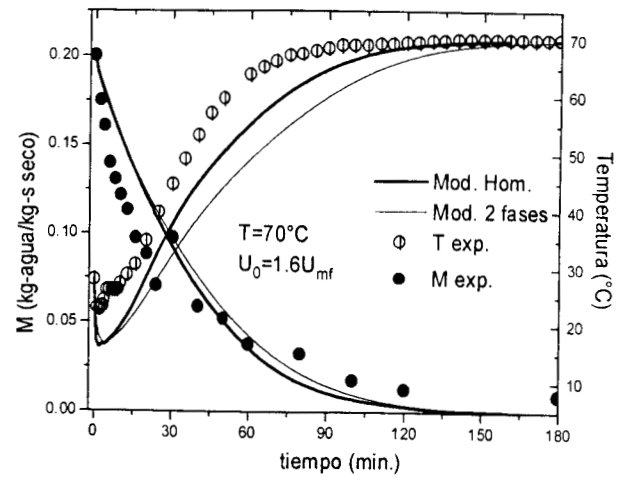
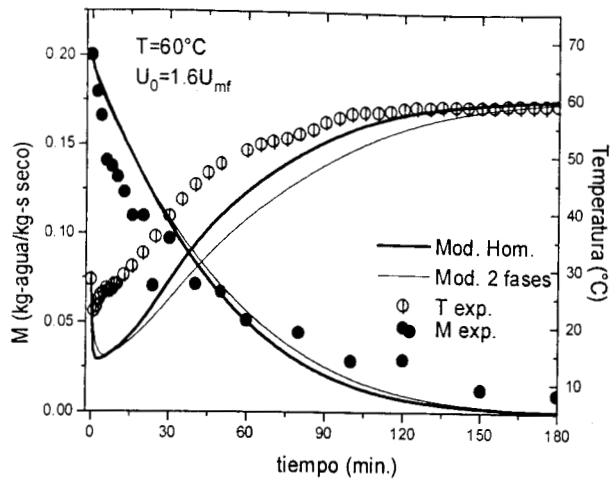


Figura 21. Comparación de los modelos para las distintas velocidades. Temperatura del aire = 60°C .

Figura 22. Comparación de los modelos para las distintas velocidades. Temperatura del aire = 70°C .

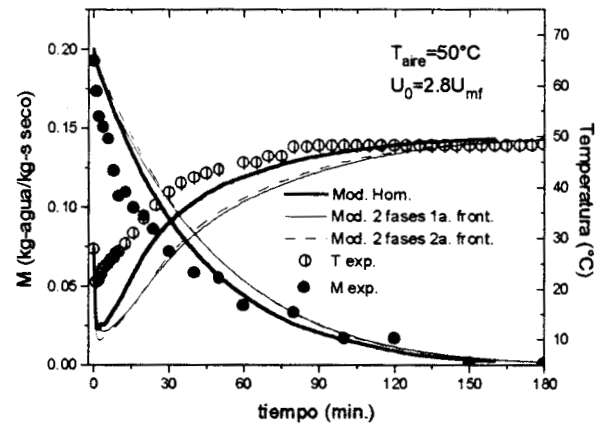
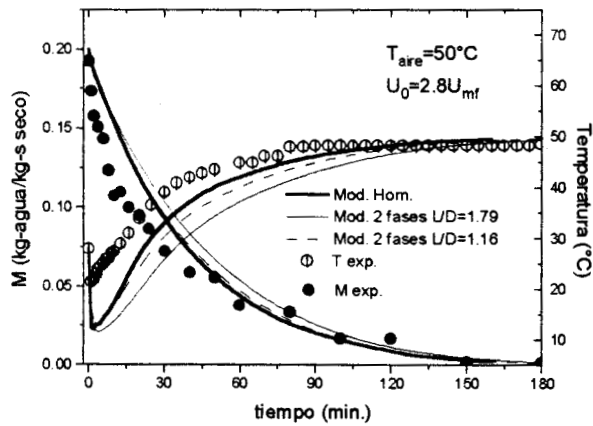
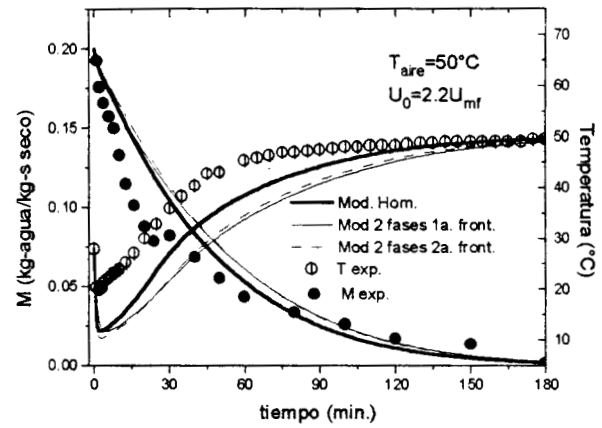
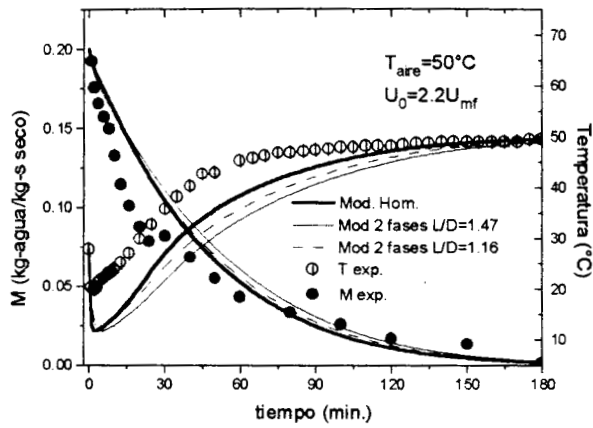
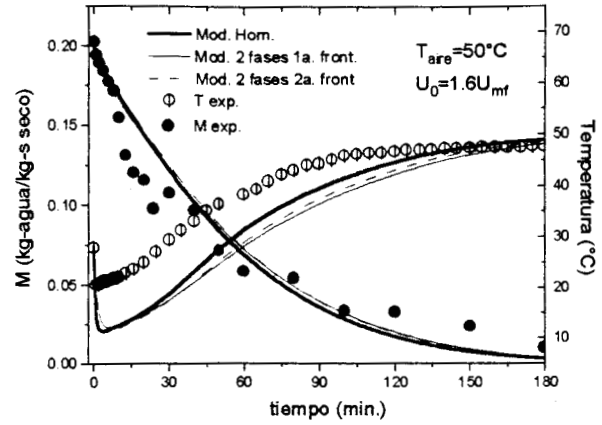
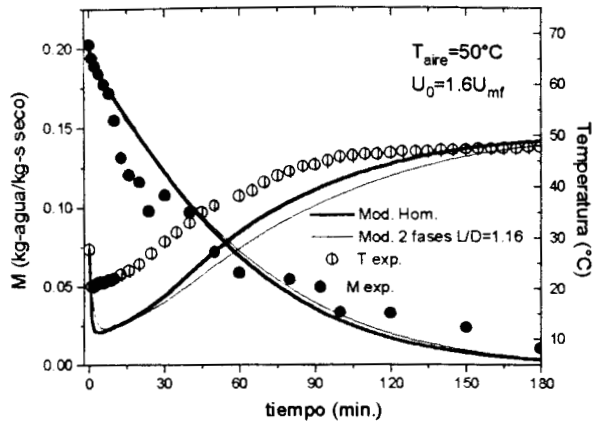


Fig. 23. Efecto de la relación L/D en el modelo de dos fases para las diferentes velocidades de alimentación del aire a una temperatura de 50°C .

Fig. 24. Simulaciones realizadas con las 2 alternativas de condición a la frontera para el modelo de dos fases.

El principal propósito de esta comparación es comprobar lo mencionado por Zahed (1996) quien establece perfiles muy parecidos con ambas fronteras. Aunque la frontera (46) posee un pequeño periodo convectivo en el perfil de la temperatura, no afecta las predicciones, más aún la figura 24 muestra una pequeña mejora con el progreso de la temperatura al grado que rebasa la predicción obtenida con la frontera (45) y que fue utilizada en todas las simulaciones. El aspecto más importante se observa en el perfil de humedad al presentar en su inicio un comportamiento lineal, muy similar a un periodo de velocidad constante de secado y que los datos experimentales no presentan. Esto valida el uso de la frontera (45).

IV.6.- Análisis de sensibilidad de parámetros.

Seleccionado el modelo homogéneo por sus resultados con respecto a los datos experimentales. Se realizó un análisis de sensibilidad de parámetros en donde el coeficiente de actividad, la capacidad calorífica y la difusividad sufrieron modificaciones con el objeto de observar efectos en el modelo.

Actividad de agua.

Como fue mencionado en el apartado IV.3 se obtuvieron correlaciones para la actividad, ecuación de Henderson y GAB respectivamente. Aunque GAB solo ajusta los datos con baja humedad, se realizaron simulaciones. Los resultados se muestran en la figura 25.

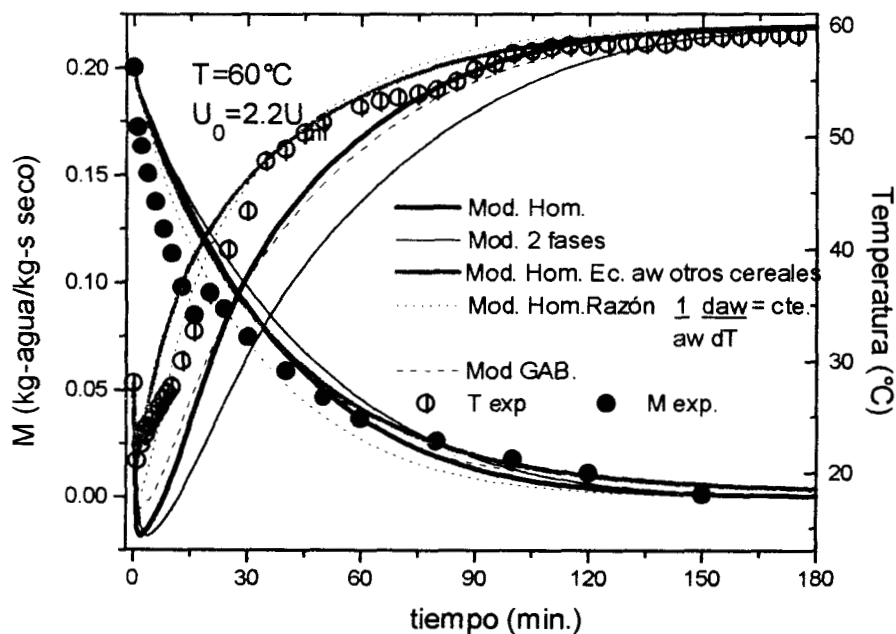


Figura 25. Efecto en el modelo homogéneo por la actividad de agua.

En la figura 25 se puede observar mayor desviación en el perfil de temperatura entre los modelos y esto puede explicarse al analizar la ecuación (21) para el cálculo del calor de vaporización – desorción el cual requiere las derivadas de la actividad; mientras que el modelo de Henderson utiliza una expresión exponencial, la derivada de la ecuación GAB es lineal al ser la primitiva una ecuación cuadrática. Por tanto es más sensible la ecuación exponencial. En la misma figura se muestran corridas realizadas con los modelos reportados en la literatura y cuando se utiliza un valor constante en la expresión (21) de la relación derivada de la actividad entre la actividad misma; reflejando una mejora en el perfil. Otro aspecto a analizar es el pozo térmico muy pronunciado y presente en todas las simulaciones realizadas, a partir de la ecuación (33) a estado estacionario se obtiene la siguiente expresión:

$$(C_A + Y_1 C_V)(T_1 - T) = (Y - Y_1)\Delta H \quad (70)$$

El valor de ΔH proveniente de la correlación obtenida es muy grande, y para cumplir la igualdad la diferencia de temperaturas debe ser grande, necesariamente la temperatura del lecho T debe ser baja, esto se refleja en el pozo mostrado.

Humedad del aire.

Otra observación de importancia para el pozo térmico puede explicarse a partir de la humedad del aire (figura 26).

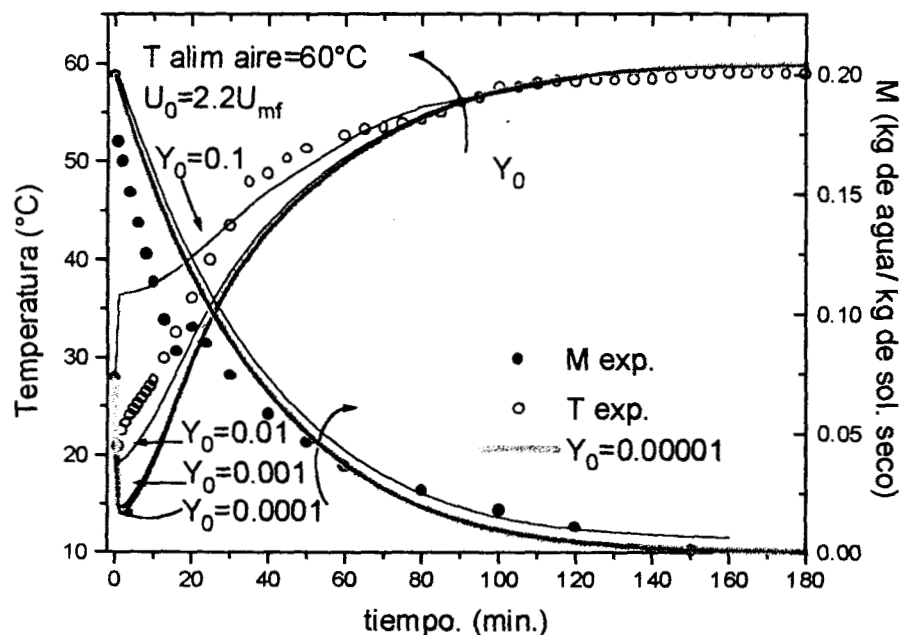


Figura 26. Efecto en el modelo homogéneo por la humedad del aire.

En el inicio del proceso se tiene el sólido con una cantidad considerable de humedad, al entrar el aire a una temperatura T_1 , no se encuentra saturado (Y_1 bajo) de tal forma que existe un contacto entre el aire y el vapor producido por la humedad del grano, que además se incorpora a la corriente produciendo un enfriamiento y registra la temperatura de bulbo húmedo que es menor que la temperatura de alimentación del aire. De acuerdo a lo anterior si la humedad del aire es baja la temperatura de bulbo húmedo también disminuye. La figura 26 muestra el efecto del pozo térmico y como se suaviza este, si aumenta la humedad del aire alimentado.

Capacidad calorífica.

Para observar como influye la capacidad calorífica en el modelo homogéneo, se afecto la correlación obtenida para este parámetro en un 50%, es decir 1.5 veces el C_B original, y se compararon los valores para el intervalo de temperaturas de alimentación del aire. Los resultados se observan en la figura 27. Se aprecia que no existe una diferencia, de hecho las curvas están sobrepuestas. Observando la ecuación (33) puede apreciarse que el valor de la capacidad calorífica del sólido se encuentra multiplicando a la derivada de la temperatura, y al parecer divide a un valor muy grande como la suma del calor de vaporización desorción y el calor sensible, de modo que no se ve muy afectado.

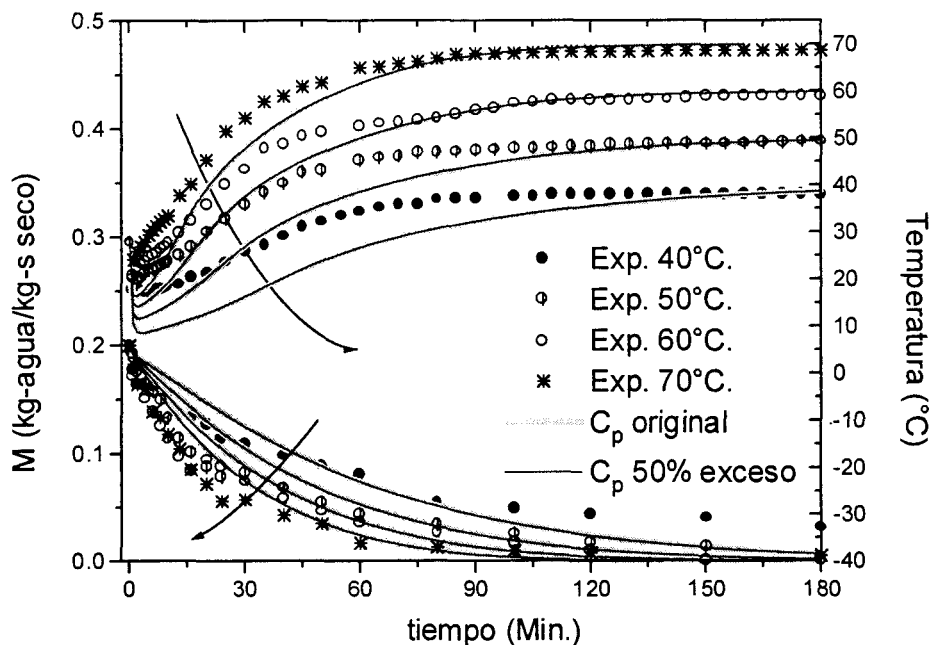


Figura 27. Sensibilidad de las cinéticas de secado con el parámetro capacidad calorífica; los perfiles de humedad y temperatura no varían.

Difusividad de humedad.

La difusividad también fue objeto de análisis, realizando simulaciones con una ecuación de Arrhenius que arroja valores 50% mayores al valor de ajuste; este valor afectó en mayor grado las curvas de secado, si se comparan con los valores de capacidad calorífica. Es decir esta variable es más sensible. La figura 28 muestra la diferencia en las curvas donde el efecto en el perfil de humedad es mayor que para la temperatura. El resultado muestra que al aumentar el valor de la difusividad disminuye la resistencia a la transferencia de masa de la humedad en la esfera de amaranto, mostrando un efecto directo en el balance de masa (ecuación 32) y en la segunda ley de Fick (ecuación 10).

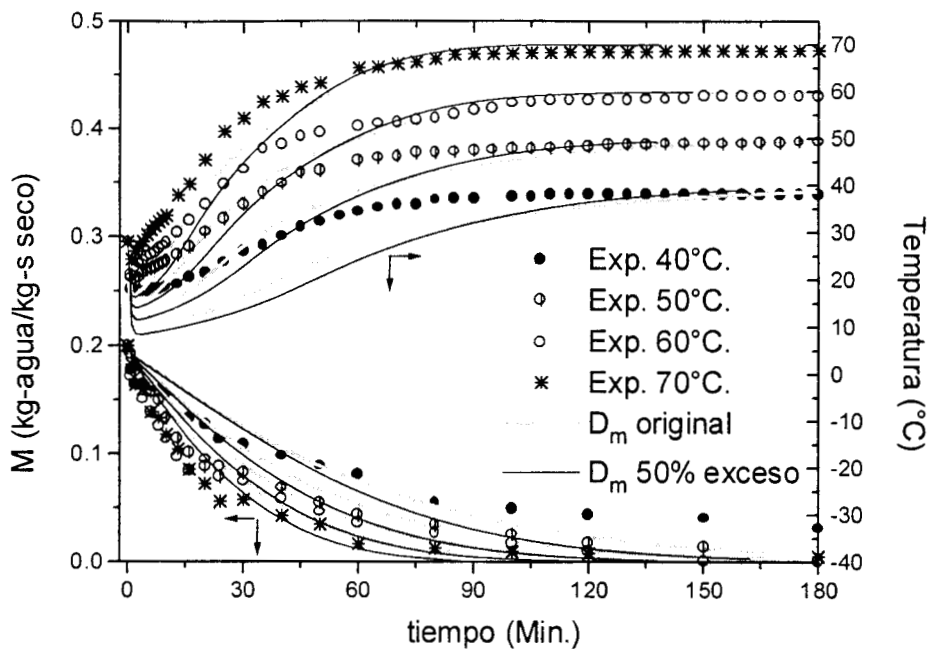


Figura 28. Sensibilidad de la difusividad para el modelo homogéneo; el perfil de humedad varía en mayor grado.

Masa de sólido en el lecho y Temperatura inicial.

Finalmente se observan los efectos de la masa de sólido seco y la temperatura inicial del lecho. Un aumento en la masa del sólido implica un calentamiento lento y esto se observa en la figura 29. Si se analiza la ecuación (33) correspondiente al balance de energía la masa, multiplica a la suma de las capacidades caloríficas y divide a la suma del calor latente y de vaporización desorción por tanto afecta a la cantidad de calor total afectando de manera inversa el perfil de temperatura.

Con respecto a la temperatura inicial del lecho el valor de experimentación empleado fue de 28°C , y se realizaron simulaciones para temperaturas iniciales de 20 y 25°C , respectivamente. Los resultados inmediatamente tienden a las cinéticas de secado obtenidas con la temperatura de 28°C , similar al comportamiento mostrado en la figura 27 correspondiente a la capacidad calorífica.

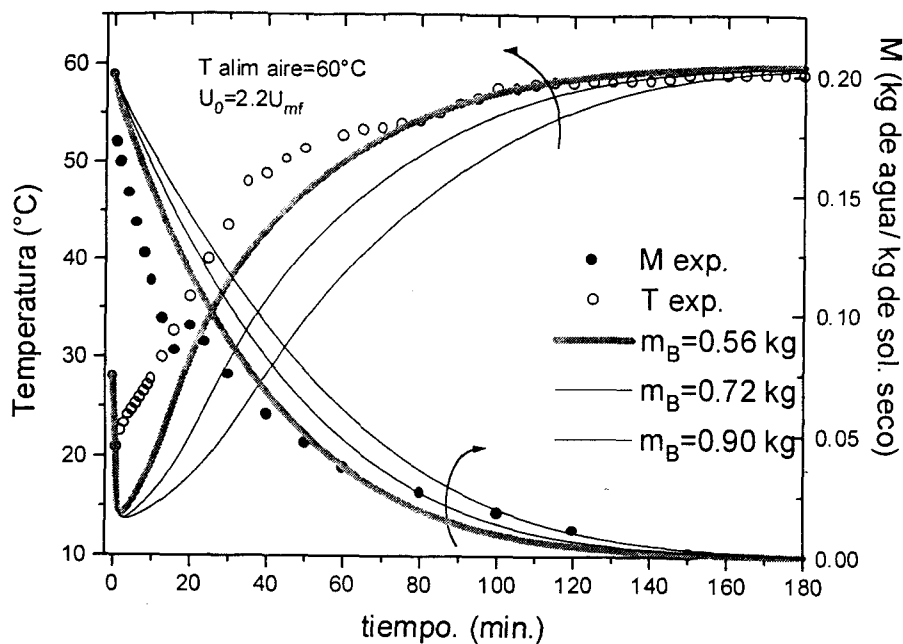


Figura 29. Efecto de la cantidad de sólido a secar en el modelo homogéneo.

V. CONCLUSIONES.

1. Se obtuvieron de forma experimental la capacidad calorífica, difusividad, coeficiente de actividad, densidad aparente y empacada, velocidad mínima de fluidización y fracción de espacios vacíos para la semilla de amaranto; el grano puede ubicarse como sólido tipo **B** de acuerdo a la clasificación de Geldart; el comportamiento de las curvas de desorción del cereal, es similar al obtenido en los granos de café, presentando un ajuste adecuado con la ecuación de Henderson para la determinación del coeficiente de actividad de agua, la capacidad calorífica puede describirse con un valor constante de 1311 J/kg-K ó con la ecuación de ajuste lineal obtenida con el calorímetro.
2. Las curvas de secado mostraron un comportamiento de velocidad decreciente, lo anterior indica que el amaranto tiene un comportamiento similar a los cereales más estudiados como el maíz, arroz y trigo.
3. Basándose en un estudio calorimétrico, el grano no sufrió degradaciones térmicas en el rango de estudio.
4. Al realizar las simulaciones en el rango de estudio, el modelo que predice con mayor acercamiento los resultados experimentales es el modelo homogéneo. Sin embargo se recomienda realizar un análisis más profundo sobre el coeficiente de actividad por resultar el parámetro de mayor sensibilidad en el intervalo estudiado.
5. El modelo de dos fases presenta mayor desviación en la predicción del comportamiento de la temperatura en el lecho estudiado; la velocidad en la fase densa, los modelos para la correlación del diámetro y velocidad de la burbuja así como la expansión en el lecho afectan en gran medida los perfiles a predecir.
6. Las desviaciones presentadas por el modelo tradicional de dos fases; confirman las observaciones de Yacono y col. (1979). Y al utilizar la modificación de Peters (1982), y la correlación generalizada de Werther (1978, 1981) para la velocidad promedio en todo el rango de tamaño de partículas; el gas de la fase densa ya no viaja más a la velocidad mínima de fluidización; esto mejora la predicción de la temperatura en el lecho. Aunque rompe con la consideración del trabajo de Zahed (1996).
7. El balance de masa es menos sensible que el balance de energía para ambos modelos estudiados.
8. En el modelo homogéneo los parámetros más sensibles son: la humedad del aire alimentado y la masa del sólido en el secador; los parámetros poco sensibles son la difusividad y el calor de vaporización desorción; y los parámetros insensibles son la

temperatura inicial en el lecho y la capacidad calorífica del sólido. De acuerdo a los intervalos mencionados en el estudio.

9. Aunque la frontera que presenta equilibrio instantáneo entre la superficie del sólido y la humedad del aire aplica adecuadamente en el modelo de 2 fases, para predecir el comportamiento del lecho de amaranto. La frontera alternativa presenta una predicción similar en el perfil de la temperatura y un comportamiento de secado constante en el perfil de humedad. Razón suficiente para el uso de la primera condición.

VI. NOMENCLATURA.

Base seca kg. de agua / kg. de sólido seco.

A	Area expuesta al secado (placa), perpendicular al flujo de aire. (m^2)
A'	Constantes empíricas para capacidad calorífica. ($J/kg K^2$)
B'	Constantes empíricas para capacidad calorífica. ($J/kg K$)
a_w	Actividad de agua. (-)
C_i	Capacidad calorífica de la especie i. ($J/kg K$), $i = A, B, V$ y W
C	Constante de Guggenheim en la ecuación (23) GAB. (-)
C11	Parámetro de ajuste en función de la temperatura. (-)
C22	Parámetro de ajuste en función de la temperatura. (K)
C_{Umf}	Corrección a la velocidad mínima de fluidización para la fase densa. (m/s)
d_c	Diámetro de la esfera. (m)
d_{eff}	Diámetro efectivo. (m)
d_l	Diámetro del lecho. (m)
d_p^*	Diámetro adimensional definido por la ecuación (30) (-)
d_p	Diámetro de la partícula. (m)
d_b	Diámetro de la burbuja gaseosa generada en un lecho fluidizado. (m)
d_{b0}	Diámetro de la burbuja a la salida de los orificios de la placa distribuidora. (m)
d_{bm}	Diámetro máximo de la burbuja en el lecho. (m)
D_m	Coefficiente de difusividad de humedad. (m^2/s)
D_0	Constante de ajuste para la ecuación de Arrhenius. (m^2/s)
ΔH	Calor isostérico de vaporización desorción por unidad másica de agua. (J/kg)
E_0/R	Energía de activación para la difusividad de humedad. (K)
f_{wi}	Fugacidad del agua en una mezcla. (-)
f_w^0	Fugacidad del agua como componente puro. (-)
g	Aceleración de la gravedad $9.8 (m/s^2)$.
G_d	Flujo volumétrico de la fase densa por el volumen del lecho. ($m^3/m^3 s$)
G_b	Flujo volumétrico de la fase burbuja por el volumen del lecho. ($m^3/m^3 s$)
h	Coefficiente de transferencia de calor. ($J/s-m^2-K$), (W/m^2-K)
H_e	Calor de condensación del agua pura. ($J/kg-mol$)
H_l	Calor de sorción en las multicapas. ($J/kg-mol$)
H_m	Calor de sorción en la monocapa. ($J/kg-mol$)
kT/ϵ_{AB}	Relación adimensional del potencial de Lennard Jones. (-)
k_y	Coefficiente de transferencia de masa en fracción mol. ($kg/s-m^2$)
k	Factor de corrección para las propiedades de las multicapas de moléculas con respecto al seno del líquido; ecuación (23) GAB. (-)
K	Coefficiente de transferencia de masa de la superficie del sólido al seno de la fase densa. (m/s)
K11	Parámetro de ajuste en función de la temperatura. (-)
K22	Parámetro de ajuste en función de la temperatura. (K)
k_c	Coefficiente de transferencia de masa que atraviesa la burbuja. (m^2/s)
k_w	Conductividad de humedad. (m^2/s)

l	Distancia perpendicular a la dirección transversal. (m)
L	Longitud a la que se expande el lecho. (m)
L_{mf}	Longitud o altura alcanzada a las condiciones de fluidización mínima. (m)
m_A	Flujo másico de aire seco. (kg/s)
m_B	Masa del sólido seco retenido en el lecho. (kg)
m_m	Contenido de agua correspondiente a la saturación de todos los sitios primarios de absorción con una molécula de agua (anteriormente llamada humedad en la mono capa), en la ecuación (23) GAB. (base seca)
m	Velocidad de evaporación del agua por unidad de volumen del lecho. (kg/ m ³ s)
M	Humedad del grano para el tiempo t
M_i	Peso molecular del componente i ; $i= A$ (aire), W/V (agua). (kg./kg.-mol)
M_p	Contenido de humedad promedio en la semilla. (base seca)
M_0	Humedad del grano en las condiciones iniciales. (base seca)
M_{eq}	Contenido de humedad en las condiciones de equilibrio. (base seca)
N_o	Número de orificios en la placa distribuidora. (-)
n_v	Flux másico de vapor de agua de la superficie del sólido hacia la corriente de aire. (kg/m ² -s)
N_{11}	Parámetro de ajuste en función de la temperatura. (-)
N_{22}	Parámetro de ajuste en función de la temperatura. (K)
P_T	Presión total de operación. (Pa)
p_w	Presión de vapor del agua en el sistema. (Pa)
p_w^0	Presión de vapor del agua como componente puro. (Pa)
q	Flux de calor necesario para la evaporación del agua a la corriente gaseosa. (J/m ² -s)
Q	Calor necesario para elevar la temperatura por unidad de masa. (J/kg)
R_p	Radio de la partícula. (m)
R	Constante universal de los gases (J/kg-mol K) / (m ³ Pa/kg -mol K)
R_V	Constante universal de los gases entre el peso molecular del vapor de agua. (J/kg K)
R_C	Velocidad de secado (kg. de agua/s)
t	Tiempo. (seg.)
T	Temperatura en el lecho / temperatura del grano. (K)
T_i	Temperatura de la corriente gaseosa en las condiciones i . (° C) / (K)
T_W	Temperatura de bulbo húmedo. (°C) / (K)
U^*	Velocidad adimensional definida por la ecuación (28). (-)
U_b	Velocidad promedio de las burbujas a través del lecho. (m/s)
U_{br}	Velocidad promedio de una burbuja. (m/s)
U_{mf}	Velocidad mínima de fluidización. (m/s)
U_0	Velocidad superficial del aire. (m/s)
V_{mf}	Volumen del lecho en condiciones mínimas de fluidización. (m ³)
V_s	Volumen del grano. (m ³)
w	Factor de corrección para la velocidad de la fase burbuja. (-)
x_S	Fracción volumen de sólidos en un lecho fijo. (-)
y_i	Fracción mol del componente i . (-) $i = 1$.
y	Fracción mol del vapor de agua en la superficie a secar
Y_i	Humedad absoluta en la corriente i ; $i = 1, b$ y d . (kg de agua / kg de aire seco).

Y Humedad absoluta de la corriente gaseosa en el tiempo t (kg de agua / kg de aire seco).

símbolos griegos

α Factor de corrección para las burbujas en el lecho. (-)
 ε Fracción de espacios vacíos del lecho empacado. (-)
 ε_b Fracción de volumen del lecho ocupada por la fase burbuja. (-)
 ε_{mf} Fracción de espacios vacíos mínimo de fluidización. (-)
 ϕ_s Esfericidad. (-)
 φ Factor de resistencia a la difusión. (-)
 λ_w Calor latente de vaporización a T_w . (J/kg)
 μ_A Viscosidad de la corriente ó la especie i . (kg/m s)
 ν Viscosidad cinemática del aire. (m^2/s)
 ρ_i Densidad de la especie i . (kg/m^3)
 ψ Fracción de burbujas visibles. (-)
 Ω Integral de colisión. (-)

Subíndices

0 condiciones iniciales.
 1 condiciones de alimentación del aire.
 b fase burbuja.
 B sólido grano ó semilla seca.
 d fase densa.
 eq condiciones de equilibrio.
 A aire.
 mf mínima de fluidización.
 V vapor de agua.
 W agua líquida para la capacidad calorífica, para los demás casos significa bulbo húmedo.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

1. Aguerre R. J., Suarez C., Viollaz P., 1982, Drying of Rice, *J. Food Technol.*, **4**(1), 1-7.
2. Barker J. J., 1965, Heat Transfer Coefficient in Fluidized Bed, *Ind. Eng. Chem.*, **57**, 33-40.
3. Becker H. A. y Sallans H. R., 1955, A Study of Internal Moisture Movement in the Drying of the Wheat Kernel, *Cereal Chem.* **32**, 212-226.
4. Behari M y Andhiwal C. K., 1976, Chemical Examination of *Amaranthus spinosus*, *Current Science*, **45**, 481-482.
5. Brooker D. B., y Bakker, A.F., 1974, Drying Cereal Grains, The Avi Publishing Company, USA, 185-221.
6. Chiang W. C., Petersen J. N., 1987, Experimental Measurement of temperature and moisture profiles during Apple Drying, *Drying Technol.* **5**(1), 25-49.
7. Chu S. T. Y Hustrulid A., 1968a Numerical Solution of Diffusion Equation, *Trans. ASAE*, 705-708.
8. Chu S. T. Y Hustrulid A., 1968b General Characteristics of variable Diffusivity Process and the Dynamic Equilibrium Moisture Content, *Trans. ASAE*, 709 - 710, 715.
9. Chung D. S. y Pfost H. B., 1967, Adsorption and desorption of Water Vapor by Cereal Grains and their products, *Trans. ASAE*, **10**, 552-575.
10. Cole N. J., 1979, Amaranth from the past for the future, Rodale Press, USA.
11. Consejo de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo Internacional (BOSTID), 1987, El Amaranto Perspectivas modernas para un Mundo Olvidado, Editorial Villicana.
12. Crank J., 1975, The Mathematics of Diffusion, 2nd ed., Oxford Univ. Press, Oxford.
13. Crank J., Park G. S., 1968, Diffusion in Polymers, Academic Press, New York
14. Dutta S.K., Nema V.K. y Bhardwaj R.K., 1988, Drying Behaviour of Spherical Grains, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **31**(4), 855-861.
15. Eccles C. D., Callaghan P. T., Jenner C. F., 1988, Measurement of the Self-Diffusion Coefficient of Water as a function of position in Wheat grain using Nuclear Magnetic Resonance Imaging, *Biophys. J.*, (**53**), 77.

16. Ergun S., Fluid flow through packed columns, 1952, *Chem. Eng. Prog.*, **48**(2), 89-94.
17. Geldart D., 1973, Types of Gas Fluidization, *Powder Technol.*, **19**(7), 285-294.
18. Geankoplis C. J., 1982, Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias, CECSA, México.
19. Görling P., 1954, 1956, Investigation to elucidate the drying Behavior of vegetable material, especially potato pieces, *VDI-Forschungsheft*, 458, Düsseldorf.
20. Gros J. B., Ruegg M., 1987, Determination of Apparent Diffusion Coefficient of Sodium Chloride in model Foods and Cheese, Physical properties of Foods-2, Jowitt et al (eds), Elsevier, Londres, 71-108.
21. Haghghi K., Irudayaraj J., Stroshine R. L., Sokhansanj S., 1990, Grain Kernel Drying Simulation Using the Finite Element Method, *Trans. ASAE*, **33**(7), 1957-1965.
22. Haider A. y Levenspiel O., 1989, Drag Coefficient and Terminal Velocity of spherical And Nonspherical Particles, *Powder Technol.* **58**, 63-70.
23. Hart F. L. y Fisher H. J., 1971, Modern Food Analysis, Springer -Verlag, New York, 2-10.
24. Hines A. L. y Maddox R. N., 1984, Mass Transfer Fundamentals and Applications, Prentice Hall Inc., Chapter 2.
25. Hoebink J. H. B. J. y Rietema K., 1980, Drying Granular Solids in a Fluidized Bed I and II, *Chem. Eng. Sci.*, **35**, 2135-2140 y 2257-2265.
26. Homma S. y Fujimaki M., 1982, Effect of Water Activity on Lipid Oxidation and Browning of Kori-tofu, *Agric. Biol. Chem.*, **46**, 301-305.
27. Huang A. S. y Von Elbe J. H., 1986, Stability Comparison of Two Betacyanine Pigments – Amaranthine and Betanine, *Journal of food Science*, **51**, 670 – 674.
28. Iturbide G. A., Lorence G. F., 1987, Cultivo del Amaranto en México, Editorial de la Universidad Autónoma de Chapingo. Edo. de Mex.
29. Jowitt R., Escher F., Hallström B., Meffert H., Spiess W. y Vos G., 1983, Physical properties of foods, Applied science publishers, NewYork, 13-91.

30. Kameoka T., Hosokawa A. y Morishima H., 1986, Simulation of Heat and Mass Transfer During Through-drying Process of Rough Rice, in *Drying of solids: Recent International Development*, Mujumdar A. S., (ed), Halsted Press, 271-278
31. Karatas S., 1997, Determination of moisture diffusivity of lentil seed during drying, *Drying Technol.* **15**(1), 183-199.
32. Kiefer P. J., 1941, The Thermodynamic Properties of Water and Water Vapor, *Monthly Weather Report*, **69**(11), 329-341.
33. Krischer O., 1956, *Drying Technology*, Vol , The Scientific Fundamentals of Drying Technology, Springer-Verlag, Berlín.
34. Kunni D, y Levenspiel O., 1991, *Fluidization Engineering*, Butterworth - Heinemann Series in Chem. Eng. USA, 61-94.
35. Luikov A. V., 1973, Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies (Review), *Int. J. Heat Mass Transfer*, **18**(1), 1-14.
36. Luyben K. C. A. M., Olieman J. J., Bruin S., 1980, Concentration Dependent Diffusion Coefficients Derived from Experimental Drying Curves, "Drying 80" vol. 2, Mujumdar A. S. (ed), 233-243.
37. Lyon C. K. y Becker R., 1987, Extraction and Refining of Oil from Amaranth Seed, *Journal of American Oil Chemists Society*, **64**, 233-236.
38. MacCarthy D., 1986, *Concentration and Drying of Foods*, Elsevier Co., USA, 165- 202.
39. Mapes C., Bressani R., et al. 1984, *Memorias del Primer Seminario Nacional del Amaranto* Ed. Quetzalcoatl, México, 88-104.
40. Martinez V. C., Vizcarra M.M., Galán D. O. y Ruiz M. R., 1995, Experimental Validation of a Mathematical Model for the Batch Drying of Corn Grains, *Drying Technol* **13**(1-2), 335-350.
41. Marshall W.R., JR. y Friedman S. J., 1950, Drying. in *Chemical Engineers Handbook*, 3rd edition, J. H. Perry (editor), Mc Graw Hill Co., New York.
42. McMinn W. A. M. y Magee T. R. A., Moisture Sorption Characteristics of Starch Materials, 1997, *Drying Technol.* **15**(5), 1527-1551.
43. Mohsenin N.N., 1980, *Thermal Properties of Foods and Agricultural Materials*, Gordon & Breach science publisher, London, 37-61.

44. Ngoddy P. O., 1969 a Generalized theory of Sorption Phenomena in Biological Materials, Ph D. Tesis de la Universidad Estatal de Michigan.
45. Peters M. H., Fan L. S. y Sweeney T. L., 1982, Reactant Dynamics in Catalytic Fluidized Bed Reactors with Reversal of Gas in Emulsion Phase, *Chem. Eng. Sci.*, **37**, 553-565.
46. Rizvi S.H.H. y Benado A.L., 1984, Thermodynamic Properties of Dehydrated Foods, *Food Technol.* **38**(3), 83-92.
47. Rizvi S.H.H., 1986, Engineering Properties of Food, Marcel Dekker Inc., New York, 133-214.
48. Rockland L. B. y Beuchat L. R. (Ed), 1987, Water Activity: Theory and Application to Food, Marcel Dekker Inc., New York, 404
49. Roussis P P., 1981, Diffusion of Mater Vapor in Cellulose Acetate: 2 Permeation and Integral Sorption Kinetics, *Polymer*, (**22**), 1058-1063.
50. Schmidt D. R., Macdonald H. A., y Kelly W. C., 1974, Solubility of iron, Calcium, Magnesium in Amaranth and Collard Leaves, *Qualitas Plantarum-plant Foods for Human Nutrition*, **23**, 373-378.
51. Sit S. P. Y Grace J. R., 1981, Effect of Bubble Interaction on Interphase Mass Transfer in Gas Fluidized Beds, *Chem. Eng. Sci.*, **36**, 327-334.
52. Soriano S.J., Brito de la F.E. y Tover L.R., 1987, Valor nutritivo de semillas de amaranto procesadas mediante un sistema de lecho fluidizado, Memorias del Coloquio Nacional del Amaranto, Querétaro México.
53. Steffe J. F., Singh R. P., 1982, Diffusion Coefficients for Predicting Rice Drying Behavior, *J. Agric. Eng. Res.*, **27**, 489-493.
54. Strumillo C. y Adamiec J., 1996, Energy and quality aspects of food drying, *Drying Technol* **14**(2), 423-448.
55. Taniguchi T., Antiviral Substances, 1977, *Shokuritsu Soeki*, **31**, 219-224.
56. Teutonico R. A. y Knorr D. 1985, Amaranth: Composition, properties and Applications of a Rediscovered Crop, *Food Technology*, **39**, 49-61.
57. Tolaba M.P., Suárez C., y Viollaz P., 1997, Heats and entropies of sorption of cereal grains: A comparison between integral and differential quantities, *Drying Technol.* **15**(1), 137-150.

58. Tolaba M.P., Suárez C., y Viollaz P., 1995, Spreading pressure – water activity and moisture Relationship in starchy materials, *Drying Technol.* **13**(8&9), 2097 – 2111.
 59. Toomey R. D. y Johnstone H. F., 1952, Gaseous Fluidization of Solid Particles, *Chem. Eng Prog.* **48**, 220-226
 60. Vanecek V., Markvart M., y Drbohlav R., 1965, *Fluidized Bed Drying*, Leonard Hill, Londres.
 61. Vanecek V., Markvart M., Drbohlav R., y Hummel R. L., 1968, Experimental Evidence on Operation of continuous Fluidized-Bed Driers, *Chem. Eng. Prog. Sympos. Series*, 243-252.
 62. Vasi I. G. Y Kalintha V. P., 1980, Amino Acid Composition of Some Leafy Vegetables, *Journal of the Institution of Chemists (India)*, **52**, 13-14.
 63. Viswanathan K., 1986, Model for Continuous drying of Solids in Fluidized/Spouted Beds, *Can. J. Of Chem. Eng.*, **64**(2), 87-95.
 64. Yacono C., Rowe P. N., y Angelino H, 1979, An Analysis of the distribution Between Phases in a Gas Fluidized Bed, *Chem. Eng. Sci.*, **34**, 789-900.
 65. Wallace B. V., Copley M. J., Morgan A. I., 1973, *Food Dehydration*, The Avi Publishing Co., Connecticut, 22-57.
 66. Zahed A.H. y Epstein N., 1992, Batch and continuous spouted bed drying of cereal grains: The thermal equilibrium model, *Can. J. Chem. Eng.*, **70**, 945-953.
 67. Zahed A.H., Zhu J.X., y Grace J.R., 1996, Modeling and simulation of batch and continuous fluidized bed dryers, *Drying Technol.* **13**(1&2), 1-28.
 68. Zogzas N.P., Maroulis Z.B., y Marinos-Kouris, 1994, Moisture diffusivity methods of experimental determination a review, *Drying Technol.* **12** (3), 483-515.
 69. Zogzas N.P. y Maroulis Z.B., 1996, Effective moisture diffusivity estimation from drying data. A comparison between various methods of analysis, *Drying Technol.* **14** (7&8), 1543-1573
 70. Zogzas N.P., Maroulis Z.B., y Marinos-Kouris, 1996, Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs, *Drying Technol.* **14**(10), 2225-2253.
 71. Zuritz C. A. y Singh R. P., 1982, Simulation of Rough Rice Drying in a Spouted Bed, "Drying 82", Mujumdar A. S., (ed), Mc Graw Hill, New York, 239-247.
-

Apéndice I.

Métodos de determinación para la difusividad.

Todos los métodos están basados en las leyes de difusión de Fick, sin embargo existen diferencias en la forma de aplicar las leyes mencionadas a los datos experimentales y el tipo de experimentos implementados. La tabla I¹¹ pretende ser una guía para el tipo de método a considerar.

Tabla I. Métodos para la determinación de la difusividad.

Método	Fundamento	Observaciones	Aplicación
Métodos de permeabilidad	Una placa delgada con material se coloca entre dos fuentes de concentración constante; después de un periodo de tiempo se alcanza el equilibrio de concentración entre la superficie de la placa y las fuentes; obteniendo un flux másico constante	La técnica consiste en pesar sucesivamente las fuentes a diferentes intervalos de tiempo.	Materiales como lana intercambio iónico en resinas y polímeros. (Crank y Park 1968)
Métodos de absorción	Esta basado en la cantidad de material que se difunde en una muestra, cuando se coloca en una fuente de concentración constante. El peso de la muestra es registrado por intervalos de tiempo hasta la obtención del equilibrio.	Presenta problemas si una capa límite se forma, lo que significa una resistencia externa. Debe examinarse el método para cantidades pequeñas	Agua en celulosa, Roussis (1981)
Curvas de concentración –distancia.	Determina la concentración local en una muestra como función de la posición, para el material que se difunde	Generalmente se utilizan cilindros largos con el material a difundir, a determinados tiempos se cortan en trozos, para pesarse tan pronto como sea posible.	Humedad en trigo (Eccles et al, 1988), NaCl en queso (Gros, 1987), humedad en manzanas (Chiang y Petersen, 1987).
Métodos de secado	Basados en túneles de secado fáciles de construir y controlar, a velocidades altas los efectos convectivos son pequeños, tal que el proceso es por difusión. Los datos son tratados por los métodos: simplificado (S), de régimen regular (RR) y numéricos (N)	El manejo de los datos experimentales debe tomar en cuenta la posible dependencia de la concentración (RR) y la geometría del material (N).	Cereales (Aguerre et al, 1982, Karatas 1997, Steffe y Singh, 1982); (RR) Glucosa leche y extracto de café (Luyben et al, 1980); (N) cereales (Haghighi et al, 1990)

¹¹En base a la revisión de Zogzas et al (1994).

Apéndice II.

Valores utilizados en las simulaciones.

Tabla II. Parámetros fijos utilizados en las simulaciones.

Parámetro y unidades	Ambos modelos.	Modelo Homogéneo.	Modelo de dos Fases.
M_0 (kg agua/kg s. s)	0.20		
T_0 (K)	301.15		
C_w (J/kg K)	4184		
C_v (J/kg K)	1885		
C_a (J/kg K)	1013		
P_T (Pa)	78000		
Y_1 (kg agua/kg a. s.)	0.00001		
R_v (J/kg K)	462		
A_s (m ²)		3.142×10^{-6}	
V_s (m ³)		5.236×10^{-10}	
m_B (kg)		0.56	
D_l (m)			0.095
D_p (m)			0.001
ρ_p (kg/m ³)			1371.6
ϵ_{mf} (-)			0.388
L_{mf} (m)			0.1
U_{mf} (m/s)			0.2565

Tabla III. Constantes utilizadas en los ajustes de los parámetros del amaranto.

Constante y unidades	Valor	No. de Ecuación
C11 (-)	0.2694	23 y 25
C22 (K)	775.43	23 y 25
K11 (-)	0.0246	23 y 24
K22 (K)	1124.59	23 y 24
N11 (-)	0.000332	23 y 26
N22 (K)	1236.72	23 y 26
A' (J/kg-K ²)	6.72	41
B' (J/kg-K)	793.5	41
D ₀ (m ² /s)	8.25x10 ⁻⁸	8
E ₀ /R (K)	2830.5	8

Tabla IV. Condiciones variables para cada simulación

No. de Simulación.	Ambos Modelos.	Modelo Homogéneo	Modelo de dos fases	
	T ₁ (°C)	m _A (kg./s)	U ₀ (m/s)	L ¹² (m)
1	40	2.653 x 10 ⁻³	0.4101	0.11
2	40	3.648 x 10 ⁻³	0.5639	0.14
3	40	4.643 x 10 ⁻³	0.7178	0.17
4	50	2.653 x 10 ⁻³	0.4101	0.11
5	50	3.648 x 10 ⁻³	0.5639	0.14
6	50	4.643 x 10 ⁻³	0.7178	0.17
7	60	2.653 x 10 ⁻³	0.4101	0.11
8	60	3.648 x 10 ⁻³	0.5639	0.14
9	60	4.643 x 10 ⁻³	0.7178	0.17
10	70	2.653 x 10 ⁻³	0.4101	0.11
11	70	3.648 x 10 ⁻³	0.5639	0.14
12	70	4.643 x 10 ⁻³	0.7178	0.17

¹² Valores determinados experimentalmente, L es la altura a la que el lecho se elevó a la cantidad de aire alimentada.

Apéndice III.

Registros experimentales y márgenes de error.

Los registros mostrados en el presente apéndice son el promedio de tres corridas experimentales para cada parámetro y cinética de secado determinados.

Tabla V. Registros experimentales de la caída de presión en el lecho fluidizado a diversas velocidades de alimentación del aire.

U_0 (cm/s)	ΔP (Pa)			
	M = 0.20		M = 0.05	
	ascendente	descendente	ascendente	descendente
0.05132	290.3281	309.9272	290.3281	270.729
0.10264	470.5763	480.3759	470.5763	382.3804
0.15396	652.8142	662.6138	692.0124	574.4178
0.20528	944.0852	904.887	953.8847	767.6933
0.25659	1167.2457	1098.6488	1118.2479	922.2569
0.30791	1184.3503	1105.9539	1164.7511	1056.9561
0.35923	1220.037	1122.0415	1151.4401	1102.4423
0.41055	1214.7568	1146.1599	1146.1599	1087.3626
0.46187	1197.1567	1128.5598	1118.7603	1099.1612
0.51319	1156.6855	1117.4873	1156.6855	1156.6855
0.56451	1200.3866	1141.5892	1180.7875	1121.9902
0.61583	1160.9158	1131.5172	1151.1163	1111.9181
0.66715	1233.5127	1164.9158	1164.9159	1066.9204
0.74157	1201.8354	1241.0336	1280.2317	1241.0336
0.76978	1221.9249	1221.9249	1221.9249	1221.9249
$\pm \sigma$	62.38	45.74	54.21	54.79

Tabla VI. Registros experimentales de la humedad del amaranto en el interior del lecho fluidizado a diversas temperaturas.

Tiempo (min.)	Temperatura del aire 40°C.			Temperatura del aire 50°C.		
	$U_0=1.6 U_{mf}$	$U_0=2.2 U_{mf}$	$U_0=2.8 U_{mf}$	$U_0=1.6 U_{mf}$	$U_0=2.2 U_{mf}$	$U_0=2.8 U_{mf}$
0	0.195	0.195	0.195	0.20255	0.2	0.1924
1	0.18622	0.17732	0.17546	0.1945	0.19257	0.17295
2	0.17767	0.1641	0.15036	0.1894	0.17598	0.15716
4	0.16949	0.16245	0.14719	0.18376	0.16544	0.15033
6	0.17789	0.16178	0.13978	0.17737	0.15709	0.1431
8	0.17345	0.15889	0.14351	0.17116	0.14998	0.1234
10	0.16667	0.15521	0.14099	0.15502	0.13305	0.1074
13	0.16399	0.15034	0.13062	0.13125	0.11471	0.10998
16	0.15803	0.13208	0.12049	0.12063	0.10157	0.09923
20	0.15469	0.1272	0.11299	0.11589	0.08785	0.09478
24	0.13944	0.11433	0.1089	0.09811	0.0787	0.08604
30	0.1348	0.10918	0.10106	0.10796	0.08202	0.07202
40	0.12595	0.09865	0.08414	0.09712	0.0685	0.05833
50	0.11656	0.08919	0.07909	0.0721	0.05482	0.05482
60	0.09071	0.08009	0.07241	0.05847	0.04322	0.03734
80	0.07929	0.05537	0.0604	0.05392	0.03372	0.03372
100	0.06742	0.04895	0.04088	0.0334	0.02581	0.01701
120	0.05603	0.04389	0.0283	0.03258	0.01701	0.01701
150	0.04965	0.0408	0.01964	0.0236	0.0134	0.0019
180	0.04303	0.03129	0.01508	0.01035	0.00073	0.00073

Tabla VII. Registros experimentales de la humedad del amaranto en el interior del lecho fluidizado a diversas temperaturas.

Tiempo (min.)	Temperatura del aire 60°C.			Temperatura del aire 70°C.		
	$U_0=1.6 U_{mf}$	$U_0=2.2 U_{mf}$	$U_0=2.8 U_{mf}$	$U_0=1.6 U_{mf}$	$U_0=2.2 U_{mf}$	$U_0=2.8 U_{mf}$
0	0.2	0.2	0.1924	0.2	0.2	0.2
1	0.18970	0.17179	0.1705	0.18566	0.18259	0.16721
2	0.17923	0.16331	0.1566	0.17523	0.16402	0.15071
4	0.16552	0.15071	0.14933	0.16052	0.16013	0.14484
6	0.14048	0.13812	0.1408	0.14	0.13861	0.12522
8	0.13706	0.12507	0.1194	0.1306	0.13347	0.11342
10	0.13131	0.1135	0.1045	0.12131	0.11791	0.10233
13	0.12317	0.09749	0.09981	0.11317	0.10436	0.08757
16	0.10973	0.08434	0.08923	0.09726	0.0856	0.07482
20	0.10989	0.0945	0.0783	0.08803	0.07219	0.05944
24	0.07058	0.0877	0.06042	0.07058	0.05588	0.07223
30	0.09664	0.07439	0.06081	0.09664	0.05754	0.04165
40	0.07119	0.05825	0.04778	0.05856	0.0428	0.03087
50	0.06721	0.04615	0.0393	0.05158	0.0349	0.0248
60	0.05101	0.03645	0.03106	0.03738	0.01656	0.00958
80	0.04392	0.02611	0.02169	0.0328	0.01285	0.00733
100	0.0283	0.01763	0.01888	0.01757	0.00944	0.00524
120	0.02948	0.01081	0.00803	0.01233	0.00783	--
150	0.01223	0.00106	--	--	--	0.0032
180	0.01035	--	--	0.00885	0.00525	0.00313

Tabla VIII. Registros experimentales de la temperatura en el interior del lecho fluidizado

Tiempo (min.)	Temperatura del aire 40°C.			Temperatura del aire 50°C.		
	$U_0=1.6 U_{mf}$	$U_0=2.2 U_{mf}$	$U_0=2.8 U_{mf}$	$U_0=1.6 U_{mf}$	$U_0=2.2 U_{mf}$	$U_0=2.8 U_{mf}$
0	40.0	40.0	40.0	50.0	50.0	50.0
1	12	18	16.5	20.7	20.3	21.4
2	9.9	17.5	16.4	20.6	19.9	22
3	12.2	17.4	16.7	21	20.3	23
4	10.9	17.3	17	21.3	21.4	24
5	11.4	17.5	17.2	21.3	22	24.5
6	11.8	17.8	17.8	21.5	22.3	25
7	12	17.9	18	21.7	22.7	25.7
8	12.2	18	18.2	21.9	23.2	26.1
9	12.8	18.1	18.4	22	23.6	27
10	13	18.5	18.8	22.1	24	27.4
13	14.3	19	20.1	22.9	25.2	29
16	13.2	20.5	21.8	23.7	27	31
20	14.5	21.4	23.8	25	30.1	33.9
25	15.8	23.7	25.8	27.2	32.9	36.6
30	17	26	28.4	29.5	36	39
35	18.9	27.5	30.4	31.3	38.4	40.8
40	20	29.3	32.2	33.2	40.4	41.9
45	21.8	31.1	33.6	35.1	42.8	42.7
50	22.9	32.3	34.8	36.5	43.1	43.4
55	24.2	33.5	35.4	38.4	45.3	44.8
60	25.4	34.4	36.1	39.4	45.9	44.9
65	26.6	35.2	36.8	41	46.3	46
70	28.1	35.8	37.3	42.3	46.9	46
75	29	36	37.7	43	47	47.9
80	29.6	37	38	44	47.2	48
85	30.2	37.1	38	44.4	47.5	48.1
90	31	37.15	38.2	45	47.6	48.2
100	31.8	37.5	38.5	45.8	48	48.3
105	32.7	37.6	38.6	46	48	48.2
110	33	38	38.8	46.3	48.1	48.2
115	33.1	38	38.7	46.5	48.3	48.2
120	33.6	38	38.9	46.7	48.3	48.1
125	33.8	38	39.1	46.8	48.6	48.1
130	33.9	38	39.2	46.9	48.8	48.1
135	34	38	39.4	47	48.8	48.1
140	34.1	38	39.5	47.1	48.9	48.1
145	34.4	38	39.6	47.2	49	48.1
150	34.8	38	39.7	47.3	49	48.1
155	34.8	38	39.8	47.4	49	48.1
160	34.8	38	39.9	47.4	49	48.2
165	35	38	40	47.5	49.1	48.2
170	34.9	38	40	47.5	49.1	48.2
175	34.7	38	40	47.6	49.4	48.3
180	35	38	40	47.7	49.4	48.5

Tabla IX. Registros experimentales de la temperatura en el interior del lecho fluidizado.

Tiempo (min.)	Temperatura del aire 60°C.			Temperatura del aire 70°C.		
	$U_0=1.6 U_{mf}$	$U_0=2.2 U_{mf}$	$U_0=2.8 U_{mf}$	$U_0=1.6 U_{mf}$	$U_0=2.2 U_{mf}$	$U_0=2.8 U_{mf}$
0	60.0	60.0	60.0	70.0	70.0	70.0
1	22.5	21	24.5	23	24.2	27
2	23.3	22.5	25.3	22.7	25.9	30.5
3	24.4	23.3	26.7	23.3	27	33
4	25.3	24.1	28	24.3	28	34
5	25.6	24.6	28.8	26	29.5	34.8
6	26.2	25.2	29.5	26	30.5	37
7	26	25.8	31	26	31.3	38
8	26.1	26.5	32.6	26	32.2	39
9	27	27.1	34.4	26	32.8	42
10	27	27.7	35	27.2	33.5	42.5
13	28.7	30	35.6	28.7	37.8	47
16	30.3	32.6	37.7	30.5	40.2	50
20	32.6	36	45.2	34.6	45.4	54.4
25	35.5	40	49	39.5	51.5	58
30	39	43.4	51.3	44.5	54.3	60.6
35	42	47.9	52.9	49	57.8	62.8
40	44.5	48.8	54.1	53.1	59	63.9
45	46.6	50.3	55	57	61	64.9
50	48.3	51.3	55.7	59.6	61.8	65.5
60	50.5	52.7	56.7	63.8	65	66.5
65	51.5	53.2	56.9	65.2	65.2	66.9
70	52	53.5	57	66.2	65.9	67
75	52.6	53.8	57.3	67.3	66.3	67.3
80	53.5	54.2	57.6	67.6	67	67.5
85	54.2	55	57.6	68.1	67.9	67.7
90	55.5	56	57.8	68.5	68	67.8
95	56.2	56.5	57.9	68.9	68	68
100	57	57.5	58	69	68.1	68
105	57.2	57.6	58.1	69.1	68.2	68
110	57.4	58	58.1	69.2	68.3	68.1
115	57.6	58.1	58.1	69.4	68.4	68.1
120	58	58.2	58.3	69.5	68.4	68.2
125	58.3	58.3	58.3	69.6	68.4	68.2
130	58.4	58.3	58.4	69.8	68.4	68.2
135	58.5	58.4	58.5	69.9	68.5	68.2
140	58.6	58.4	58.5	70	68.6	68.5
145	58.6	58.6	58.5	70	68.6	68.5
150	58.7	58.95	58.8	70	68.7	68.5
155	58.7	58.95	58.8	70	68.7	68.5
160	58.8	58.95	58.9	70	68.7	68.5
165	58.8	59	58.9	70	68.7	68.5
170	58.8	59	59	70	68.7	68.5
175	58.8	59.05	59.1	70	68.8	68.5
180	58.8	59.05	59.2	70	68.8	68.8

Tabla X. Bandas de error expresadas como desviación estándar de los registros experimentales de humedad para el amaranto en el lecho.

Temperatura °C	Humedad.			Temperatura		
	$\pm \sigma$			$\pm \sigma$		
40.0	0.005	0.0060	0.0100	1.13	1.14	0.83
50.0	0.010	0.0090	0.0100	1.09	0.93	0.57
60.0	0.012	0.0101	0.0077	0.95	0.96	0.97
70.0	0.012	0.0061	0.0087	2.30	0.95	0.50
U_0	$U_0=1.6 U_{mf}$	$U_0=2.2 U_{mf}$	$U_0=2.8 U_{mf}$	$U_0=1.6 U_{mf}$	$U_0=2.2 U_{mf}$	$U_0=2.8 U_{mf}$

Tabla XI. Registros experimentales de la capacidad calorífica determinados con el calorímetro DSC (2010).

Temperatura K	C_p (J/kg K)	
	M=0.05	M=0.20
293.15	1361.0	1738
295.15	1364.5	1756
297.15	1365.5	1768
299.15	1371.0	1784
301.15	1377.0	1800
303.15	1386.5	1816
305.15	1395.0	1828
307.15	1403.5	1843
309.15	1414.0	1860
311.15	1425.0	1872
313.15	1434.5	1885
315.15	1450.0	1906
317.15	1464.5	1925
319.15	1476.0	1938
321.15	1489.0	1955
323.15	1510.5	1976
325.15	1527.5	1989
327.15	1545.0	2008
329.15	1565.5	2023
331.15	1584.0	2043
333.15	1604.5	2061
335.15	1626.0	2082
337.15	1647.0	2099
339.15	1665.0	2116
341.15	1688.0	2132
343.15	1698.0	2146
$\pm \sigma$	0.021	0.0055

Tabla XII. Registros experimentales de la difusividad determinados con la cámara de humedad.

Tiempo (min.)	M (kg de agua/ kg de sólido seco.)			
	T= 40°C.	T= 50°C.	T= 60°C.	T= 70°C.
0	0.2	0.2	0.2	0.2
1	0.21	0.1903	0.19765	0.196
2	0.20176	0.18161	0.18852	0.1885
4	0.18587	0.16661	0.1871	0.1741
6	0.1846	0.15429	0.17682	0.15798
8	0.16236	0.14189	0.16631	0.14374
10	0.15952	0.12537	0.14274	0.1257
13	0.14945	0.13124	0.11768	0.10158
16	0.13542	0.1273	0.11223	0.08979
20	0.13212	0.10215	0.09759	0.08038
24	0.11716	0.07834	0.09133	0.07459
30	0.11467	0.08274	0.07198	0.06038
40	0.09789	0.06356	0.05124	0.03391
50	0.09028	0.0521	0.04592	0.02432
60	0.07794	0.03573	0.03833	0.01945
80	0.0712	0.02832	0.02295	0.0125
100	0.05853	0.0218	0.01593	0.01005
120	0.05795	0.0164	0.015	--
150	0.04636	0.01409	0.01517	--
180	0.04489	--	--	--
$\pm\sigma$	0.0063	0.0069	0.0052	0.0073

Tabla XIII. Registros experimentales del coeficiente de actividad determinado en la cámara de actividad (AWX 3000) y su registrador de actividad.

M(kg/kg)	a_w				
	295.15 K	298.15 K	303.15 K	313.15 K	323.15 K
0.0125	0.168	0.19	0.216	0.299	0.383
0.0241	0.335	0.366	0.423	0.533	0.633
0.0421	0.49	0.544	0.627	0.736	0.856
0.0693	0.63	0.671	0.772	0.872	0.977
0.1580	0.994	1.000	----	----	-----
$\pm\sigma$	0.019	0.012	0.018	0.0013	0.023