

Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

## “IZTAPALAPA”

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN  
EFECTIVO EN SÓLIDOS POROSOS UTILIZANDO EL  
MÉTODO DE RÉGIMEN REGULAR

TESIS QUE PRESENTA:  
I.Q. HUGO ESPINOSA ANDREWS

PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS (INGENIERÍA QUÍMICA)

Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular



*CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA*  
*DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS E HIDRÁULICA*  
*MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA*

**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN  
EFECTIVO EN SÓLIDOS POROSOS UTILIZANDO EL  
MÉTODO DE RÉGIMEN REGULAR**

Tesis para obtener el grado de:

**Maestro en Ciencias (Ingeniería Química)**

Presenta:

**I.Q. Hugo Espinosa Andrews**

Asesores:

**Dr. Mario Vizcarra Mendoza**

**M. en C. Carlos Martínez Vera**

**Diciembre 2003**

## AGRADECIMIENTOS

Esta tesis esta dedicada a mis padres Juventino y Rosa Martha que con su apoyo y cariño me han ayudado a cumplir todas las metas que me he propuesto a través de mi vida.

A toda la gente que participo de manera directa o indirectamente, por que con sus comentarios enriquecieron mi persona y por ende esta tesis.

En especial a Nancy Stivaliz por el cariño y felicidad que me has brindado en todos estos años, y a ustedes chiquitos quienes me impulsaban a continuar en esas largas noches de estudio.

Agradezco muy especialmente al Dr. Mario Vizcarra y al M en I. Carlos Martínez, por la dirección e interés al presente trabajo. Al Dr. Jaime Vernon, Dr. Roberto Limas y al M en I.Q. Francisco Caballero por ser parte del jurado evaluador quienes con sus aportaciones y comentarios mejoraron éste trabajo de investigación.

Finalmente el mar no es tan grande.

Recuerda que todos sus misteriosos sonidos caben en un caracol.

Carl Sagan.

## RESUMEN

En este trabajo se desarrolló una metodología experimental que conduce a la determinación del coeficiente de difusión efectivo de la semilla de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*), para el estudio del comportamiento del proceso de secado en sistemas de lecho fluidizado. Se utilizó un secador tipo charola, escala laboratorio para determinar el coeficiente de difusión efectivo en una muestra de 5 g de amaranto. El secado se llevó a cabo en una monocapa a condiciones isotérmicas (temperaturas de 313 a 343 K), con contenidos iniciales de humedad de 0.26 y 0.30 kg H<sub>2</sub>O/kg SS. La correlación resultante, del tipo ley de potencia, considera las variaciones del coeficiente de difusión con la temperatura y el contenido de humedad en el grano, fue validada simulando el comportamiento de un secador de lecho fluidizado. Se aplicó un modelo homogéneo que considera ausencia de burbujas en el lecho y un modelo heterogéneo, que si las toma en cuenta. Los resultados obtenidos con la simulación, dieron una buena predicción de las cinéticas de secado y del comportamiento del grano dentro del secador de lecho fluidizado, aproximando más a los datos experimentales utilizando el modelo heterogéneo.

Los modelos mencionados anteriormente demandaron parámetros los cuales fueron tomados de trabajos anteriores de esta línea de investigación. Datos hidrodinámicos (Caballero; 1999) y datos termodinámicos (Vizcarra et al.; 2003).

## ÍNDICE

1	ANTECEDENTES.....	1
2	INTRODUCCIÓN.....	4
2.1	Teoría de Secado .....	7
2.2	Régimen Regular .....	10
2.3	Secadores de Lecho Fluidizado.....	14
2.3.1	Modelo Homogéneo .....	14
2.3.2	Modelo Heterogéneo .....	18
3	JUSTIFICACIÓN.....	22
4	OBJETIVOS.....	24
5	DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	25
5.1	Material.....	25
5.2	Equipo Experimental .....	25
5.3	Propiedades Físicas .....	26
5.3.1	Densidad Aparente .....	26
5.3.2	Área de Transferencia .....	26
5.4	Metodología Experimental .....	27
5.4.1	Humedad Inicial .....	27
5.4.2	Temperatura de Operación .....	27
5.4.3	Tiempo de Secado .....	27
5.4.4	Velocidad de Operación (aire).....	27
5.4.5	Determinación de las Curvas de Secado Isotérmicas .....	28
5.5	Procedimiento de Cálculo.....	28
6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	32
6.1	Propiedades Físicas .....	32
6.1.1	Número de Semillas .....	32
6.1.2	Densidad Aparente ( $\rho_s$ ) .....	32
6.1.3	Velocidad de Operación (aire).....	32
6.1.4	Humedad de las Semillas.....	33

Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular

6.2	Análisis Diferencial de Barrido (DSC).....	33
6.3	Experimentos Preliminares (Balanza de Humedad).....	34
6.3.1	Análisis de las Curvas de Secado .....	36
6.3.2	Efecto de la Temperatura en las Curvas de Secado.....	37
6.4	Efecto de la Humedad Inicial .....	38
6.5	Flux de Masa .....	40
6.6	Cálculo del Coeficiente de Difusión como Función de T y M.....	41
6.6.1	Ley de Potencia .....	41
6.7	Energía de Activación .....	45
6.8	Simulación.....	46
6.8.1	Efecto del Coeficiente de Difusión Efectivo .....	47
6.8.2	Predicción del Secado en un Lecho Fluidizado.....	48
7	CONCLUSIONES.....	51
8	BIBLIOGRAFÍA.....	53
9	NOMENCLATURA.....	58
10	APÉNDICES .....	61
A.	Amaranto .....	61
B.	Datos generales.....	64
C.	Análisis Diferencial de Barrido (DSC).....	65
D.	Datos Experimentales Balanza de Humedad.....	66
E.	Datos Experimentales Secador de Charola.....	70
F.	Cálculo del Coeficiente de Difusión Efectivo Promedio.....	72
G.	Modelo Homogéneo (Programa).....	73
H.	Definiciones.....	78

## 1 ANTECEDENTES.

La transferencia de masa en una fase continua (sólido) es descrita generalmente por un coeficiente de transferencia de masa, definido por la relación entre el flux de masa y una diferencia de concentraciones. Muchas teorías han sido desarrolladas al respecto para explicar este fenómeno, por ejemplo: la teoría de película (Lewis; 1916), la teoría de penetración (Higbie; 1935), la teoría de renovación (Danckwerts; 1951), y la teoría de la capa límite (Schlichting; 1955). Otros autores utilizan correlaciones experimentales entre grupos adimensionales; todas estas correlaciones utilizan un coeficiente de difusión, el cual es constante.

El coeficiente de difusión es función de la temperatura y en algunos sistemas depende de la concentración, en particular cuando el agua es el componente que migra. Esta dependencia de la difusividad con la concentración ha sido observada años atrás en la sopa, la madera, la arcilla (Hougen et al., 1939) en muchas soluciones de carbohidratos (Gosting & Morris, 1949; English & Dole, 1950; Fish, 1958), y en el polivinil alcohol (Okazaki et al., 1974). En años más recientes en el café, la leche (Luyben et al., 1980) y en copolímeros de alto peso molecular como la goma de mezquite, goma arábiga y maltodextrina-10 (Báez et al., 2002)

Luikov (1968) propuso que el proceso de difusión podía ser dividido en tres etapas. En la primera etapa, la difusión era fuertemente influenciada por la distribución inicial de la concentración; después de cierto tiempo esta influencia desaparecería, por lo que ya no sería detectada en los perfiles de concentración. La segunda etapa fue llamada *régimen regular (RR)*; en ésta los perfiles de concentración y la velocidad de transferencia de masa eran aproximadamente asintóticos. Y la tercera etapa correspondía al estado estacionario durante la cual la concentración en cualquier punto del cuerpo es constante. Ésta fue la base del estudio de Schoeber (1973), quien determinó el tiempo de secado de una gota en una solución acuosa de maltosa, durante la etapa final del proceso de secado era independiente de la concentración inicial.

Crank (1975) propuso soluciones analíticas para la ecuación de Fick, considerando distintas geometrías (placa, cilindro y esfera) con la finalidad de encontrar el coeficiente de difusión, como una función de la posición y el tiempo. Pero debido a la complejidad de las ecuaciones era necesario utilizar programas de computadora para resolver el complicado sistema de ecuaciones parciales; sin considerar aún la variación del coeficiente de difusión. En ese mismo año Schoeber y Thijssen publicaron un análisis de la solución numérica de la ecuación de difusión en una placa, introduciendo el caso en el que el coeficiente de difusión variaba, aproximándose al RR.

Schoeber (1976) resolvió numérica y analíticamente la ecuación de difusión. Introdujo el concepto del RR, en el cual todas las curvas de secado, para un mismo material, con una misma geometría y a una misma temperatura, convergen en una sola curva, llamada curva maestra de régimen regular, sin importar el contenido inicial de humedad. Éste método fue desarrollado para poder determinar el coeficiente de difusión efectivo ( $D_{ef}$ ) como función de la concentración, la temperatura y la geometría, tomando en cuenta la disminución del volumen de la matriz. Sin embargo uno de los problemas que enfrentaba era lo laborioso del método, debido a la serie de interpolaciones y diferenciaciones sucesivas, por lo que no llegó a ser muy popular en su tiempo. Dos años más tarde Schoeber propuso un método corto para aproximar su riguroso procedimiento, una ventaja de éste método era que no se necesitaba conocer toda la historia del proceso de secado para poder calcular la difusividad efectiva en función de la concentración, si se determinaban las curvas de RR. Para poder aplicar el método de régimen regular (MRR) se requiere trabajar a condiciones isotérmicas y que el material tenga la misma geometría.

En trabajos más recientes distintos autores se han dado a la tarea de aproximar soluciones analíticas de la ecuación de difusión en el periodo de RR (Lui y Coumans, 1996; Kroes et al., 1996) y algunos más a aplicar su metodología para obtener el coeficiente de difusión efectivo ( $D_{ef}$ ) en distintos alimentos líquidos y sólidos como función de la concentración y la temperatura (Luyben et al., 1980; Tong y Lund, 1990; Yoshida et al., 1991; Inazu e

Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular

Iwasaki, 2000; Yamamoto, 2001 Báez et al., 2002). Estos trabajos de investigación han demostrado que muchos alimentos poseen un coeficiente de difusión el cual es función del contenido de humedad, la geometría y la temperatura, lo que nos alienta a desarrollar experimentos para conocer como varía el  $D_{ef}$  a partir de estos parámetros.

La finalidad del presente trabajo es calcular el coeficiente de difusión efectivo en sólidos porosos de estructura matricial constante y bajo contenido de humedad, como la semilla de amaranto.

## 2 INTRODUCCIÓN

El secado es un proceso simultáneo de transferencia de calor y masa (Zogzas y Maroulis, 1996; Dincer y Dost, 1995). La transferencia de masa ocurre durante la eliminación de la humedad libre del sólido por un fluido externo secante, el cual comúnmente es el aire, siendo éste último el que transfiere el calor necesario para la evaporación. En el secado de alimentos el control de humedad dentro de un secador es uno de los parámetros de mayor relevancia; para obtener el nivel deseado de humedad es necesario controlar varios parámetros, entre ellos la temperatura, tiempo de residencia, tipo de combustible y la humedad del aire entrante.

Los equipos, por su forma de operar, pueden clasificarse en:

- س Por lotes.- La sustancia que se va a secar se expone a una corriente continua de aire, en la cual se evapora la humedad; esta operación es relativamente cara, por lo que se remite a operaciones en pequeña escala, plantas piloto y a trabajos de investigación.
- س Continuos.- La sustancia que se va a secar y el gas pasan continuamente (a contracorriente o cocorriente) a través del equipo; comúnmente se aplica cuando se requieren tratar grandes volúmenes de sólidos.

Los métodos de secado más comunes son (Huai et al., 2001):

- δ Secado por absorción (fuerzas capilares o difusión).
- δ Secado mecánico (compresión, fuerzas centrífugas o gravedad).
- δ Secado térmico (evaporación).

Con la finalidad de comprender el fenómeno de secado han sido propuestos un gran número de mecanismos de transporte de humedad dentro de los poros del sólido, entre ellos destacan la difusión molecular, el movimiento capilar, la difusión líquida a través de los poros del sólido, por mencionar algunos (Perry et al., 1992). Dos de los principales factores que influyen en la migración de agua en los alimentos son la actividad del agua en equilibrio y la velocidad de difusión.

Los alimentos en regiones con distinta actividad de agua, ocasionan un gradiente de humedad debido a que el sistema no se encuentra en equilibrio (Labuza y Hyman, 1999). La transferencia de humedad ocurre para el componente con más alta actividad de agua a aquellos con una actividad más baja (Hong et al., 1986). El sistema se encontrará en equilibrio a cierta humedad relativa constante, si los potenciales químicos para el agua son iguales.

La difusión dentro de un sólido poroso (figura 1) no será de tipo unidireccional, si no por lo contrario, tendrá una trayectoria tortuosa, ya que los poros del sólido no son rectos, esto trae como consecuencia que la distancia neta recorrida por el compuesto que se difunde será mucho mayor que en un sólido no poroso (Lobo, 1997).

La difusión en un medio poroso puede ser cuantificada con base en la primera ley de difusión de Fick en un medio continuo (Plumb et al., 1999).

$$J = D_C \rho_g \nabla M + D_T \nabla T \quad \text{Ec. 1}$$

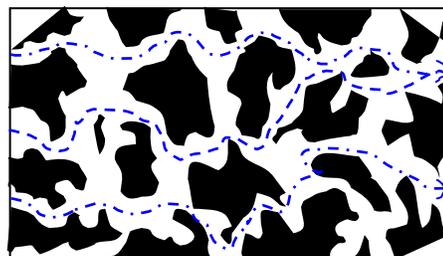


Figura 1. Tortuosidad de un sólido poroso.

Donde el primer término de la ecuación (1) considera los gradientes de humedad y el segundo término considera los gradientes de temperatura o el efecto Soret. En general este último es despreciable debido a que el coeficiente de difusión por calor ( $D_T$ ) es muy pequeño en comparación con el coeficiente de difusión por transferencia de masa ( $D_C$ ) debido a gradientes de concentración o de presiones parciales. El coeficiente de difusión efectivo ( $D_{ef}$ ) se puede definir como una cuantificación del área reducida de difusión como resultado de la presencia de la fase sólida. Esto indica que el coeficiente de difusión efectivo ( $D_{ef}$ ) se puede obtener multiplicando al coeficiente de difusión ( $D_C$ ) por el espacio vacío de los poros del sistema ( $\epsilon$ ) y la tortuosidad del sistema ( $\tau$ ) (Plumb et al., 1999).

$$D_{ef} = \frac{\epsilon D_C}{\tau} \quad \text{Ec. 2}$$

En general la difusividad depende de la temperatura, del contenido de humedad, de la porosidad y de la “tortuosidad” en el alimento (Datta y Zhang, 2001). Respecto al tamaño del poro, teóricamente la difusión de una molécula pequeña como el agua a través de un alimento, es controlada por el tamaño de las moléculas del alimento, la presencia de otras moléculas en la fase vapor con que las moléculas de agua pueden chocar ( $O_2$  y  $N_2$ ) y la geometría circundante.

La mayoría de los métodos de determinación de coeficientes de difusión consisten en la comparación de los resultados experimentales (en términos de perfiles de concentración, tasas de absorción, etc) a partir de la solución de la ecuación de difusión. La dependencia con la concentración del coeficiente de difusión, es ajustada al modelo que mejor correlacione los datos experimentales. Las mediciones experimentales pueden ser internas y externas.

-Mediciones internas de los gradientes de concentración pueden ser realizadas por *técnicas no destructivas* las cuales requieren de ciertos etiquetados o cierta marcación de los componentes que migran y por *técnicas destructivas* en donde el cuerpo es dividido o cortado y la concentración promedio en cada división puede ser determinada. Las técnicas no destructivas incluyen métodos ópticos (densidad óptica, índice de refracción, índice de gradientes de refracción) y otros métodos de radiación (radiación absorción, métodos de radio-trazado).

-Mediciones externas de las variables globales como la concentración promedio y el flux en la superficie o la concentración en la superficie son de las mediciones más atractivas, la única manera de medirlas es seguir el proceso de difusión, el cual puede ser en estado estacionario o transitorio.

En el Estado Estacionario (EE), la interpretación de los resultados es relativamente simple, debido a que la ecuación de difusión es gobernada por una ecuación diferencial ordinaria. Sin embargo, presenta una desventaja importante, la necesidad de periodos largos de

tiempo para alcanzar el estado estacionario, en particular cuando el coeficiente de difusión es muy pequeño ( $\sim < 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ), no obstante el EE es un caso límite de un problema más amplio, real e intelectualmente estimulante.

En general, los sistemas son dinámicos, esto es, su comportamiento varía con el tiempo, en otras palabras se encuentran en el régimen transitorio. El Estado Transitorio (ET) en un proceso de absorción o desorción es comúnmente usado para determinar el coeficiente de difusión cuando éste depende de la concentración; su estudio requiere de una descripción matemática más compleja del problema que el EE, por lo que, la interpretación de los datos experimentales es relativamente más complicada.

El proceso de difusión se lleva a cabo en un intervalo de concentración muy pequeño, en el que comúnmente la difusividad es tomada como constante. Sin embargo existe una gran cantidad de sistemas en los cuales el coeficiente de difusión varía fuertemente con la concentración y la temperatura, lo que nos alienta a estudiar esta dependencia en los sistemas alimenticios.

## **2.1 Teoría de Secado**

Estudios de laboratorios en las 5 décadas pasadas han establecido perfectamente la naturaleza discontinua de los procesos de secado. En el caso general del secado, la velocidad de evaporación de humedad ocurre en dos etapas distintas, dependiendo si la humedad se evapora de la superficie externa o la interna. En la siguiente figura se muestran en general los procesos de secado, los cuales consisten (Kirk-Othmer, 1965) en:

1. Un periodo preliminar transitorio
2. Un periodo de secado a velocidad constante (PSVC) (condiciones isotérmicas).
3. Un período de secado a velocidad decreciente (PSVD).

En PSVC la humedad libre y la velocidad de evaporación cambian poco conforme se reduce el contenido de humedad. Durante este periodo, la velocidad de secado es alta y existe un pequeño incremento en la temperatura. El PSVD principia en el contenido de

humedad crítica al concluir el PSVC y se caracteriza por una velocidad de secado variable a lo largo del resto del ciclo de secado, la migración de la humedad se lleva a cabo del interior de la partícula a los alrededores, lo cual llega a ser un factor limitante de la velocidad de secado. Si el coeficiente de difusión disminuye fuertemente con la concentración de agua, la transferencia de masa durante el periodo de velocidad decreciente es generalmente controlada por la transferencia en la fase dispersa.

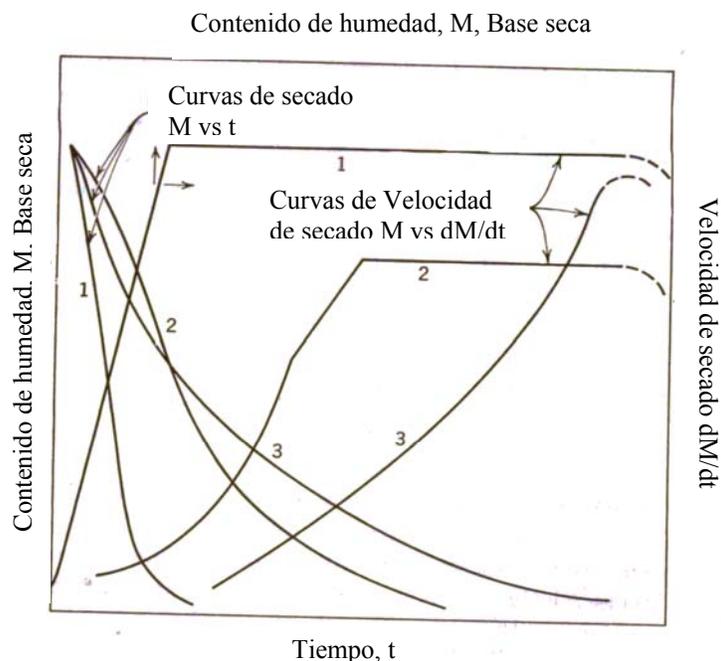


Figura 2. Curvas típicas de secado en función del tiempo y velocidad de secado de los procesos más comunes. (1) Curva típica de secado donde la mayor parte del secado se lleva a cabo en el PSVC. (2) Curva típica de secado en la cual dos diferentes mecanismos internos ocurren, produciendo dos PSVD. (3) Curva típica de secado en la cual el material no presenta el PSVC. (Kirk – Othmer, 1965).

Por lo general el contenido de humedad se expresa en base seca como kg de H<sub>2</sub>O/kg de SS. Si el material contiene más humedad que el gas con que entra en contacto (el cual contiene determinada humedad y temperatura) se secará hasta alcanzar un valor de equilibrio ( $M_e$ ). De lo contrario si el material contiene menos humedad que su valor de equilibrio absorberá agua hasta alcanzar dicho valor. El contenido de humedad de equilibrio varía notablemente con el tipo de material para cualquier porcentaje de humedad relativa y en un sólido disminuye un poco al aumentar la temperatura. Los sólidos insolubles no porosos tienen

valores muy pequeños de contenido de humedad al equilibrio. Los datos experimentales por lo general son expresados en: (a) el peso total del sólido húmedo a diferentes tiempos ( $W$ ) y (b) la masa del sólido seco ( $W_s$ ).

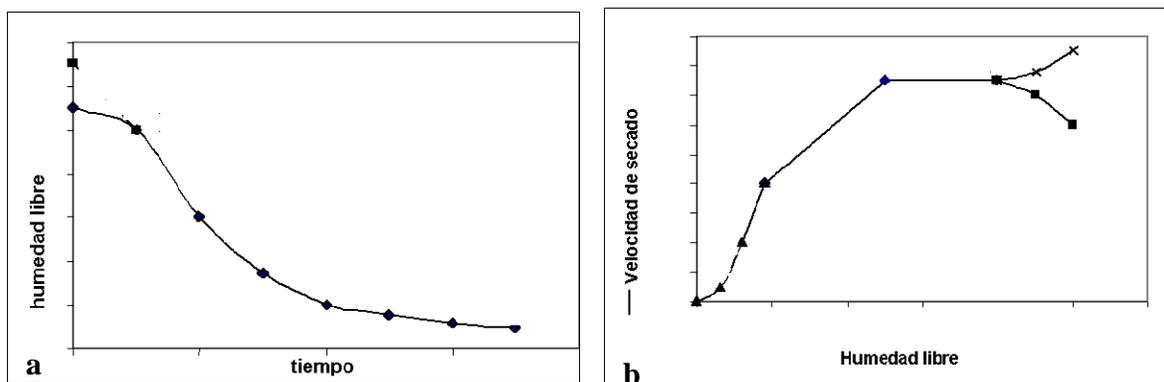


Figura 3. Gráficas de secado a) Curva de secado b) Curva de velocidad de secado, (Treybal, 1992).

El contenido de humedad en base seca se expresa como la relación entre los kg totales de agua entre los kg de sólido seco, dado por la siguiente relación:

$$M = \frac{W - W_s}{W_s} \quad \text{Ec. 3}$$

Habiendo establecido las condiciones de secado constante se determina el contenido de humedad de equilibrio ( $M_e$ ). Con esto se procede a calcular el valor del contenido de humedad libre, para cada valor de  $t$  y se grafica  $M$  vs  $t$  (figura 2a). Para obtener la curva de velocidad de secado se miden las pendientes tangentes a la curva de secado, con lo que obtenemos  $-dM/dt$ . Se calcula entonces la velocidad de secado para cada punto y se grafica  $-dM/dt$  vs ( $M$ ) (figura 2b).

En los poros finos de sólidos, la curva de secado en el segundo periodo de velocidad decreciente puede obedecer la ley de difusión y la curva resultará cóncava hacia arriba. Para sólidos muy porosos la curva de velocidad de secado en el segundo periodo de velocidad decreciente suele ser recta y por lo tanto las ecuaciones de difusión no son aplicables. Un factor que afecta con frecuencia a la velocidad de secado es la contracción

del sólido al eliminarse la humedad, pero los sólidos rígidos no se contraen de manera apreciable.

## 2.2 Régimen Regular

“El MRR es explicado en los trabajos realizados por Kondratiev (1964) y Luikov (1968)) considerando la difusividad constante” Schoeber (1976). La primera indicación de la existencia del RR con coeficiente de difusión dependiente de la concentración fue establecida por Schoeber en 1973. Como se mencionó anteriormente, él encontró que el tiempo de secado de una gota de una solución acuosa de maltosa durante la etapa final del proceso era independiente de la concentración inicial.

El RR, es conocido como un fenómeno de transferencia de masa, puede determinarse numérica y experimentalmente, en sistemas que tienen una fuerte dependencia de la difusividad respecto a la concentración. A diferencia del secado clásico, el MRR divide el proceso de secado en tres periodos:

✚ *Periodo de secado a velocidad constante (PSVC)*: La primera etapa del proceso de secado, en donde el flux de transferencia de masa desde sólido a los alrededores es constante.

✚ *Periodo de penetración (PP)*: La etapa inicial del proceso de desorción, provoca que la condición de frontera penetre dentro del sólido. Por un corto tiempo la concentración en la superficie cambia, pero el centro del sólido todavía no percibe este cambio. Esto significa que el perfil de concentración dentro de la fase dispersa todavía no se ve influenciado, “el proceso es idéntico a una absorción en un medio semi-infinito”. El cálculo de la velocidad de transferencia de masa por un corto tiempo de contacto puede realizarse utilizando este fenómeno (Schoeber, 1976).

✚ *Periodo de régimen regular (PRR)*: El proceso de secado esta controlado por la difusión. En este periodo todas las curvas de secado, para un material con una determinada geometría y temperatura constante, convergen en una sola curva sin importar el contenido inicial de humedad de la muestra.

Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular

Las curvas de RR son representadas graficando el flux de transferencia de masa (F) contra el contenido de humedad (M) (figura 4). Comenzando a distintos contenidos de humedad inicial, varias curvas con periodos de velocidad constante son posibles, pero todas inciden hacia el mismo periodo de penetración (PP). Todas las curvas de penetración terminan en una sola curva de RR por lo tanto, la curva muestra los valores del contenido de humedad al equilibrio. La curva de RR es característica de cada material y temperatura. La principal simplificación es la suposición de ausencia de gradientes de temperatura en el material a secar. Esta consideración es justificable cuando el calor requerido para la evaporación, es alimentado por aire seco a la superficie a vaporizar (Schoeber, 1976).

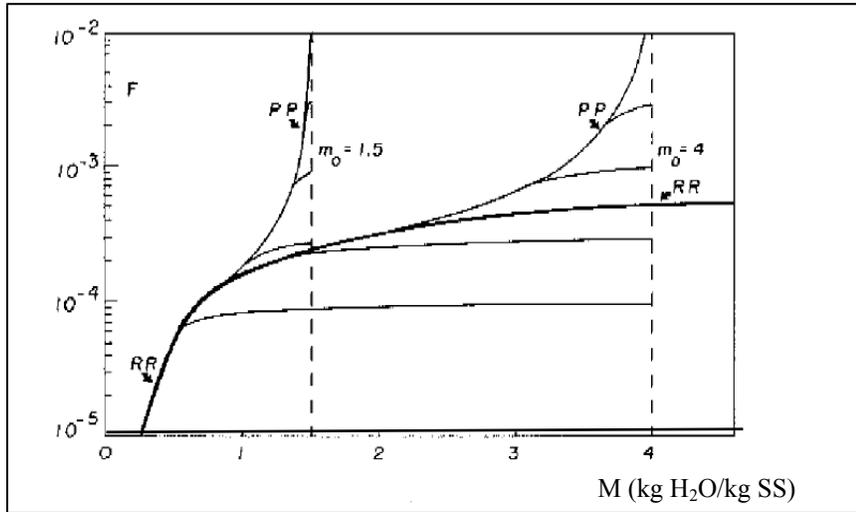


Figura 4.- Curva isotérmica de RR, con diferentes contenidos de humedad inicial. (Shoeber, 1976).

La velocidad inicial de secado depende de las condiciones del flujo, temperatura y humedad del aire. Así las curvas de secado que comienzan con distintas velocidades de secado, todas inciden más o menos después del periodo a velocidad constante, en una “curva maestra”. En consecuencia, estas “curvas maestras” son independientes de la velocidad de secado y del coeficiente de transferencia de masa en la fase gaseosa (Schoeber, 1976). Los resultados de este análisis ofrecen un procedimiento para calcular el coeficiente de difusión efectivo en función de la concentración. Como un prerrequisito para el método es necesario conocer las curvas de RR para la temperatura deseada, una ventaja importante en la aplicación del método de Schoeber, es que no requiere ninguna información del tipo de la ecuación de

difusión. Sin embargo el MRR requiere diferenciaciones numéricas de los datos experimentales por lo menos en tres ocasiones, volviéndolo laborioso, si no se cuenta con un buen procedimiento de cálculo. El modelo presupone productos con poros no homogéneos como los de la glucosa por ejemplo, sin embargo es posible que el método sea aplicado también a alimentos con tejidos celulares como las manzanas y patatas (Schoeber, 1976). Para los materiales no-higroscópicos (amaranto), la porosidad no cambia con el contenido de humedad; a diferencia de los anteriores, los materiales higroscópicos, la porosidad cambia con el contenido de humedad (Datta y Zhang, 2001).

Si la fase dispersa consiste en un material sólido poroso, las dimensiones permanecerán constantes durante el proceso de secado. El éxito en la aplicación del MRR se debe al trabajo de investigación de Schoeber en el cual deduce la relación general entre el número de Sherwood y la velocidad de cambio del flux en función del contenido de humedad. Estas relaciones se muestran en la figura 5:

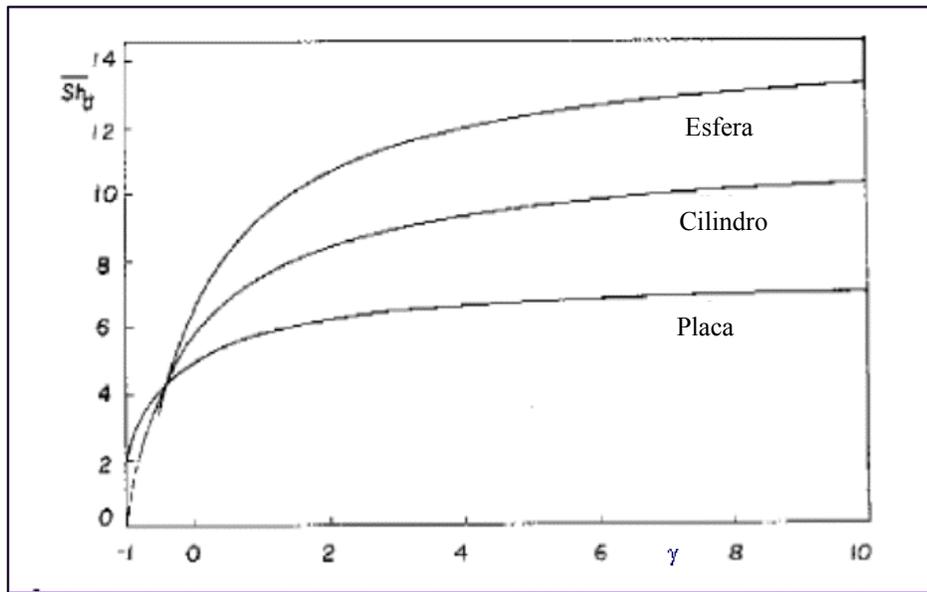


Figura 5.- Relación entre el numero de Sherwood y  $\gamma$  (Schoeber, 1976)

En donde  $\gamma$  esta expresada por:

$$\gamma = \frac{d \ln(F)}{d \ln(M)} \quad \text{Ec. 4}$$

La metodología de cálculo del coeficiente de difusión se esquematiza a continuación:

Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular

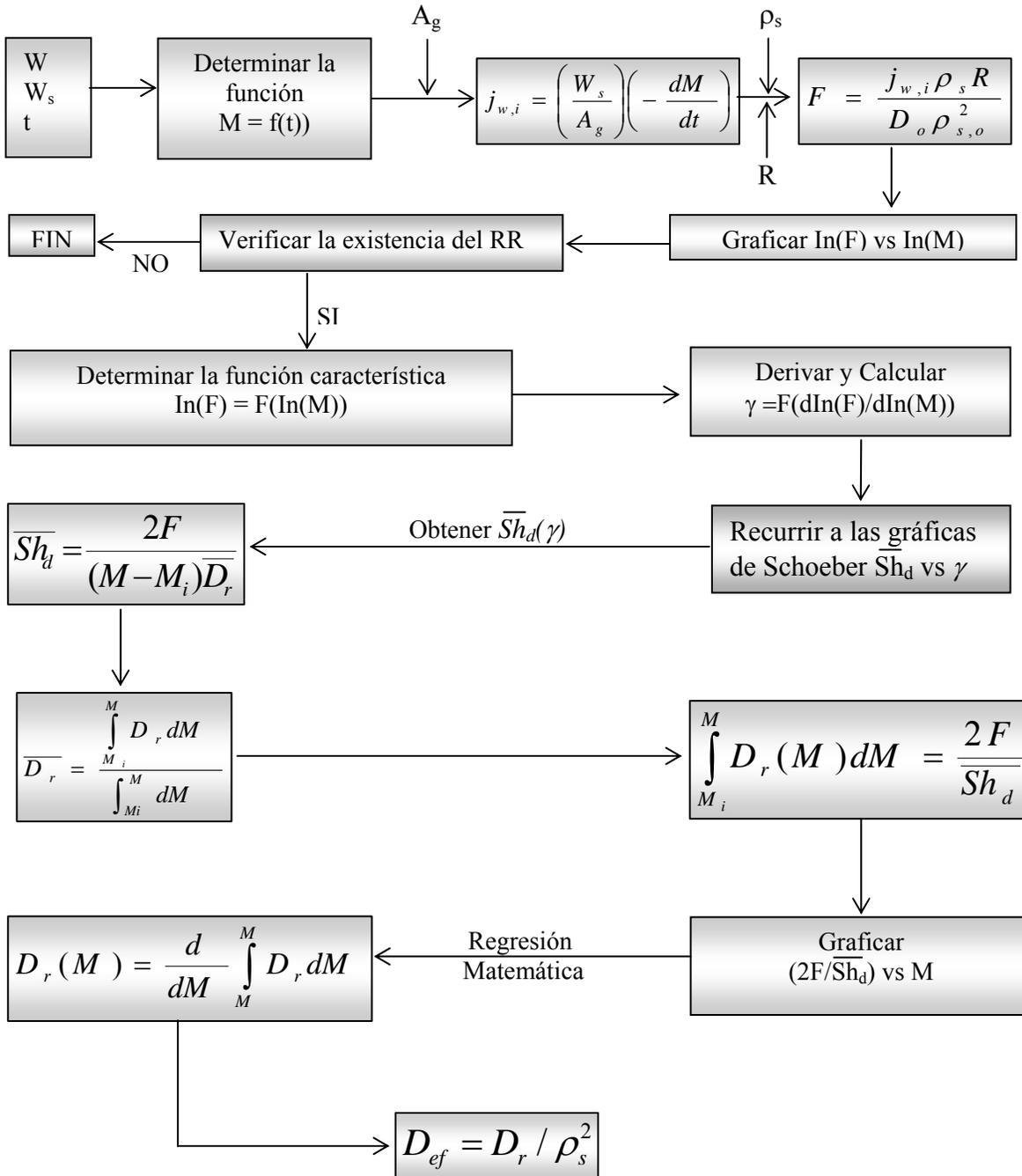


Figura 6.- Diagrama de cálculo del coeficiente de difusión efectivo por el MRR.

## **2.3 Secadores de Lecho Fluidizado.**

El procesado de granos es un fenómeno muy complejo debido a que involucra fenómenos acoplados de transferencia de masa, calor y momentum. Generalmente, por su forma de operar, dos tipos de secadores son comúnmente utilizados, los secadores por lotes y los continuos. En el caso del secado de granos, debido a los grandes volúmenes a tratar, los más generalizados son los secadores continuos caracterizados por las direcciones relativas de los flujos de aire y de los granos, por ejemplo a contracorriente o a corriente paralela.

En general, es conveniente utilizar los secadores de lecho fluidizado (SLF) en productos que contengan 40% o menos humedad; dependiendo de la aplicación puede proporcionar el menor costo de secado, ofreciendo ventajas significativas sobre otras técnicas de secado. Debido a un buen contacto entre el gas y el sólido es posible tener altas velocidades de transferencia de calor y masa. Distintos investigadores han confirmado experimentalmente que el contenido de humedad de las partículas y la temperatura en un SLF por lotes es aproximadamente uniforme a lo largo de la cama (Zahed et al., 1995).

Es necesario contar con la cinética de secado del material para diseñar un SLF. Un mecanismo basado en la ley de Fick, generalmente utiliza un coeficiente de difusión constante, el cual conduce a resultados, en algunos casos fuera de la realidad (Tosi y Ré, 1999). Distintos modelos han sido publicados en la literatura para describir el SLF; para validar el modelo de difusividad efectiva propuesto en esta tesis, se han seleccionado el modelo homogéneo (Zahed y Epstein, 1992) y el modelo heterogéneo (Zahed et al., 1995).

### **2.3.1 Modelo Homogéneo**

Se seleccionó el modelo homogéneo propuesto por Zahed y Epstein (1992) debido a que utiliza parámetros no ajustables, por lo que el modelo requiere la introducción de valores provenientes de experimentos independientes. El modelo fue diseñado para el secado de cereales en lecho borboteante y fluidizado (Pérez, 2000). En el presente trabajo, se hicieron las siguientes suposiciones:

- س Los granos de amaranto son uniformes en tamaño, internamente homogéneos y con una esfericidad cercana a la unidad.
- س Durante el secado las partículas no sufren encogimiento. Las propiedades físicas permanecen constantes en el tiempo.
- س El paso controlante en el proceso de secado es la difusión interna de la humedad a la superficie del grano.
- س La migración de la humedad se lleva a cabo en dirección radial.
- س Los gradientes de temperatura dentro del sólido son despreciables en comparación con los gradientes de humedad.
- س Los granos de amaranto están suficientemente mezclados en el lecho.
- س El secado se lleva a cabo en condiciones adiabáticas, para evitar la transferencia de calor entre las paredes del equipo y el medio ambiente.

El modelo matemático para el secado de amaranto en lotes en un secador de lecho fluidizado es descrito por las siguientes ecuaciones:

Balance de masa:

$$m_A (Y - Y_1) = -m_B \frac{d\bar{M}}{dt} \quad \text{Ec. 5}$$

Balance de energía:

$$m_A [(C_A + Y_1 C_V)(T_1 - T) - (Y - Y_1)\Delta H_{\text{evap}}] = m_B (C_B + \bar{M}C_w) \frac{dT}{dt} \quad \text{Ec. 6}$$

$$\text{C.I.} \quad t=0; \quad T=T_0 \quad \text{Ec. 7}$$

La forma de calcular  $\bar{M}$  proviene de la solución a la ecuación de difusión en coordenadas esféricas:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{\text{ef}} \left[ \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right] + \frac{\partial D_{\text{ef}}}{\partial M} \left( \frac{\partial M}{\partial r} \right)^2 \quad \text{Ec. 8}$$

Con las siguientes condiciones, inicial y de frontera:

$$\text{C.I} \quad t = 0; \quad 0 \leq r \leq R_p; \quad M = M_0 = \bar{M} \quad \text{Ec. 9}$$

$$\text{C.F.I.} \quad t \geq 0; r = 0; M \rightarrow \text{finito}; \frac{dM}{dr} = 0 \quad \text{Ec. 10}$$

$$\text{C.F.II.} \quad t > 0; r = R_p; -D_{ef} A_s \frac{\partial(M\rho_p)}{\partial r} = \frac{m_B}{n} \left( -\frac{d\bar{M}}{dt} \right) \quad \text{Ec. 11}$$

Donde  $n$  es el número de granos en el lecho y está definido como:

$$n = \frac{m_B}{\rho_p V_s} \quad \text{Ec. 12}$$

Sustituyendo Ecuación 5 y 12 en 11 se obtiene la segunda condición de frontera para la ecuación 8.

$$\text{C.F.II.} \quad r = R_p; \frac{\partial M}{\partial r} = -\frac{m_A(Y - Y_1)V_p}{m_B D_{ef} A_s} \quad \text{Ec. 13}$$

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

$$\bar{M}(t) = \frac{4\pi}{V_p} \int_0^{R_p} r^2 M(r, t) dr \quad \text{Ec. 14}$$

La difusión de humedad se propone como una función de la humedad y la temperatura.

$$D_{ef} = f(\bar{M}, T) \quad \text{Ec. 15}$$

El sistema de ecuaciones 8 a 10, 13 y 14 se adimensional de la siguiente manera:

$$\xi = r/R_p; r = \xi R_p; dr = R_p d\xi \quad \text{Ec. 16}$$

Posteriormente el mismo sistema de ecuaciones se transforma de coordenadas esféricas a rectangulares para un manejo más sencillo del sistema de ecuaciones:

$$u = \xi^2; du = 2\xi d\xi \quad \text{Ec. 17}$$

El nuevo sistema de ecuaciones queda de la siguiente forma:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{4}{R_p^2} \left[ D_{ef}(M, T) \left( u \frac{\partial^2 M}{\partial u^2} + \frac{\partial M}{\partial u} \right) + u \frac{\partial D_{ef}(M, T)}{\partial M} \left( \frac{\partial M}{\partial u} \right)^2 \right] \quad \text{Ec. 18}$$

$$\text{C. Inicial} \quad t = 0; M = M_0 = \bar{M} \quad \text{Ec. 19}$$

$$\text{C.F.I.} \quad t \geq 0, u = 0, \left( \frac{\partial M}{\partial u} \right)_{u=0} = 0 \quad \text{Ec. 20}$$

$$\text{C.F.II.} \quad t \geq 0, u = 1, \left( \frac{\partial M}{\partial u} \right)_{u=1} = - \frac{R_p m_A (Y - Y_1) V_p}{2 m_B D_{ef} A_s} \quad \text{Ec. 21}$$

Contenido de humedad promedio dentro de la partícula:

$$\bar{M}(t) = \frac{3}{2} \int_0^1 M(t, u) u^{0.5} du \quad \text{Ec. 22}$$

Si el gas de fluidización es aire, como en muchos casos, la humedad absoluta del gas puede ser expresada (Brooker et al., 1974) como:

$$Y = \frac{0.622 a_w P_v}{(P - a_w P_v)} \quad \text{Ec. 23}$$

La presión de vapor está dada por una relación empírica (Kiefer y col., 1941)

$$P_v = 100 \exp \left[ 27.0214 - \frac{6887}{T} - 5.31 \ln \left( \frac{T}{273.15} \right) \right] \quad \text{Ec. 24}$$

Para la actividad de agua, se utiliza la ecuación propuesta por Vizcarra et al. (2003) para el amaranto:

$$a_w = 1 - \exp \left[ - (3.77 \times 10^{-2} * T * M)^{1.068} \right] \quad \text{Ec. 25}$$

El valor de  $M_e$  se obtiene al resolver 22 con el valor de  $M(R_p, t) = M_e$ . La entalpía de desorción es una función tanto de la temperatura y del contenido de humedad, Zahed (1992) propone la siguiente correlación:

$$\Delta H_{\text{evap}} = R_v T^2 \left[ \left( \frac{6887}{T^2} \right) - \left( \frac{5.31}{T} \right) + \left( \frac{da_w}{dT} \right)_M \right] \quad \text{Ec. 26}$$

Proporcionando los valores de  $m_A$ ,  $m_B$ ,  $C_A$ ,  $C_B$ ,  $C_V$ ,  $C_W$ ,  $M_0$ ,  $T_0$ ,  $Y_1$  y las propiedades geométricas de los granos de amaranto; el sistema formado por el balance de energía (Ec. 6) y su condición inicial (Ec. 7), la ecuación de difusión (Ec. 18) con sus condiciones iniciales y de frontera (Ec. 19) a (Ec. 22), así como las ecuaciones auxiliares (Ec. 23 a Ec. 26) pueden resolverse para estimar los valores de  $Y$ ,  $T$  y  $\bar{M}$  como función del tiempo para

el secado de granos de amaranto mediante un secador de lecho fluidizado. Para la solución de éste sistema de ecuaciones se utilizará el método numérico de trazadores cúbicos.

### 2.3.2 Modelo Heterogéneo

A diferencia del modelo homogéneo, el modelo heterogéneo de Zahed implica la solución de sistema de ecuaciones más riguroso, en donde se considera que el secado se lleva a cabo esencialmente en dos fases, la fase burbuja y la fase densa, representadas por los subíndices b y d respectivamente (figura 7). Las consideraciones más relevantes del modelo heterogéneo son:

- س Las partículas pueden ser fluidizadas y la fluidización se lleva a cabo en el régimen burbujeante.
- س El gas que pasa a través de las burbujas es de tipo pistón.
- س Las variaciones de la concentración en las dos fases con respecto al radio son despreciables.
- س No existen sólidos asociados a la fase burbuja.
- س La resistencia a la transferencia de masa a través de las nubes en la frontera son despreciables.
- س Los gradientes de temperatura dentro de las partículas y el encogimiento de las mismas son despreciables.
- س Las propiedades físicas y de fluidización del aire y las partículas son uniformes y no varían significativamente a lo largo del proceso de secado.

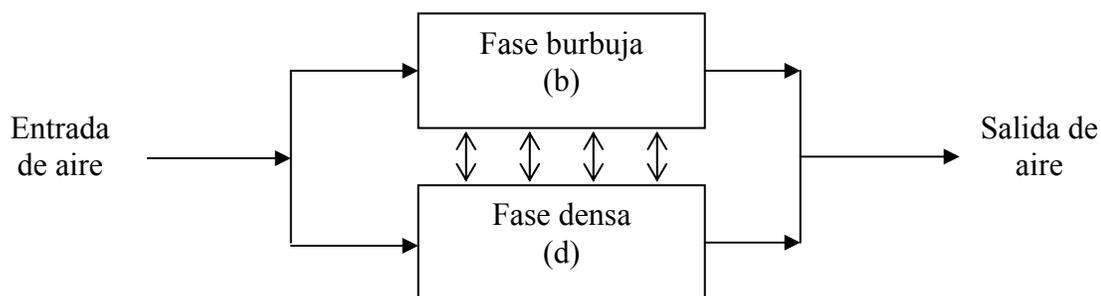


Figura 7.- Modelo de dos fases con todos los sólidos asignados a la fase densa.

Los balances macroscópicos para la fase densa y burbuja son representadas utilizando la ley de conservación de materia y energía; la transferencia de masa en las partículas de la fase densa esta dada por:

$$-\rho_p(1-\varepsilon_{mf})(1-\varepsilon_b)\frac{d\bar{M}}{dt} = m \quad \text{Ec. 27}$$

El balance correspondiente de energía esta representado por:

$$\rho_g(1-\varepsilon_b)(1-\varepsilon_{mf})(C_B + \bar{M}C_W)\frac{dT_p}{dt} = \rho_g G_d(C_A + Y_d C_V)(T_{gi} - T_g) - \Delta H_{evap} \left[ \rho_g G_d(Y_d - Y_i) - \frac{6K_c \rho_g \varepsilon_b}{d_b}(Y_b - Y_d) \right] \quad \text{Ec. 28}$$

Con la condición inicial  $t = 0 \quad T = T_o \quad M_p = M_o$  Ec. 29

La ecuación anterior representa el cambio de temperatura para la partícula en la fase densa como función de  $\bar{M}, Y_d, Y_b, \Delta H_{evap}, d_b$  y  $K_c$ . El cambio de la humedad en el interior de las semillas esta expresado por la ecuación de difusión (Ec. 18), con condiciones de frontera 19, 20 y 30.

Para  $t > 0, u = 1$

$$-D_{ef} \frac{\partial M}{\partial u} \Big|_{u=1} = \frac{r_p^2}{6\rho_p(1-\varepsilon_b)(1-\varepsilon_{mf})} \left[ \rho_g G_d(Y_d - Y_i) - \frac{6K_c \rho_g \varepsilon_b}{d_b}(Y_b - Y_d) \right] \quad \text{Ec. 30}$$

Esta última condición considera que la humedad en la superficie del grano, alcanza el equilibrio instantáneo con la humedad absoluta,  $Y_d$ , en el gas dentro de la fase densa; en el modelo heterogéneo ( $Y_d$ ) es equivalente a ( $Y$ , Ec. 23) del modelo homogéneo.

Los valores de los distintos parámetros utilizados en el modelo heterogéneo fueron determinados por Caballero, (1999) y se muestran a continuación:

$d_l$ (m)	0.095	$L_{mf}$ (m)	0.1
$\varepsilon_{mf}$	0.388	$\varepsilon_b$	0.286
$U_{mf}$ (m/s)	0.2565	$d_b$ (m)	0.034

Tabla 1.- Parámetros del secado de amaranto en un lecho fluidizado.

La velocidad de las burbujas en los lechos burbujeantes puede relacionarse por la correlación de Hillgardt y Werther, para sólidos como el amaranto:

$$U_b = 1.42 * \sqrt{gd_b d_l} + 0.65(U_o - U_{mf}) \quad \text{Ec. 31}$$

La difusividad molecular del vapor de agua en aire se obtiene utilizando la relación de Chapman – Enskog dada por:

$$D = \frac{1 \times 10^{-9} T^{1.75}}{P/101325} \quad \text{Ec. 32}$$

La transferencia de masa en la interfase esta dada por la ecuación de Sit y Grace (1981):

$$k_c = \frac{U_{mf}}{3} + \left( \frac{4D\varepsilon_{mf}U_b}{\pi d_b} \right)^{0.25} \quad \text{Ec. 33}$$

Para calcular la humedad absoluta en la fase burbuja,  $Y_b$ , escribimos un balance de masa en la fase burbuja:

$$\rho_g \varepsilon_b \frac{dY_b}{dt} + \rho_g G_b (Y_b - Y_i) = \frac{6k_c \rho_g \varepsilon_b}{d_b} (Y_d - Y_b) \quad \text{Ec. 34}$$

Si los términos que envuelven el cambio de masa respecto al tiempo en la fase burbuja se considera despreciable comparado con los términos convectivos la ecuación anterior puede describirse como:

$$Y_b = \frac{6k_c \varepsilon_b Y_d + d_b G_b Y_i}{d_b G_b + 6k_c \varepsilon_b} \quad \text{Ec. 35}$$

La densidad del aire a 585 mm Hg (Cd. de México) puede obtenerse por relación:

$$\rho_A = \frac{272}{T} \quad \text{Ec. 36}$$

Dadas  $G_d$ ,  $G_b$ ,  $C_B$ ,  $C_A$ ,  $C_V$ ,  $C_W$ ,  $M_i$ ,  $T_{pi}$ ,  $T_{gi}$ ,  $Y_i$  y la forma de la partícula se puede resolver las ecuaciones que gobiernan el sistema para predecir  $\bar{M}$  y  $T_p$  como funciones del tiempo para un SLF operado en lotes.

En la figura 8 se muestra el algoritmo de solución del modelo heterogéneo para un secador de lecho fluidizado de amaranto. Para aplicar el algoritmo a una fluidización homogénea, entonces  $\varepsilon_b = 0$  y  $Y_b = Y_d$ .

Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular

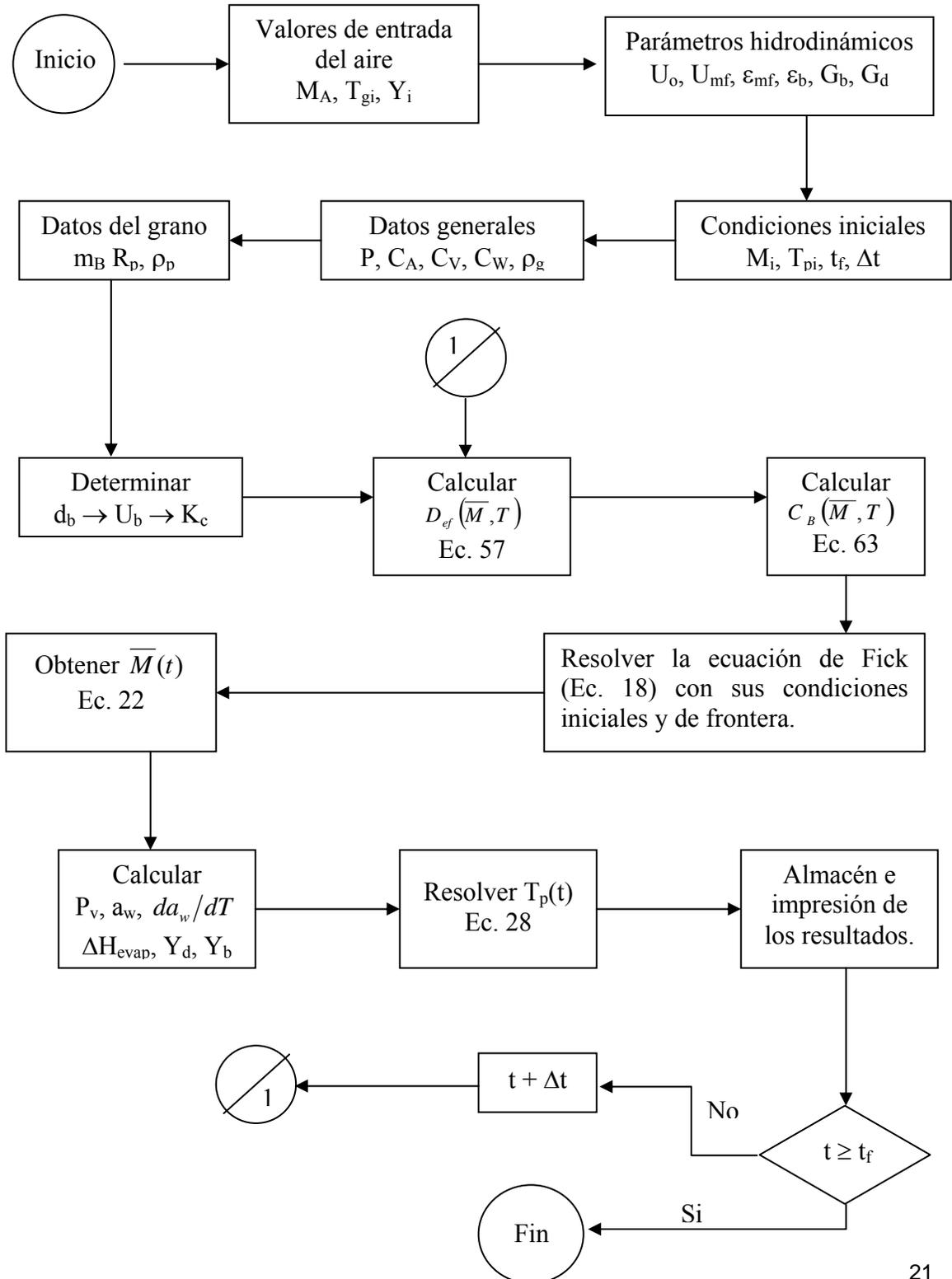


Figura 8.- Algoritmo de cálculo para la solución del modelo heterogéneo.

### 3 JUSTIFICACIÓN

El secado artificial de granos es una práctica ampliamente difundida, la cual más que una operación unitaria, ésta ha sido aplicada como una operación artesanal lo que origina una serie de problemas que repercuten en los costos de producción y la calidad del producto. El secado es, con mucho, una de las operaciones más caras en la industria y representa frecuentemente, un "cuello de botella" en la mayoría de los centros de acopio, donde es necesario satisfacer ciertos niveles de humedad de los granos para su comercialización. Esto es especialmente importante en aquellos centros ubicados en las regiones donde la recepción del grano se lleva a cabo en un período de tiempo muy corto. Algunas de las dificultades más comunes son:

- Industria: El alto costo del proceso, ocasionado por la inversión monetaria en equipos, y los elevados costos del consumo de combustible y energía eléctrica.
- Centro de acopio: La gran acumulación de granos húmedos que se recolectan en los momentos de mayor cosecha, exigen un manejo cuidadoso de dichas partidas ya que para su almacenamiento requieren bajos contenidos de humedad, obligando a realizar en muchas ocasiones, secados rápidos e intensos, los cuales pueden afectar la calidad nutricional y el aspecto físico del grano.

Si bien se ha avanzado mucho en el desarrollo de equipos de secado, todavía se observan problemas de diseño en los mismos. Para solucionar estos problemas es necesario adquirir un gran conocimiento acerca de las propiedades del sistema que se va a secar. Uno de los parámetros de mayor importancia para estos propósitos es el coeficiente de difusión efectivo ( $D_{ef}$ ).

La transferencia de masa en sólidos comúnmente es descrita por la Segunda Ley de Fick; ésta puede resolverse por métodos analíticos y/o numéricos, con la finalidad de conocer cómo varía el perfil de concentraciones respecto al tiempo, la coordenada espacial de un sistema dado, o simplemente para determinar el coeficiente de difusión. Para ello es necesario comprender y deducir correctamente las condiciones iniciales y de frontera que gobiernan dicho sistema. La solución de éste es complejo en muchas ocasiones, suele incrementarse aún más si el coeficiente de difusión es dependiente de la concentración o la coordenada espacial.

Los datos existentes en la literatura acerca de la dependencia del coeficiente de difusión respecto a la concentración suelen ser muy escasos; esto puede ocasionar errores en el diseño del equipo de secado, por lo que es necesario elaborar experimentos para determinar si el coeficiente de difusión es función de la concentración o de la coordenada espacial.

El MRR proporciona una metodología para la determinación del coeficiente de difusión efectivo ( $D_{ef}$ ) considerando su dependencia con la concentración, la geometría y la temperatura, a partir del tratamiento correcto de los datos experimentales, en sistemas que tienen una fuerte dependencia difusional como el secado y la humidificación.

El determinar correctamente las propiedades principales en el secado de alimentos conduce a conservar la calidad nutricional y a mantener un aspecto agradable de los alimentos.

## 4 OBJETIVOS

### **Objetivo general**

Determinar el coeficiente de difusión efectivo en función de la concentración y la temperatura en sólidos porosos de matriz constante y contenido medio de humedad (*Amaranto*), aplicando el Método de Régimen Regular.

### **Objetivos particulares**

Diseñar, construir y operar un secador de charola, escala laboratorio, para obtener curvas de secado isotérmicas en monocapa.

Establecer una correlación que permita el cálculo del coeficiente de difusión efectivo de la semilla de amaranto como una función del contenido de humedad y la temperatura.

Determinar la energía de activación del proceso de secado de la semilla de amaranto.

Modelar el comportamiento de un secador de lecho fluidizado.

## 5 DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 5.1 *Material*

Se utilizó amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*) para realizar los presentes experimentos. Esta variedad se escogió por ser la más consumida en el país, el porcentaje de humedad inicial que contiene es de 13 a 17% en base seca. El tipo de proteínas que contiene la semilla (albúminas, globulinas y glutelinas) convierte al grano en objeto extremadamente atractivo desde el punto de vista nutricional, como una fuente potencial para la alimentación humana. La composición reportada se muestra en la tabla 5 en el apéndice A.

### 5.2 *Equipo Experimental*

Se diseñó un secador de charola escala laboratorio (figura 9), para obtener las curvas de secado isotérmicas. Este secador consta de un tubo de acrílico de 28 cm de longitud, 9.3 cm de diámetro y 0.3 cm de espesor, aislado con cinta de algodón de 2.3 cm. El aire secante proviene de un compresor marca SIEMENS, el cual posee dos columnas deshumidificadoras en paralelo de alúmina, con un volumen de  $0.31\text{m}^3$  cada una. Este aire fluye a través de una segunda columna deshumidificadora de gel de sílice, con un volumen de  $0.018\text{m}^3$ , su finalidad es mantener baja y constante la humedad del aire en la entrada del secador. El flujo de aire es controlado por un rotámetro. Para el calentamiento del aire de alimentación se emplea una batería de 10 resistencias (2 KW) tipo abrazadera montadas en la tubería; la temperatura de operación es regulada por un controlador proporcional de temperatura marca CHROMALOX, que trabaja alrededor del punto de operación a  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Para cuantificar las pérdidas de masa se utilizó una balanza analítica OHAUS modelo PRECISION Plus, con una precisión experimental de 0.01 g, con una charola de acrílico con área de  $0.008\text{m}^2$  suspendida en la parte inferior. La balanza es colocada en el interior de una caja de acrílico aislada, para evitar las variaciones de peso causadas por las corrientes de aire en el interior del laboratorio. El aire es distribuido en el interior del secador por una placa deflectora. Para disminuir las fluctuaciones en la lectura de la balanza ocasionada por la corriente de aire que incide sobre la charola, se colocó una masa suspendida de la charola

de 1.4 kg Las pérdidas de masa son leídas directamente de la balanza en intervalos de tiempo que decrecen con el progreso del proceso de secado.

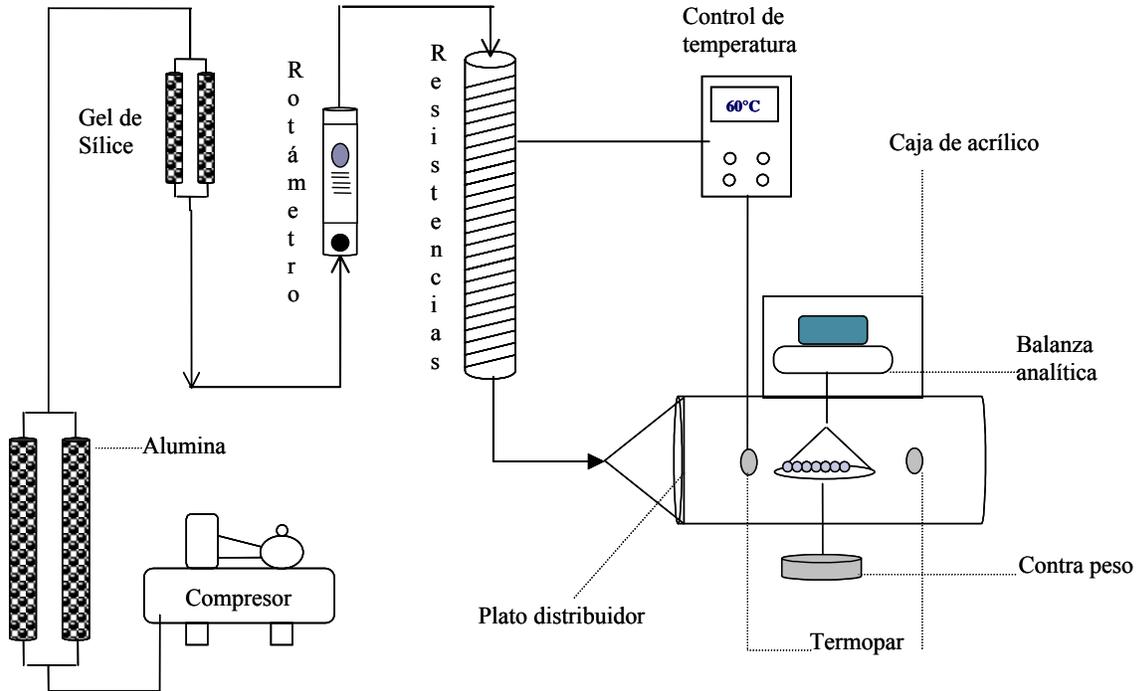


Figura 9.- Secador de charola (SC).

### 5.3 Propiedades Físicas

La recolección de las semillas desde la planta se realiza de forma manual, por lo que éstas contienen fragmentos de la planta y basura, debido a lo anterior es necesario cribar las semillas, con una malla No. 16 (1.13 mm de abertura). El *A. Hypochondriacus* es una semilla que tiene un radio promedio de 1 mm; se considera una esfericidad  $\phi_s \sim 1$ .

#### 5.3.1 Densidad Aparente ( $\rho_s$ )

La densidad del amaranto es calculada por la siguiente relación:

$$\rho_s = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} = \frac{W_{ss}}{(4/3)\pi R_p^3 * (\# \text{ desemillas})} \quad \text{Ec. 37}$$

#### 5.3.2 Área de Transferencia ( $A_g$ )

El área de transferencia de masa de la semilla de amaranto, es calculada por la siguiente relación:

$$A_g = 4\pi R_p^2 * (\# \text{desemillas})$$

Ec. 38

## **5.4 Metodología Experimental**

### **5.4.1 Humedad Inicial**

Para aplicar el MRR, es necesario que las semillas contengan distintas humedades iniciales. El amaranto con el que se cuenta para realizar la fase experimental tiene una humedad inicial del 13 %, debido a lo anterior es necesario humedecer las semillas, esta humidificación se lleva a cabo en una cámara de humedad controlada. Se proponen dos diferentes contenidos de humedad inicial para realizar la experimentación: 26 y 31 % de humedad inicial.

### **5.4.2 Temperatura de Operación**

Investigaciones anteriores (Martínez y Añón, 2001) localizaron temperaturas donde existen procesos de degradación de proteínas a 348 K y gelatinización de amilopectinas a 368 K. Con base en estos trabajos es necesario comprobar por calorimetría diferencial de barrido (DSC, marca TA Instruments modelo 2010), si estos procesos están presentes a las temperaturas de operación estudiadas. Se proponen cuatro niveles de temperatura 313, 323, 333 y 343 K. Estas temperaturas deben ser avaladas por el análisis térmico.

### **5.4.3 Tiempo de Secado**

El tiempo de secado se fijó en 180 minutos, éste tiempo es suficientemente grande para obtener granos con bajo contenido de humedad al final del secado.

### **5.4.4 Velocidad de Operación (aire)**

La velocidad de operación del aire se obtuvo bajo tres criterios:

- a) Minimizar las resistencias externas a la transferencia de masa
- b) Mantener constante la temperatura del secador y
- c) Minimizar las oscilaciones que alteran las lecturas de la balanza.

El flujo de aire es controlado por un rotámetro y medido por un anemómetro a la salida del secador.

#### **5.4.5 Determinación de las Curvas de Secado Isotérmicas**

Para la deshidratación del grano de amaranto se seleccionaron 4 temperaturas de operación (313, 323, 333 y 343 K); a dos diferentes contenidos de humedad inicial, (26 y 31 % base seca). Se coloca una masa inicial de 5 g de amaranto para cada contenido de humedad inicial sobre una charola de acrílico suspendida de la balanza analítica, la muestra se distribuye en una monocapa para reducir los efectos de difusión multicapa. El secador de charola (figura 9) se estabiliza térmicamente a una de las temperaturas de operación previamente establecidas. Una vez alcanzado el equilibrio térmico, se introducen las semillas de amaranto con humedad inicial conocida al interior del secador y en ese momento se considera el tiempo inicial del experimento accionando el cronómetro, la pérdida de masa, se lee directamente de la balanza y se registra en intervalos de tiempo que decrecen con el progreso del secado.

#### **5.5 Procedimiento de Cálculo**

El método utilizado en esta tesis (MRR), está basado en el concepto de un coeficiente de difusión efectivo dependiente la concentración y la temperatura. Las principales consideraciones del método son:

1. La matriz del sólido permanece constante durante el secado.
2. La temperatura de la partícula es uniforme, la cual no cambia con el tiempo (secado isotérmico).
3. El secado comienza con una concentración homogénea de la humedad en el sólido.
4. La difusión puede ser descrita utilizando una sola coordenada espacial (radial).
5. El coeficiente de difusión efectivo depende del contenido de humedad.
6. Las condiciones finales del secado son determinadas por el equilibrio entre el material que se está secando y el gas que acarrea la humedad fuera del secador.

El procedimiento de cálculo utilizado para determinar el coeficiente de difusión efectivo en función del contenido de humedad es descrito a continuación. Es necesario contar con los siguientes parámetros para aplicar el MRR:

Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular

W <sub>ss</sub>	Masa del sólido seco (kg)
A <sub>g</sub>	Área de transferencia (m <sup>2</sup> )
R <sub>p</sub>	Radio del sólido (m)
ρ <sub>s</sub>	Densidad del sólido seco (kg/m <sup>3</sup> )
T	Temperatura de operación isotérmica (K)

Tabla 2.- Parámetros del MRR.

El cálculo de la humedad en base seca está dado por la Ec. 3, los datos experimentales (W y t), son graficados para obtener la curva de secado de amaranto. Las curvas de secado son ajustadas a una función que represente el comportamiento de los datos experimentales.

$$\bar{M} = f(t) \tag{Ec. 39}$$

El flux relativo a la interfase puede ser expresado como:

$$j_{w,i} = \left( \frac{W_s}{A_g} \right) \left( - \frac{d\bar{M}}{dt} \right) \tag{Ec. 40}$$

Para un manejo más sencillo de las variables, el sistema es adimensionalizado utilizando la siguiente relación:

$$F = \frac{j_{w,i} \rho_{s,p} R_p}{D_o \rho_{s,o}^2} \tag{Ec. 41}$$

$$D_o \rho_{s,o}^2 = 1 \tag{Ec. 42}$$

Durante el secado el parámetro flux (*F*) únicamente cambiará si *j<sub>w,i</sub>* cambia, debido a que todos los demás parámetros de la Ec. 41 son constantes. Una vez realizado el cálculo del flux adimensional *F* a diferentes contenidos de humedad inicial se realiza una gráfica *ln (F)* vs. *ln (M)*, la finalidad de ésta es determinar el dominio del RR. A esta curva de RR se ajusta una función *f (ln(̄M))* la cual puede ser polinomial, exponencial, etc.

$$\ln(F) = f(\ln(\bar{M})) \tag{Ec. 43}$$

La Ec. 43 se deriva obteniendo:

$$\frac{d\ln(F)}{d\ln(M)} = f'(\ln(M)) \tag{Ec. 44}$$

A partir de ésta función (Ec. 44) se correlaciona el  $\overline{Sh}_d$  para cada uno de los puntos experimentales, este cálculo se realiza recurriendo a las gráficas de RR desarrolladas por Schoeber (figura 5). Para realizar este cálculo se utiliza la aproximación propuesta por Tong y Lund (1990), expresada por la siguiente ecuación para esferas que no sufren encogimiento:

$$\overline{Sh}_d = Exp \left[ 1.74 + 0.43 (In \gamma) - 0.076 (In \gamma)^2 - 0.0034 (In \gamma)^3 \right] \quad Ec. 45$$

Con la Ec. 45 se calcula el número de  $\overline{Sh}$  para cada uno de los puntos experimentales. Por otro lado se define el número de Sherwood promedio para la fase dispersa como:

$$\overline{Sh}_d = \frac{2F}{(\overline{M} - M_i) \overline{D}_r} \quad Ec. 46$$

La difusividad reducida promedio está dada por la siguiente expresión:

$$\overline{D}_r = \frac{\int_{M_i}^M D_r dM}{\int_{M_i}^M dM} \quad Ec. 47$$

La combinación de las Ec. 46 y 47 da como resultado:

$$\int_{M_i}^M D_r dM = \frac{2F}{\overline{Sh}_d} \quad Ec. 48$$

Con los valores obtenidos del parámetro flux  $F$  y el número de Sherwood se procede a calcular los valores de  $(2F/\overline{Sh}_d)$ , con estos valores se realiza una gráfica de  $(2F/\overline{Sh}_d)$  en función de  $M$ . Cada una de estas curvas se ajusta a distintas funciones para determinar su polinomio característico  $2F/\overline{Sh}_d = f(M)$ .

$$\frac{2F}{\overline{Sh}_d} = f(M) \quad Ec. 49$$

Y su derivada

$$\frac{d(2F/\overline{Sh}_d)}{dM} = f'(M) \quad Ec. 50$$

El valor de la difusividad reducida ( $D_r$ ) esta dada por:

$$D_r(\overline{M}) = \frac{d}{dM} \int_{M_i}^M D_r dM = \frac{d(2F/\overline{Sh}_d)}{dM} \quad Ec. 51$$

Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular

La dependencia de la difusividad efectiva en función de la concentración es finalmente obtenida por el uso de la ecuación:

$$D_{ef} = D_r / \rho_s^2 \quad \text{Ec. 52}$$

El cálculo del coeficiente de difusión por el MRR tiene un error relativo menor al 5% (Schoeber, 1976).

## 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan y discuten los resultados obtenidos en la experimentación acerca de la caracterización física de los granos de amaranto, el análisis térmico, las cinéticas de secado, el cálculo del coeficiente de difusión efectivo y la simulación de un secador de lecho fluidizado.

### 6.1 *Propiedades Físicas*

#### 6.1.1 Número de Semillas

Se determinó experimentalmente la relación entre la masa de semillas secas y el número de semillas, esto se realizó, tomando distintas muestras de semillas las cuales iban de 100, 200, 300, 400, 500 y 1000 semillas; estas fueron secadas hasta alcanzar una masa constante, registrando los pesos finales para cada una de las muestras. Una regresión del número de semillas respecto a la masa de sólidos secos arrojó la siguiente relación experimental con un coeficiente de regresión de 0.985.

$$\text{No. de Semillas} = 1463400 * W_{ss} \text{ (kg)} \quad \text{Ec. 53}$$

#### 6.1.2 Densidad Aparente ( $\rho_s$ )

La densidad del amaranto calculada es de  $1310 \text{ kg/m}^3$ , al compara éste valor con el reportado por Caballero (1999) se encontró diferencias menores del 0.5%.

#### 6.1.3 Velocidad de Operación (aire)

La velocidad experimental mínima para mantener el secador de charola a una temperatura constante y minimizar las fluctuaciones de medición en la balanza es de 0.12 m/s. Esta velocidad minimiza las resistencias a la transferencia de masa externa ( $Bi_m > 1$ ), por lo que se puede suponer que la resistencia al transporte de masa se localiza principalmente dentro del sólido.

### 6.1.4 Humedad de las Semillas

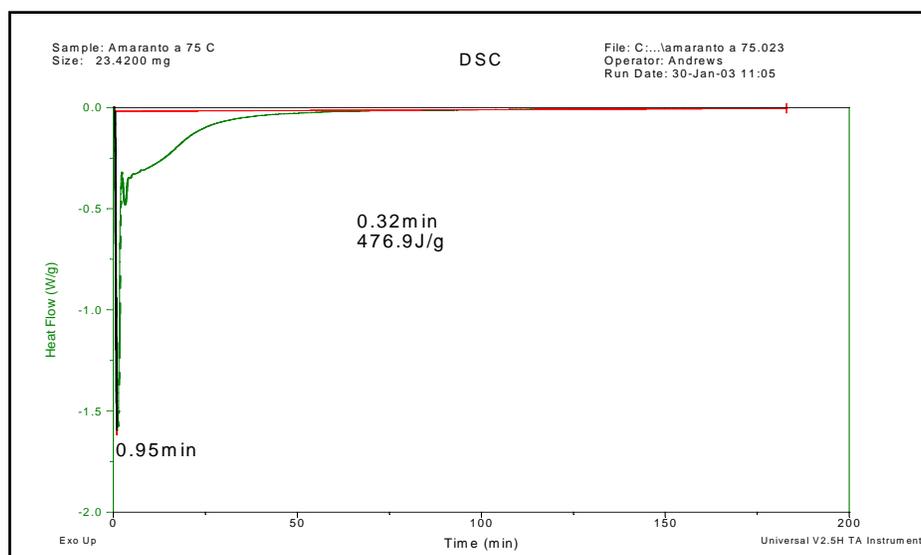
Para estimar el tiempo de humidificación necesario para un contenido de humedad deseado, se colocaron semillas secas de amaranto esparcidas en monocapa sobre charolas de aluminio dentro de un humidificador NIKKO, al 90% de humedad interna y una temperatura promedio de 301K. La relación de tiempo y humedad del grano se muestra a continuación:

Tiempo (hrs.)	Humedad absoluta
0	12 ± 1 %
6	19 ± 1 %
12	26 ± 1 %
24	30 ± 1 %

Tabla 3.- Relación del contenido final de humedad de las semillas de amaranto respecto al tiempo.

### 6.2 Análisis Diferencial de Barrido (DSC)

El estudio térmico (DSC) aplicado a las semillas de amaranto, demostró que el único proceso existente a temperaturas menores de 348 K, es la transferencia de masa, no existió evidencia que nos indicara la degradación o gelatinización de algún compuesto en la semilla de amaranto.

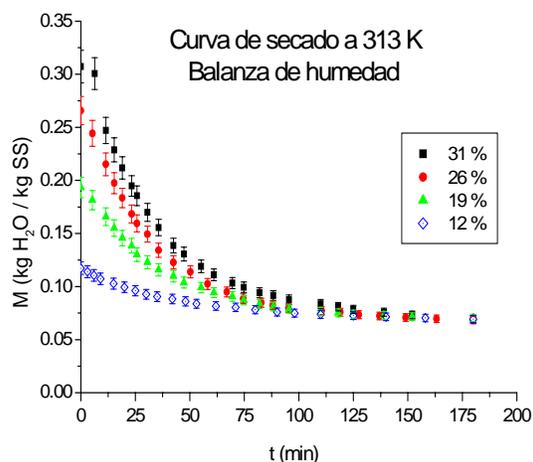


Gráfica 1.-Termograma correspondiente a la semilla de amaranto a 348K.

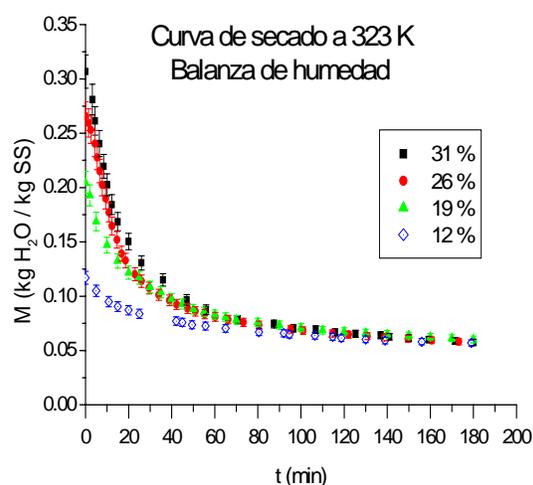
Se puede observar en la gráfica 1 un pico endotérmico a 0.95 min., causado por el rápido calentamiento de la muestra, una vez alcanzada la temperatura deseada la cantidad de calor requerida para llevar a cabo la evaporación disminuye con el tiempo, al igual que el contenido de agua dentro de la semilla. Al no encontrar otro punto de inflexión en el termograma se puede concluir que trabajar a temperaturas menores es lo más indicado para aislar el fenómeno difusivo.

### 6.3 Experimentos Preliminares (Balanza de Humedad)

Como se ha mencionado anteriormente, una de las condiciones necesarias para aplicar el MRR, es contar con varias curvas de secado isotérmico con distintos contenidos de humedad inicial. Sin embargo el intervalo de humedades iniciales puede ser muy amplio en algunos casos, para ello se llevaron a cabo una serie de experimentos preliminares, los cuales tienen como finalidad reducir el intervalo de humedades. Para ello utilizó una balanza de humedad (BH), en la cual se colocaron 10 g de amaranto esparcidos en monocapa, secados a las temperaturas de operación propuestas con un intervalo de humedades de 12, 19, 26 y 31%  $\pm 1$  de humedad inicial (tabla 3). A continuación se muestran el secado isotérmico del amaranto en la balanza de humedad a diferentes temperaturas y en el apéndice D se muestran los datos experimentales obtenidos.

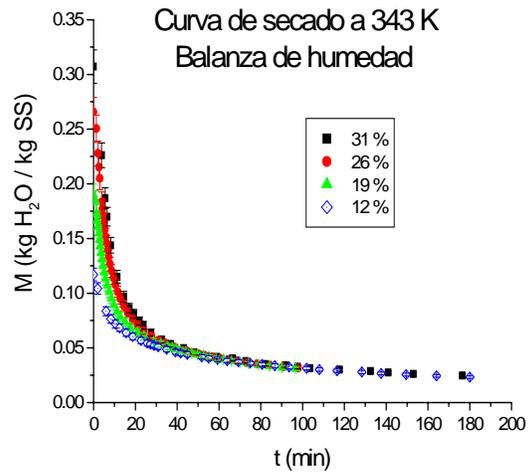
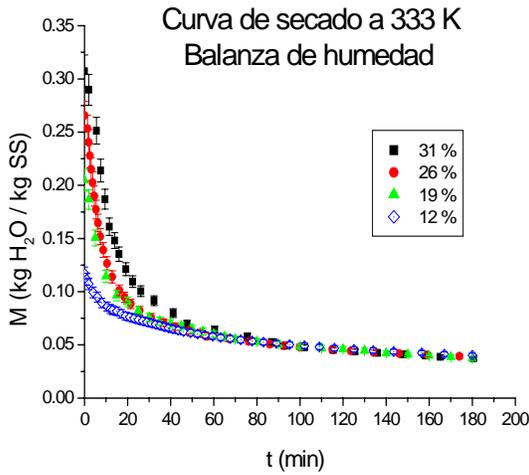


Gráfica 2.- Secado de amaranto a 313K, BH.



Gráfica 3.- Secado de amaranto a 323K, BH.

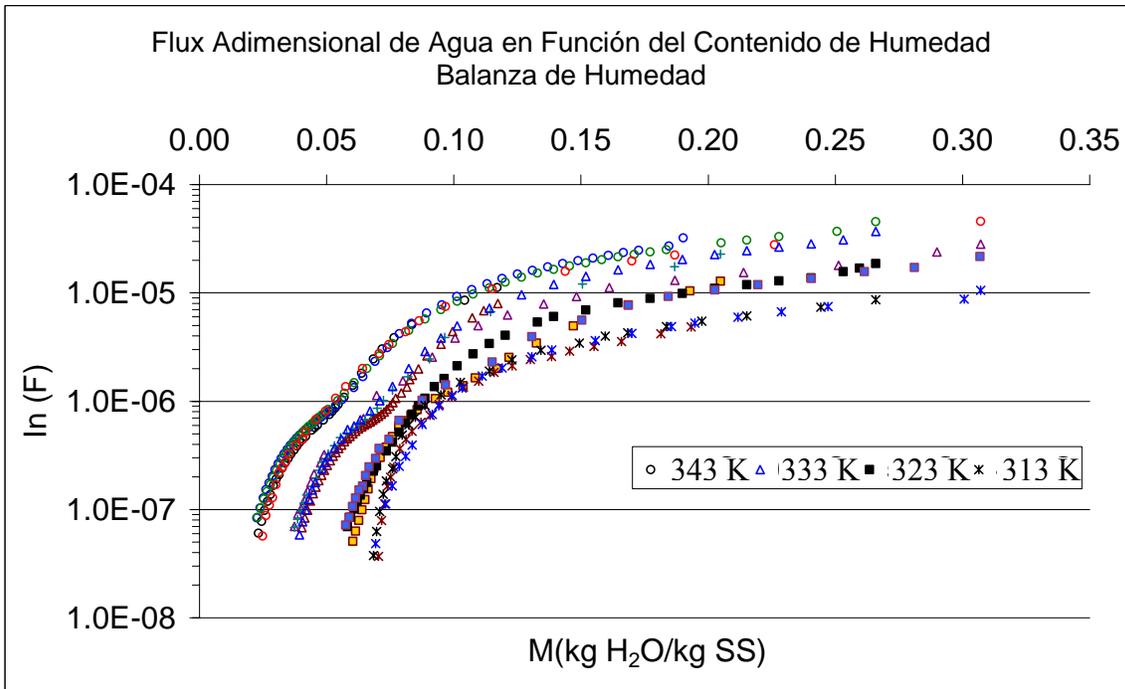
Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular



Gráfica 4.- Secado de amaranto a 333K, BA.

Gráfica 5.- Secado de amaranto a 343K, BA

Si el RR existe para la semilla de amaranto, todas las curvas de secado sin importar su contenido inicial de humedad convergirán hacia una sola curva de RR, después de un cierto intervalo de tiempo.

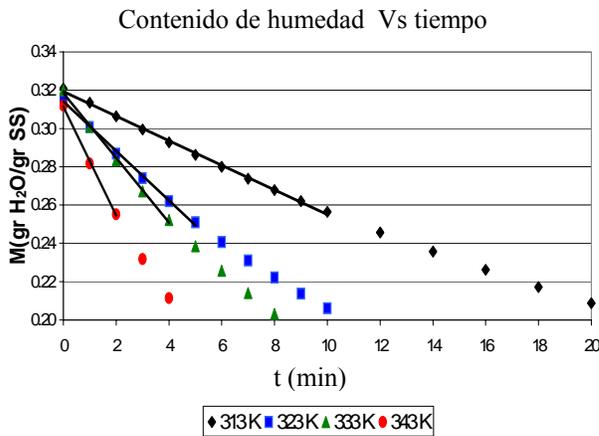


Gráfica 6.- Flux adimensional de transferencia de masa en función del contenido de humedad del amaranto para distintas temperaturas.

En la gráfica 6, se observa que todas las curvas convergen en una sola curva, llamada “curva de RR”, sin que el contenido de humedad inicial sea un parámetro de relevancia, el periodo de RR en el amaranto comienza a contenidos de humedad elevados (> 20%), lo anterior muestra que los experimentos realizados a bajos contenidos de humedad son de poca relevancia para el estudio del coeficiente de difusión, sin embargo son un requisito para poder situar el intervalo en donde se puede aplicar el MRR.

### 6.3.1 Análisis de las Curvas de Secado (BH)

Normalmente el periodo de secado a velocidad constante (PSVC) en cereales con bajo contenido de humedad no se presenta de forma natural, sin embargo, la inducción forzada de humedad en la semilla puede ocasionar la existencia de dicho periodo.

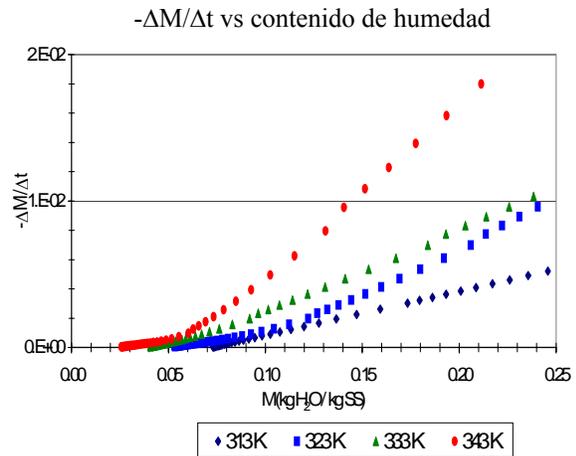


Gráfica 7.- Cálculo PSVC por el método gráfico.

Al analizar el comportamiento de la derivada (gráfica 8) se observa que los puntos de la derivada decrecen al aumentar el tiempo de secado (al disminuir el contenido de humedad), esto implica que el PSVC en la semilla de amaranto no existe. Lo anterior ha sido corroborado por Caballero (1999).

Gráfica 8.- Derivadas puntuales curva de secado (derecha).

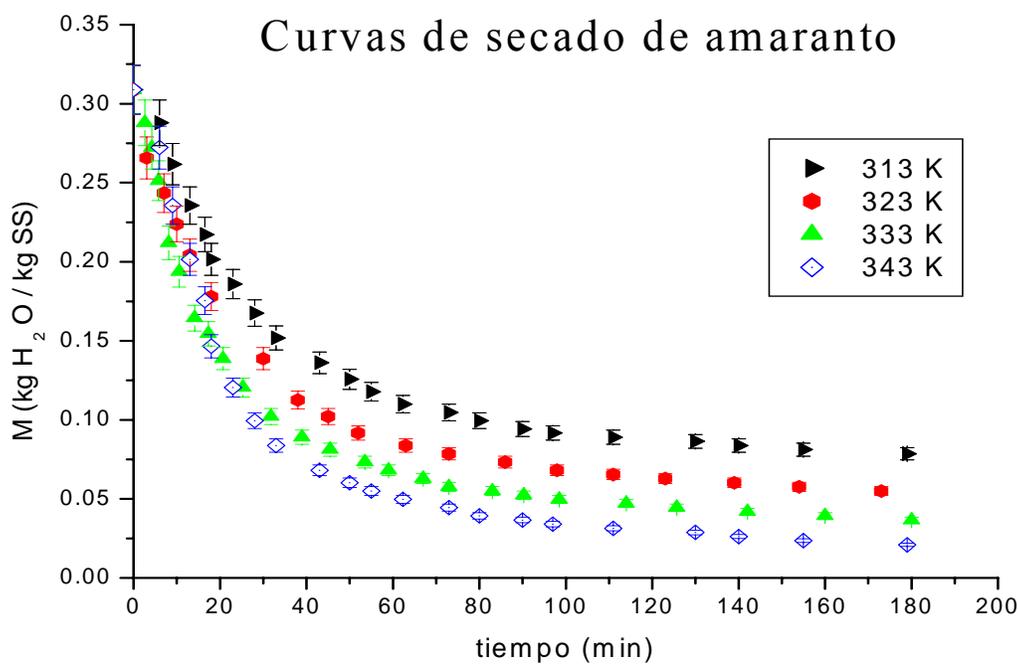
La gráfica 7, predice que a contenidos de humedad elevados (31%) existe una zona en la que podría existir el PSVC. Para verificar lo predicho por el método gráfico, se calculan las derivadas puntuales del contenido de humedad en cada intervalo de tiempo, si el PSVC existe, entonces las derivadas son constantes



### 6.3.2 Efecto de la Temperatura en las Curvas de Secado

Una de las propiedades más importantes en el secado de granos es la temperatura de operación, ya que ésta influye directamente en la velocidad de evaporación y en la calidad física y nutricional de los granos. Al trabajar a temperaturas mayores de 343 K, se observaron semillas quemadas (color negro), lo que implica que la calidad nutricional del grano disminuye, debido a lo anterior se trabajó a temperaturas menores de 343 K.

En la gráfica de secado (gráfica 9) se observa que al incrementar la temperatura, también aumenta la cantidad de humedad removida del interior del grano. Esto confirma lo que el sentido común nos dice, “al aumentar la temperatura de operación el secado se lleva a cabo más rápido, aumentando la remoción del agua del interior del grano”.

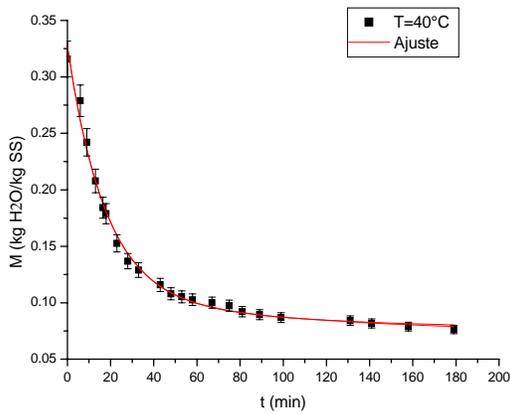


Gráfica 9.- Secado de amaranto a diferentes temperaturas,  $\bar{M} = 0.31 \text{ Kg H}_2\text{O/Kg SS}$ .

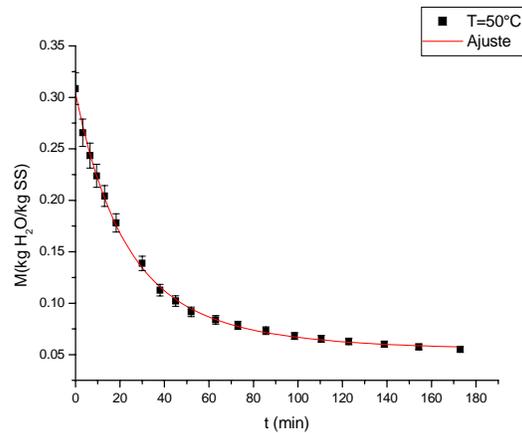
Las curvas de secado de amaranto muestran que el contenido de humedad final del grano depende directamente de la temperatura, el tiempo de secado y la humedad de equilibrio. Se alcanzó una humedad menor al 8% en un tiempo de secado de 180 minutos.

### 6.4 Efecto de la Humedad Inicial

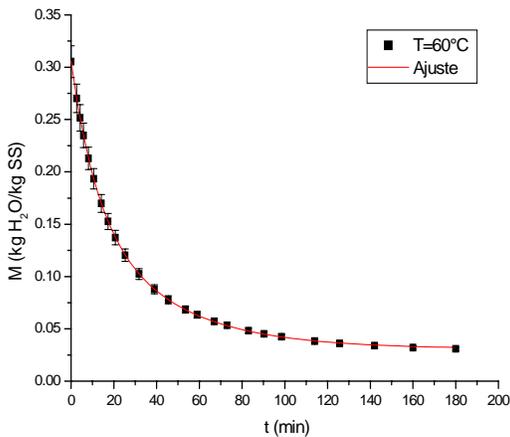
Los experimentos preliminares ayudaron a establecer que contenidos de humedad iniciales altos (> 20%) son de mayor importancia para el estudio del coeficiente de difusión, debido a que el periodo de RR comienza en rangos de humedad elevados, por lo que para realizar los experimentos en el secador de charola, se eligieron los contenidos de humedad iniciales de 26 y 30 ±1%. A continuación se muestra el comportamiento del secado isotérmico de la semilla de amaranto como función del tiempo, para un contenido inicial de humedad del 30 %; los datos experimentales se encuentran en el apéndice E.



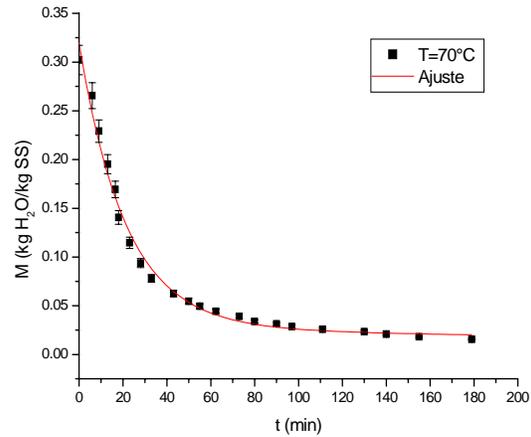
Gráfica 10.- Secado de amaranto a 315 K.



Gráfica 11.- Secado de amaranto a 323 K.



Gráfica 12.- Secado de amaranto a 333 K.



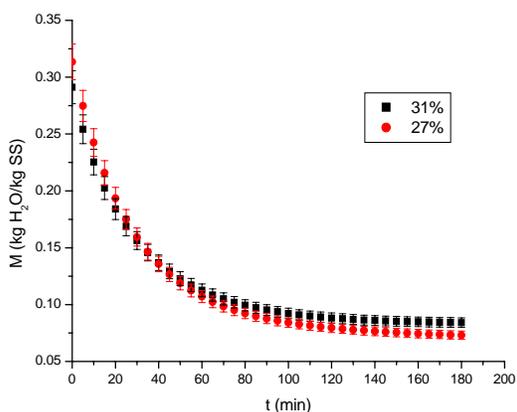
Gráfica 13.- Secado de amaranto a 343 K.

Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular

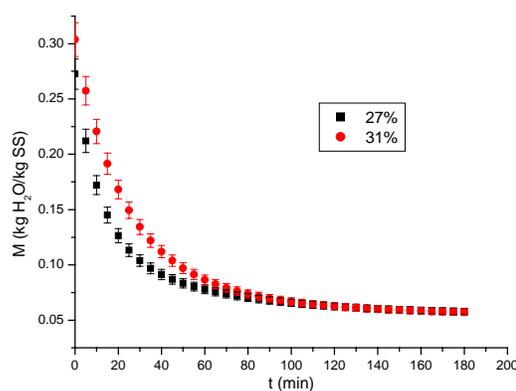
Los datos experimentales fueron ajustados a una función de tipo decaimiento exponencial, de segundo orden (Ec. 54). La finalidad de este ajuste es obtener derivadas continuas en el intervalo de estudio.

$$\bar{M} = M_{00} + A_1 \text{Exp}[-t/d_1] + A_2 \text{Exp}[-t/d_2] \quad \text{Ec. 54}$$

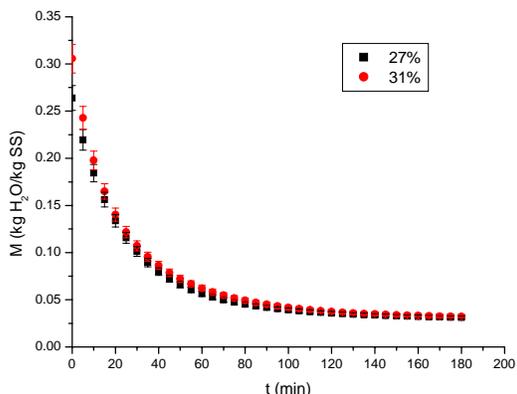
A continuación se muestra las curvas de secado isotérmico realizadas en el SC:



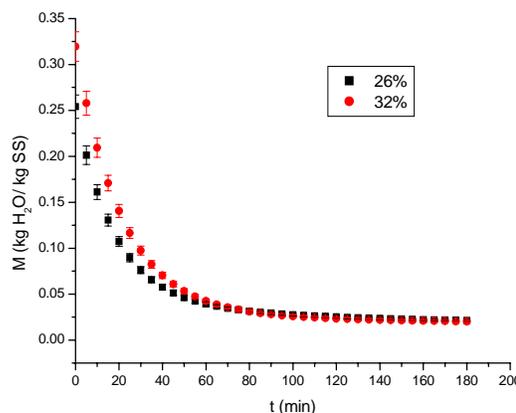
Gráfica 14.- Secado de amaranto a 315 K. a diferentes humedades iniciales.



Gráfica 15.- Secado de amaranto a 323 K. a diferentes humedades iniciales.



Gráfica 16.- Secado de amaranto a 333 K. a diferentes humedades iniciales.



Gráfica 17.- Secado de amaranto a 343 K. a diferentes humedades iniciales.

Se puede observar en las gráficas de la 14 a la 17 cómo después de un periodo de tiempo las curvas convergen, a un contenido de humedad final, esto se debe a que el proceso es

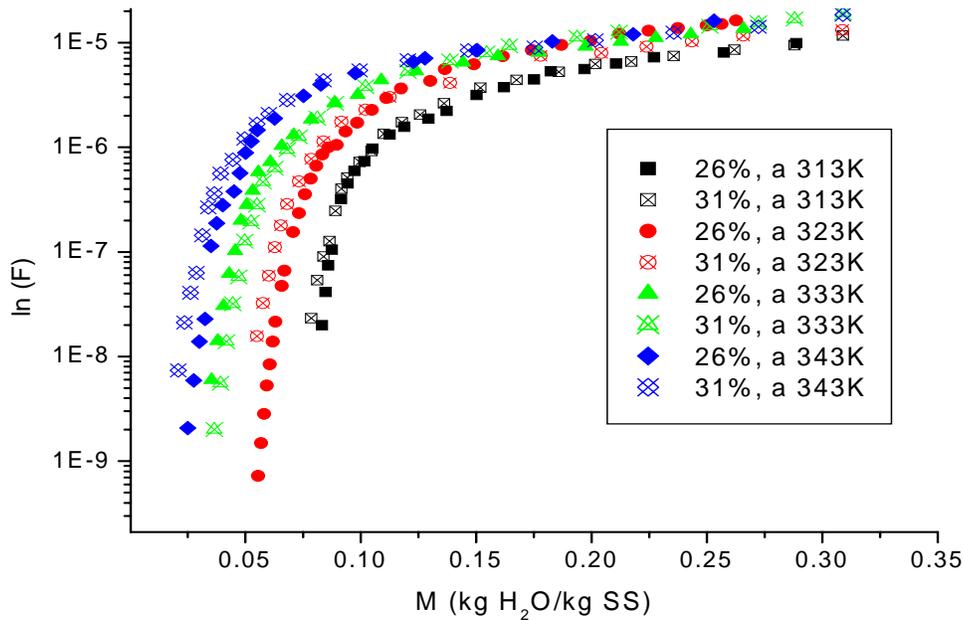
controlado por la difusión interna de las moléculas de agua a través del sólido. Las condiciones finales del secado son determinadas por el equilibrio entre el material que se está secando y el gas que acarrea la humedad fuera del secador. La manera en que se comportan las curvas de secado nos hacen pensar que el RR podría existir en la semilla de amaranto. Los datos experimentales se muestran en el apéndice E.

### 6.5 Flux de Masa

El flux adimensional de transferencia de masa (F) es el parámetro que indica la velocidad de transferencia de agua por unidad de área (Ec. 41). Para determinar como cambia el flux de masa se necesita conocer como cambia la humedad respecto al tiempo ( $-d\bar{M}/dt$ ), diferenciando la ecuación 54 respecto al tiempo.

$$-\frac{d\bar{M}}{dt} = -\frac{A_1}{d_1} \text{Exp}[-t/d_1] - \frac{A_2}{d_2} \text{Exp}[-t/d_2] \tag{Ec. 55}$$

Como se menciono anteriormente, si existe el RR en el amaranto, todas las curvas de secado sin importar su contenido inicial de humedad convergirán hacia una sola curva, después de un cierto intervalo de tiempo.



Gráfica 18.- Flux adimensional de agua en función del contenido de humedad, a diferentes temperaturas.

En éste punto se puede ubicar el contenido de humedad crítico y la transferencia de masa está gobernada por procesos difusivos en el sólido. En la gráfica 18, se observa que las curvas isotérmicas convergen en una sola curva de RR, la cual es específica del amaranto y la temperatura, pero independiente del contenido inicial de humedad. El RR existe en todo el rango de humedad estudiado, esto se puede deber a la baja humedad que presenta la semilla de amaranto. El periodo de RR para éste trabajo de investigación se situará a partir de 0.22 kg de H<sub>2</sub>O /kg de SS, debido a el periodo de inducción del secado, el cual se presenta al comienzo del secado y tiene una duración aproximada de 5 minutos.

## **6.6 Cálculo del Coeficiente de Difusión como Función de T y M**

A partir de las curvas experimentales y con el procedimiento descrito en la figura 6, se calcula la dependencia del coeficiente de difusión respecto a la concentración, a condiciones de operación isotérmicas, para las temperaturas de estudio (313, 323, 333 y 343 K). Esta dependencia puede ser descrita por diferentes funciones, de manera: exponencial, logarítmica, ley de potencia, polinomial, lineal, etc, sin embargo la mayoría de estas funciones no describen satisfactoriamente los valores experimentales. Analizando el comportamiento de estas funciones aplicadas al MRR, se observo que el modelo de ley de potencia describía mejor los valores del coeficiente de difusión.

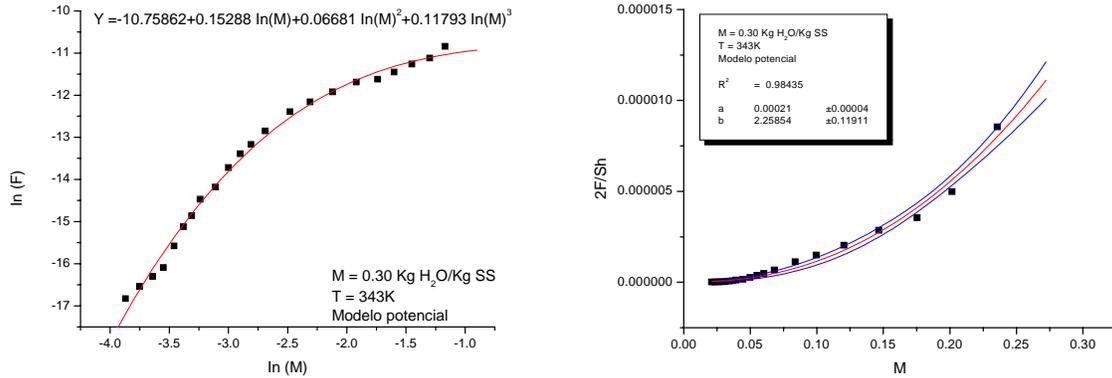
### **6.6.1 Ley de Potencia**

La dependencia potencial del coeficiente de difusión efectivo está dada por la siguiente relación:

$$\overline{D}_{ef} (\overline{M})_T = C * \overline{M}^{-D} \quad \text{Ec. 56}$$

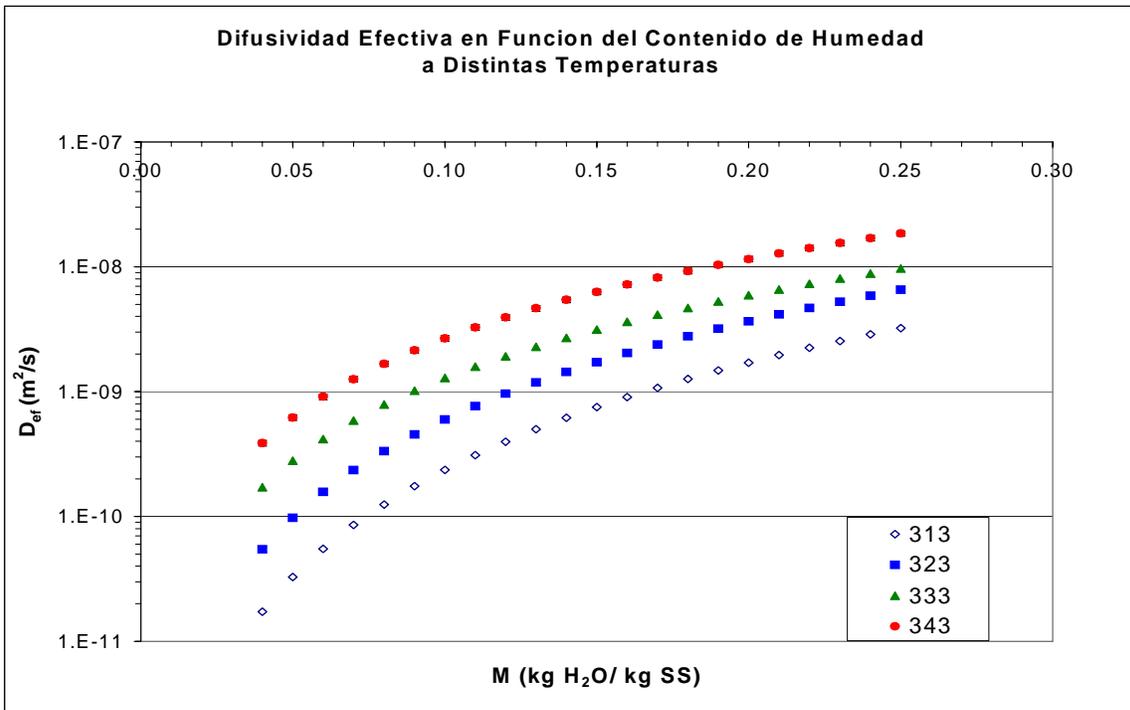
Utilizando el procedimiento descrito en la figura 6 y a partir de los datos experimentales (apéndice E), se realizan los cálculos pertinentes para determinar la variación del coeficiente de difusión a condiciones isotérmicas. Las regresiones efectuadas al parámetro flux (F) fueron realizadas con un polinomio de tercer orden y para el parámetro (2F/Sh), con una función de ley de potencia. A continuación se muestran los resultados obtenidos para una temperatura de 343K.

**Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular**



Gráfica 19.- Regresiones de los parámetros F y 2F/Sh para el modelo potencial, T = 343 K, M = 0.3

Los resultados obtenidos al aplicar el MRR para el modelo potencial demostraron que el coeficiente de difusión depende del contenido de humedad y la temperatura; en la gráfica 20 se puede observar que un aumento en la temperatura de operación, ocasiona que la  $D_{ef}$  aumente, esto se puede relacionar con el aumento de energía cinética de las moléculas de agua dentro del sólido, así la velocidad con que las moléculas de agua atraviesan el sólido es mayor que a temperaturas menores, por ende la  $D_{ef}$  es función de la temperatura.

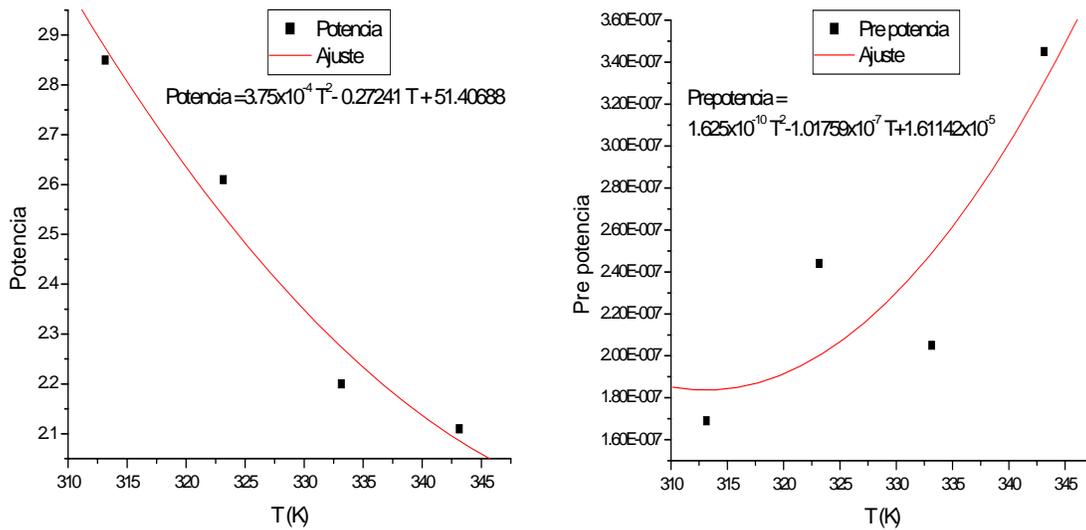


Gráfica 20.- Difusividad efectiva como función del contenido de humedad y la temperatura.

Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular

Los valores del  $D_{ef}$  varían entre  $1 \times 10^{-8}$  a  $1 \times 10^{-11}$   $m^2/s$ , esta variación es importante ya que involucra un cambio de 3 ordenes de magnitud, por lo que no tomarlo en cuenta puede ocasionar un fuerte impacto en la predicción de las cinéticas de secado.

Hasta este momento, se tiene una función que nos relaciona a la  $D_{ef}$  con el contenido de humedad a condiciones isotérmicas, sin embargo una ecuación que describa la variación de la  $D_{ef}$  como una función del contenido de humedad y la temperatura sería de mayor utilidad para nuestros fines. Con este fin, se ajustan los parámetros del coeficiente de difusión para cada temperatura, a una función que describa su comportamiento.



Gráfica 21.- Ajustes del orden de potencia y ordenada al origen respecto a la temperatura.

Con estos ajustes se generaliza la ecuación del coeficiente de difusión obteniendo la siguiente expresión:

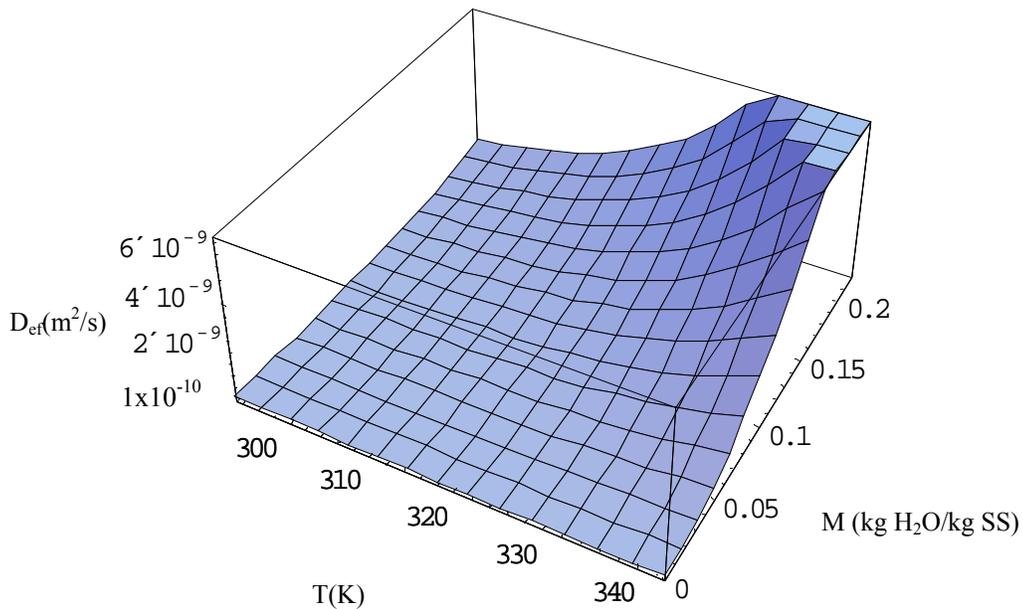
$$D_{ef}(\bar{M}, T) = a(T) \times \bar{M}^{b(T)} \tag{Ec. 57}$$

Donde los parámetros de la Ec. 57 (a y b) están dados por las siguientes relaciones donde la temperatura (T) esta dada en K:

$$a(T) = 1.625 \times 10^{-10} T^2 - 1.01759 \times 10^{-7} T + 1.61142 \times 10^{-6} \tag{Ec. 58}$$

$$b(T) = 3.75 \times 10^{-4} T^2 - 0.27241 T + 51.4068 \quad \text{Ec. 59}$$

Para mostrar el comportamiento del  $D_{ef}$  en función de la temperatura y el contenido de humedad, se realiza una gráfica de respuesta (gráfica 22), esta muestra que a temperaturas elevadas ( $T \sim 343\text{K}$ ) la  $D_{ef}$  presenta su valor más elevado difundiéndose más rápido las moléculas de agua a través del grano, mientras que los valores de  $D_{ef}$  más pequeños se presentan a temperaturas bajas, en el mismo sentido se comporta el coeficiente, dependiendo del contenido de humedad.

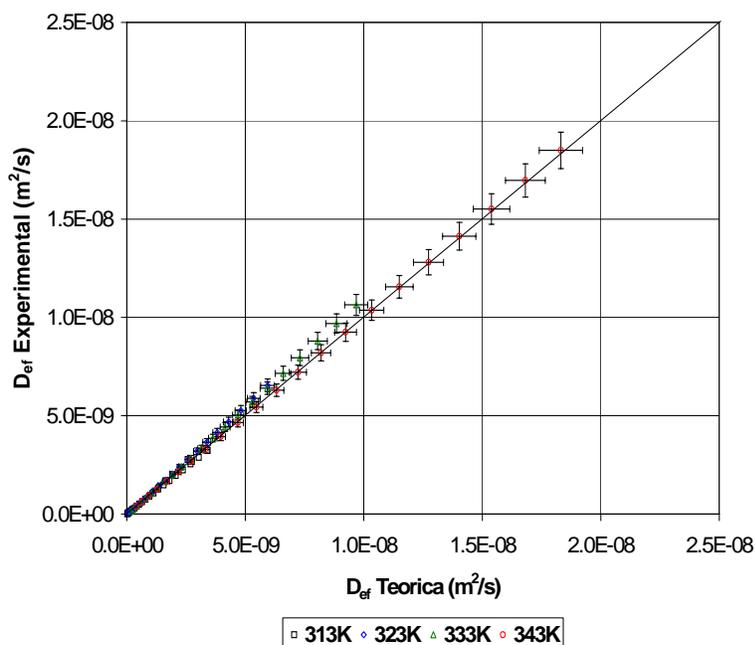


Gráfica 22.- Representación en 3D del  $D_{ef}$  como una función potencial.

La gráfica 23, muestra la bondad del modelo de difusión propuesto ( $D_{ef}$  Teórica (Ec. 57) Vs  $D_{ef}$  Experimental); en esta gráfica se observa un buen ajuste de los datos experimentales.

Esta expresión es válida en un dominio de temperaturas de 288 a 343 K y contenidos de humedad menores a 22% en base seca.

Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular



Gráfica 23.- Bondad de ajuste  $D_{ef}$  modelo potencial.

### 6.7 Energía de Activación

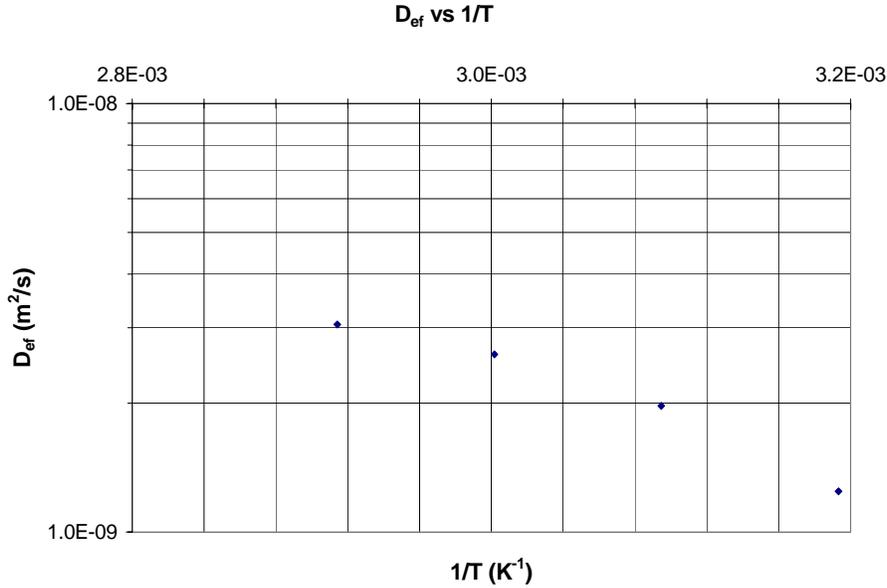
La energía de activación ( $E_D$ ) se puede definir como: la energía mínima que deben poseer las moléculas de agua para su eliminación de la matriz porosa. Esta funcionalidad comúnmente es expresada por una función de tipo Arrhenius (Ec. 60).

$$D = D_{\infty} \ell^{(E_D/RT)} \quad \text{Ec. 60}$$

Donde la  $D_{\infty}$  (coeficiente de difusión en el límite  $T \rightarrow \infty$ ) y  $E_D$  (energía de activación de difusión); la energía de activación se determina experimentalmente efectuando el secado isotérmico a varias temperaturas, para después aplicar logaritmo natural a la Ec. 60; los cálculos de la difusividad efectiva promedio a distintas temperaturas se muestran en el apéndice F.

La dependencia del coeficiente de difusión se muestra en la siguiente gráfica, ésta variación es representada por la siguiente relación, ( $R^2=0.9870$ ):

$$D(T) = 8.87 \times 10^{-5} \ell \left[ \frac{-3484}{T} \right] \quad \text{Ec. 61}$$



Gráfica 24.- Determinación de la energía de activación de difusión.

La temperatura de activación es independiente del coeficiente de difusión, por lo que es característica del sistema a secar. Cuanto mayor es la energía de activación, más sensible a la temperatura es la velocidad de secado.

## 6.8 Simulación

La simulación de procesos químicos está naturalmente vinculada al cálculo de los balances de materia, energía y momentum; de un proceso cuya estructura, junto con los datos preliminares de los equipos que componen el proceso son conocidos.

Para llevar a cabo la simulación del proceso de secado en un lecho fluidizado se utilizaron los modelos homogéneo y heterogéneo descritos anteriormente en el apartado 2.3, los programas necesarios para llevar a cabo la simulación se realizan en Visual Fortran 6.6 y se encuentran descritos en el apéndice G. Los valores de los distintos parámetros necesarios para la simulación se encuentran en la tabla 1 del capítulo 2.

Con la finalidad de probar la efectividad del modelo de difusión propuesto en este trabajo se emplearon los datos experimentales reportados por Caballero (1999), del comportamiento del secado de amaranto en un lecho fluidizado a condiciones de 2.2 veces la velocidad mínima de fluidización ( $2.2U_{mf}$ ), a 313, 323, 333 y 343 K.

### 6.8.1 Efecto del Coeficiente de Difusión Efectivo

Como se mencionó anteriormente la  $D_{ef}$  puede ser descrita por diferentes funciones, sin embargo no todas ellas describen satisfactoriamente los parámetros experimentales, así como la cinética del proceso de secado. Esto crea la necesidad de corroborar la funcionalidad de los modelos matemáticos propuestos, para lo que se emplea la simulación de procesos químicos. Si el modelo de difusión propuesto es el correcto, éste describirá satisfactoriamente los datos experimentales, de lo contrario probablemente el modelo propuesto no es el adecuado para la descripción del proceso.

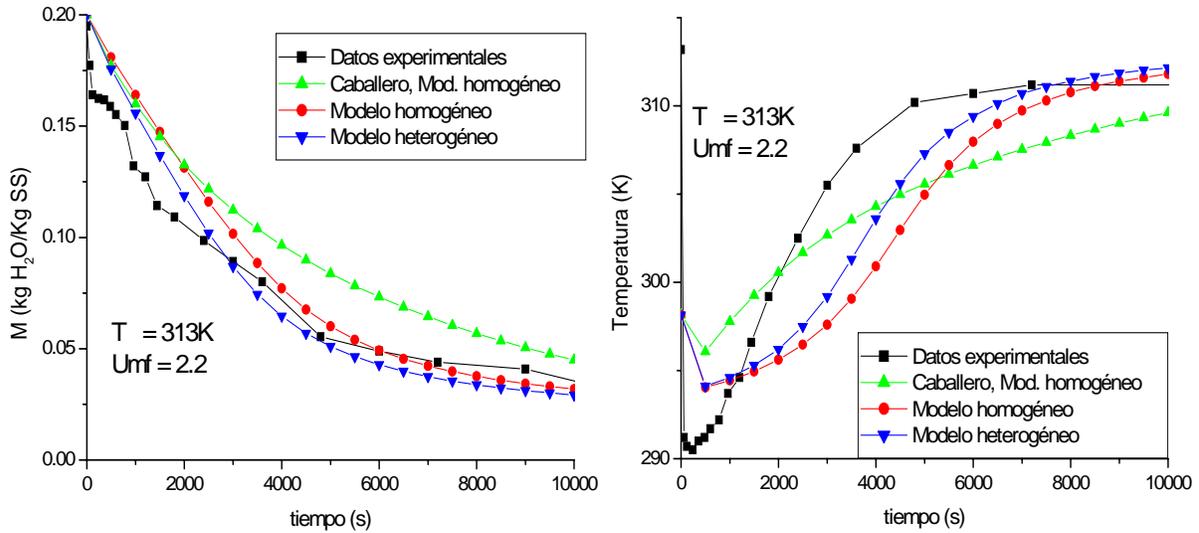
Las simulaciones son realizadas con los modelos homogéneo y heterogéneo empleando la correlación propuesta en éste trabajo de investigación en donde el coeficiente de difusión efectivo es función del contenido de humedad y la temperatura  $\bar{D}_{ef}(\bar{M}, T)$ , se compara con el coeficiente de difusión efectivo propuesto por Caballero (1999), como una función de la temperatura  $\bar{D}_{ef}(T)$ , así como los datos experimentales obtenidos por Caballero para el secado de amaranto en un lecho fluidizado. La ecuación de difusión propuesta por Caballero, (1999) es un modelo tipo Arrhenius y esta dado por la siguiente ecuación:

$$D(T) = 8.245 \times 10^{-8} \ell^{[-2830.5/T]} \quad \text{Ec. 62}$$

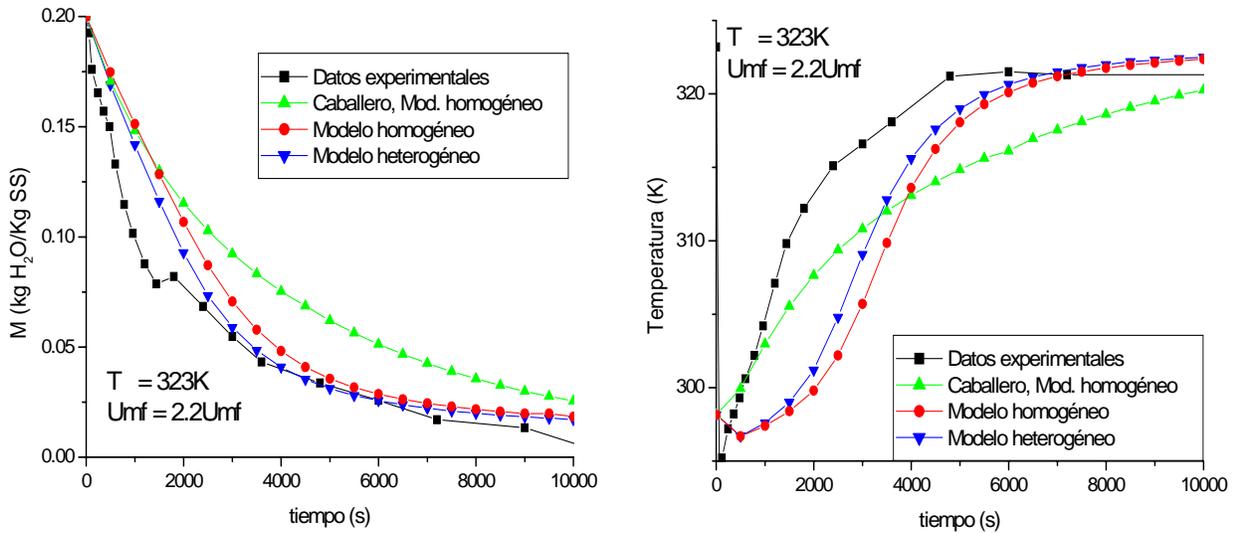
En su trabajo de maestría Caballero expone que el modelo que mejor reproduce los datos experimentales mediante la simulación del secado de amaranto en un lecho fluidizado, es el modelo homogéneo por lo que éste será utilizado para representar las cinéticas de secado de dicho autor.

### 6.8.2 Predicción del Secado en un Lecho Fluidizado

La finalidad de estas simulaciones es predecir el comportamiento del secado de amaranto en un lecho a fluidización burbujeante, no isotérmico en operación por lotes, observando el efecto del coeficiente de difusión efectivo ( $\bar{D}_{ef}(\bar{M}, T)$  Vs.  $\bar{D}_{ef}(T)$ ) y comparar el comportamiento de los modelos homogéneo y heterogéneo para el secado de amaranto.

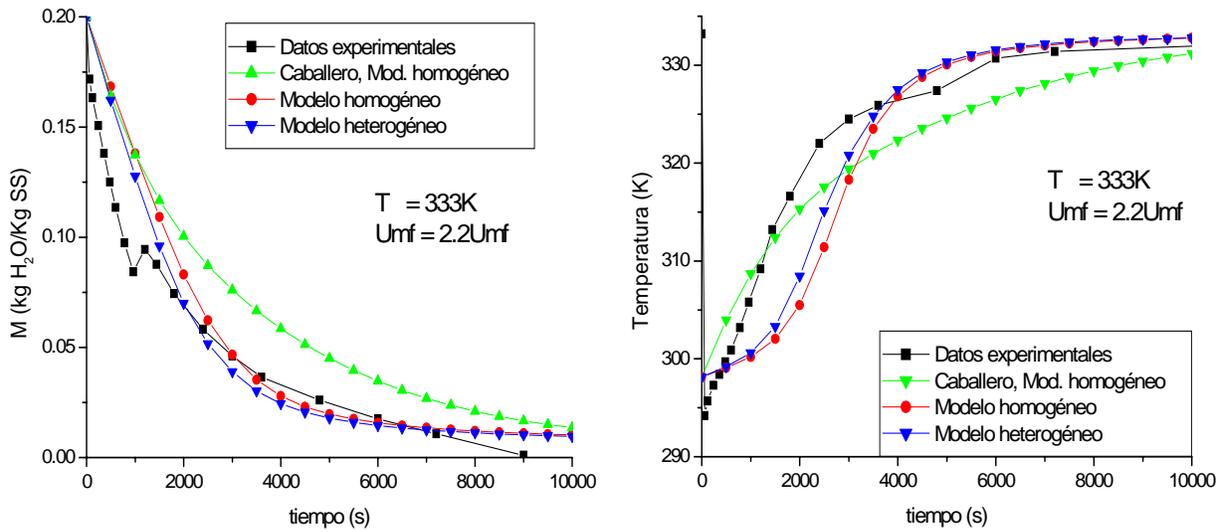


Gráfica 25.- Simulación del secado de amaranto a 313 K y 2.2 Umf.

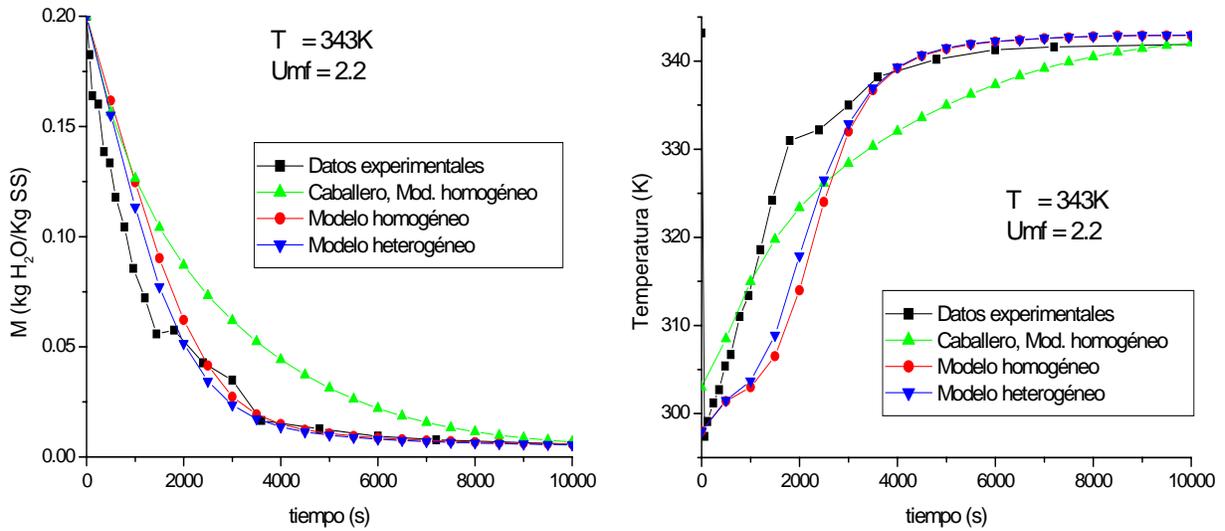


Gráfica 26.- Simulación del secado de amaranto a 323 K y 2.2 Umf.

Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular



Gráfica 27.- Simulación del secado de amaranto a 333 K y 2.2 Umf



Gráfica 28.- Simulación del secado de amaranto a 343 K y 2.2 Umf

Las gráficas 25 a la 28 presentan las simulaciones realizadas con ambos modelos empleando la correlación propuesta en éste trabajo de investigación ( $\bar{D}_{ef}(\bar{M}, T)$ ), la ecuación propuesta por Caballero ( $\bar{D}_{ef}(T)$ ), así como los datos experimentales del secado de amaranto en un lecho fluidizado.

Los resultados obtenidos en la simulación muestran que la difusividad efectiva como una función potencial del contenido de humedad y la temperatura ( $\bar{D}_{ef}(\bar{M}, T)$ ), ajustan mejor los datos experimentales, que los predichos por la función exponencial de Caballero (1999) ( $\bar{D}_{ef}(T)$ ).

La comparación hecha entre el modelo homogéneo y el modelo heterogéneo muestra que este último predice mejor los valores experimentales del secado en un lecho fluidizado, tanto en el contenido de humedad como en la temperatura. Se puede observar que al aumentar la temperatura de operación en el SLF, las predicciones de los modelos heterogéneo y homogéneo con la dependencia del  $\bar{D}_{ef}(\bar{M}, T)$ , se aproximan más a los valores experimentales.

Con lo dicho anteriormente podemos decir que el coeficiente de difusión es un parámetro que influye fuertemente en la predicción de los valores experimentales y la clave se encuentra en la dependencia de éste con el contenido de humedad y la temperatura. Si embargo no cualquier dependencia del coeficiente de difusión es correcta, por lo que es recomendable siempre validar el modelo propuesto con los datos experimentales.

## 7 CONCLUSIONES

1. Las curvas de secado muestran un comportamiento de velocidad de secado decreciente; éste comportamiento se ha observado en otros cereales como el arroz, maíz y trigo.
2. El análisis diferencial de barrido muestra que no existieron procesos de degradación de proteínas y gelación de las amilopectinas a temperaturas menores de 348K. Por lo que el único proceso existente es el de difusión de la humedad libre a través del sólido.
3. El régimen regular en la semilla de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*) existe; éste es específico para cada material y su ubicación en el diagrama de  $\ln F$  vs  $\ln (\bar{M})$  depende de la temperatura de operación y la humedad al equilibrio. El régimen regular de la semilla de amaranto se encuentra en contenidos de humedad menores de 0.22 kg de H<sub>2</sub>O/kg de SS.
4. El periodo de penetración es el que precede al régimen regular, éste tiene lugar dentro del periodo de inducción. Lo anterior se debe a que el amaranto presenta bajos contenidos de humedad, por lo que el único mecanismo de transporte de importancia es el difusivo.
5. El método de régimen regular ofrece un procedimiento relativamente sencillo para determinar el coeficiente de difusión efectivo a partir de datos experimentales, como función del contenido de humedad, la geometría y la temperatura, el cual es independiente del contenido inicial de humedad.
6. El modelo ley de potencia describe mejor los datos experimentales del coeficiente de difusión del amaranto en función de la concentración y la temperatura, que un modelo de tipo exponencial.

7. Los resultados de la simulación corroboran lo anterior siendo el modelo de ley de potencia del coeficiente de difusión el que describe mejor el comportamiento de un secador de lecho fluidizado de amaranto.
8. El mejor modelo de predicción de las cinéticas de secado es el modelo heterogéneo de Zahed, sin embargo la precisión en éste modelo acarrea el costo de un modelo más riguroso y complejo. La diferencia que presentan los resultados del modelo heterogéneo contra el modelo homogéneo es muy pequeña, por lo que utilizar el modelo homogéneo no implica un error significativo.
9. El coeficiente de difusión efectivo es un parámetro sumamente importante en la predicción de cinéticas de secado, por lo que su determinación requiere de gran cuidado.
10. La mayoría de los datos existentes en la literatura han sido obtenidos por métodos experimentales simples los cuales en su mayoría no consideran la variación del coeficiente de difusión respecto al contenido de humedad y/o la temperatura. Esto crea la necesidad de determinar y cuantificar cómo varía el coeficiente de difusión respecto a alguna de estas variables para diferentes sistemas alimenticios.

## 8 BIBLIOGRAFÍA.

1. Avanza, M.V. y Añón M.C., 2001, “Propiedades Funcionales de Proteínas de Amaranto Capacidad de Gelificación”, Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA) - UNLP-CONICET. 47 y 116 - La Plata - Buenos Aires - Argentina.
2. Báez, J.G., 2001, “Estudio del Proceso Difusivo Durante el Secado Isotérmico para la Selección Adecuada de los Materiales de Pared para la Microencapsulación”, Tesis de Maestría, UAM.
3. Becerra, R., 2002, “El Amaranto: Nuevas Tecnologías para un Antiguo Cultivo”, Biodiversitas, No. 30.
4. Bressani, R. y Benavides, V. 1990, “Nutritive value of Wheat and Amaranth Flour Mixtures”, Amaranth Newsl., 4, 14.
5. Brooker, D. y Bakker, A., 1974, Drying Cereals Grains, The Avi Publishing Company, USA, 185-221.
6. Caballero, F. V., 1999, “Secado de Amaranto: Simulación y Modelado en Lechos Fluidizados”, Tesis de Maestría, UAM.
7. Coumans, W.J. , 1987, “Power Law Diffusion in Drying Processes”, Ph. D. Thesis, Eindhoven, Netherlands.
8. Datta, A.K. and Zhang, J., 2001, “Porous Media Approach to Heat and Mass Transfer in Solid Foods”, Department of Agric. and Biol. Engineering, Cornell University.

9. Dincer, I. Y Dost, S., 1995, "An Analytical \_Model for Moisture Diffusion in Solid Objects During Drying", Drying Technology, 13 (1&2), Pág. 425-435.
10. Ferrante, M.A., 1996, "The art of drying", Chilton's Food Engineering, Vol. 68, No. 4 Pág. 103.
11. Hong, Y.C., Bakshi, A.S. And Labuza, T.P., 1986, Finite Element Modeling of Moisture Transfer During Storage of Mixed Multicomponent Dried Foods", Journal of Food Science, Vol. 51, No. 3, Pág. 555.
12. Huai, X., Liu, D. and Wang, G.X., 2001, "Heat And Mass Transfer Analysis In Laser Drying", Proceedings of NHTC'01, 35th National Heat Transfer Conference, Anaheim, California.
13. Hughes, L., 2001, "There's More to Whole Grains Than Whole Wheat", Environmental Nutrition, Vol. 24 I-10 Pág. 2
14. Kiefer, P. J., 1941, "The Thermodynamic Properties of Water and Water Vapor", Montly Weather Report, 69(1), 329-341.
15. Kigel, J., 1994, "Development and Ecophysiology of Amaranths", Amaranth Biology, Chemistry, and Technology, Octavio Paredes-López, Capítulo 4, Pág. 41- 64.
16. Kirk – Othmer, 1965, "Encyclopedia of Chemical Technology", Editorial Board, Segunda Edición, Vol. 7, Pág. 329-378.
17. Kroes, B., Coumans, W.J., Kerkhof, J.A.M., 1996, "Drying Behavior of Deformable Porous Media: A Mechanistic Approach to Clay Drying", Drying '96, Edit. A.S. Mujumdar, Vol. A, Pág. 156.

18. Labuza, T.P., and Hyman C.R., 1999, "Moisture Migration and Control in Multi-Domain Foods", Department of Food Science and Nutrition, University of Minnesota.
19. Liu, J.Y., Simpson, W.T. y Verrill S.P., 1997, "An Inverse Moisture Diffusion Algorithm For The Determination Of Diffusion Coefficient", USDA Forest Service, Forest Products Laboratory.
20. Lobo, R., 1997, "Principios de Transferencia de Masa ", UAM, Pág. 68-69.
21. Lui Tong y Coumans W.J., 1996, "Approximate Solutions of Diffusion Equations With Non-Zero and Time Dependent Boundary Concentration", Drying '96, Edit. A.S. Mujumdar, Vol. A, Pág. 167.
22. Luyben, K.Ch.A.M., Oliman J.J. and Bruin, S. 1980, "Concentration Dependent Diffusion Coefficients Derived From Experimental Drying Curves," in Drying '80, Mujumdar A.S., Hemisphere Pub., New York pp. 233-243.
23. Martinez E. N., Añon M. C., 1997, "Composition and Structural Characterization of Amaranth Protein Isolates, An Electrophoretic and Calorimetric Study", J. Agric. Food Chem. 44, Pág. 2523-2530.
24. Perez, C., 2000, "Estudio del Proceso de Secado de Trigo en un Sistema de Lecho Vibrofluidizado", Tesis de Maestría, UAM.
25. Perry, R.H., Green, D.W., Maloney, J.O., 1992, "Perry Manual del Ingeniero Químico", Sexta edición, Edit. McGraw-Hill, Sec. 20.
26. Plumb, O.A., Gu, L. y Webb, S.W., 1999, "Drying of Porous Materials at Low Moisture Content", Drying Technology, 17(10), Pág. 1999-2011.

27. Sauer, J. D. 1950, "The Grain Amaranths: a Survey of Their History and Classification", *Ann. Mo. Bo. Gard.*, 37, 561.
28. Saunder, R. M. y Becker, R., 1984, "Amaranthus: A Potential Food and Feed Resource", in *Advances in Cereal Science and Technology*, Pomeranz, Y. Ed., American Association of Cereal Chemist, St. Paul, MN, Capítulo 6.
29. Schoeber, W.J.A.H., 1976, "Calculation of Drying Rates and Determination of Concentration Dependent Diffusion Coefficients, Ph. D. Thesis, Eindhoven, Netherlands.
30. Sit, S. y Grace, J., 1981, "Effect of Bubble interaction on Interphase Mass Transfer in Gas Fluidized Beds", *Chem. Eng. Sci.*, 36, 327-334.
31. Tosi, E. A. Y Ré, E. D., 1999, "Amaranth Grain Drying in a Fluidized Bed", *Drying Technology*, 17(4&5), 909-914 (1999).
32. Tovar, L. R., Valdavia, M. A. y Brito, E., 1994, "Popping Amaranth Grain, State of the Art", *Amaranth Biology, Chemistry, and Technology*, Octavio Paredes-López, Capítulo 8, Pág. 143- 153.
33. Treybal, R. "Operaciones de Transferencia de Masa" 2002, Segunda Edición, Edit. McGraw-Hill.
34. Vizcarra, M., Martinez, C. Caballero, F., 2003, "Termal and Moisture Difusión Propierties of Amaranth Seeds", *Biosystems Engineering*, Vol. 86, Issue 4, Dic. 2003, Pág. 441-446.

35. Yamamoto, S., 2001, "A Short-cut Method for Determining Concentration Dependent Diffusivity in Liquid Foods and Polymer Solutions From Regular Regime Drying Curves", *Drying Technology*, 19(7), Pág. 1479-1490.
36. Zahed, A. y Epstein, N., 1992, "Batch and Continuous Spouted Bed Drying of Cereal Grains: The Thermal Equilibrium Model", *Can. J. Chem. Eng.*, 70,945-953.
37. Zahed, A. H., Zhu, J. X. y Grace, J. R., 1995, "Modeling and Simulation of Batch and Continuous Fluidized Bed Dryers", *Drying Technology*, 13(1&2), 1-28 (1995).
38. Zill, D.G., 1988, "Ecuaciones diferenciales con Aplicaciones", 2ª. Edición, Grupo Editorial Iberoamérica, Pág. 395 – 464.
39. Zogzas, N.P., Maroulis, Z.B., 1996, "Effective Moisture Diffusivity Estimation from Drying Data. A Comparison Between Various Methods of Analysis", *Drying Technology*, 14(7&8), Pág. 1543-1573.

## 9 NOMENCLATURA

$A_g$	Área de transferencia. ( $m^2$ ).
$A_i$	Constantes de ajuste de la función decaimiento exponencial, $i=1,2$ .
$a_w$	Actividad de agua, (adimensional).
$Bi_m$	Número de Biot de transferencia de masa (adimensional).
$C_A$	Capacidad calorífica del gas seco ( $J / kg K$ ).
$C_B$	Capacidad calorífica de la partícula seca, ( $J / kg K$ ).
$C_V$	Capacidad calorífica del vapor de agua, ( $J / kg K$ ).
$C_W$	Capacidad calorífica del agua líquida, ( $J / kg K$ ).
$D$	Coeficiente de difusión molecular, ( $m^2 / s$ ).
$D_\infty$	Coeficiente de difusión en el límite $T \rightarrow \infty$ .
$d_b$	Diámetro de la burbuja (m).
$d_b$	Diámetro de burbuja, (m).
$D_{ef}$	Coeficiente de difusión efectivo ( $m^2/s$ ).
$d_i$	Constantes de ajuste de la función decaimiento exponencial, $i=1,2$ .
$d_l$	Diámetro del lecho, (m).
$D_r$	Coeficiente de difusión reducido.
$E_D$	Energía de activación de difusión, ( $J/kg\text{-mol}$ ).
$F$	Flux adimensional.
$g$	Aceleración debida a la gravedad, ( $m^2/s$ ).
$G$	Tasa de flujo de aire, ( $kg/m^2 s$ ).
$G_b$	Flujo volumétrico de la fase burbuja por volumen de lecho (1/s).
$G_d$	Flujo volumétrico de la fase densa por volumen de lecho (1/s).
$J_{w,i}$	Flux relativo a la interfase.
$K_c$	Coeficiente de transferencia de masa a través de las burbujas (m/s).
$L_{mf}$	Altura de mínima fluidización (m).
$M$	Porcentaje del contenido de humedad ( $kg H_2O/ g\text{-sólido}$ ).
$\bar{M}$	Contenido de humedad promedio ( $kg H_2O/ g\text{-sólido}$ ).
$m$	Velocidad de evaporación de agua por unidad de volumen SLF ( $kg/m^3s$ ).

Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular

$m_A$	Flujo másico de aire seco (kg/s).
$m_B$	Cantidad de granos dentro del lecho (kg).
$M_i$	Contenido de humedad en equilibrio con la fase gaseosa.
$M_o$	Constantes de ajuste de la función decaimiento exponencial.
$P$	Presión total, (Pa).
$PP$	Periodo de penetración.
$P_V$	Presión de vapor, (Pa).
$R$	Constante universal de los gases.
$R_p$	Radio promedio de las semillas de amaranto.
$RR$	Régimen regular.
$R_v$	Constante universal de los gases entre el peso molecular del agua, (J/kgK).
$SC$	Secador de charola.
$\overline{Sh_d}$	Número de Sherwood promedio.
$T$	Temperatura absoluta (K).
$t$	Tiempo (seg).
$T_g$	Temperatura del gas, (K).
$T_i$	Temperatura del gas a la entrada del equipo, (K).
$u$	Variable de adimensionalización del radio.
$U_b$	Velocidad de burbuja, (m/s).
$U_{mf}$	Velocidad mínima de fluidización, (m/s).
$U_o$	Velocidad del gas de fluidización (m/s).
$V_p$	Volumen de una partícula, (m <sup>3</sup> ).
$W$	Masa del sólido (kg).
$W_s$	Masa del sólido seco (kg).
$Y$	Humedad absoluta del gas a la salida del secador (kg H <sub>2</sub> O/kg SS).
$Y_i$	Humedad absoluta en la corriente $i$ , $i = 1, b, d$ (kg H <sub>2</sub> O/kg SS).

Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular

Símbolos griegos.

$D_o \rho_{s,o}^2$	Grupo de referencia ( $\text{kg}^2/\text{m}^4\text{s}$ ).
$\mu$	Viscosidad (cP).
$\rho$	Densidad ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).
$\xi$	Variable de adimensionamiento, (adimensional).
$\rho_A$	Densidad del gas, ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).
$\Delta H_{\text{evap}}$	Entalpía de evaporación por unidad de masa de agua (J/kg).
$\partial M/\partial t$	Intercambio de humedad por la unidad de tiempo.
$\varepsilon_{\text{mf}}$	Fracción de espacios vacíos a mínima fluidización, (adimensional).
$\varepsilon_b$	Fracción de espacios vacíos en la fase burbuja, (adimensional).
$\rho_p$	Densidad de la partícula, ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).
$\rho_s$	Densidad del sólido ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).
$\phi_s$	Esfericidad promedio de partícula, (adimensional).
$\rho_{s,p}$	Densidad de los sólidos secos ( $\text{kg sólido}/\text{m}^3$ ).

## 10 APÉNDICES

### **A. Amarantho**

El nombre de amaranto o bleo se aplica tanto a la semilla como a la planta de la familia de las amarantáceas, compuesta de 60 géneros y cerca de 800 especies; son plantas herbáceas anuales (Noviembre - Diciembre). Cerca de 50 especies son nativas del continente Americano y otras 15 pueden ser encontradas en el resto del mundo (Kigel, 1994). Existen tres especies principales de amaranto que producen semillas nutritivas, con potencial para hacer cereales: *Amaranthus caudatus*, *Amaranthus cruentus* y *Amaranthus hypochondriacus* (Bressani y Benavides, 1990; Segura et al., 1994; Saunders y Becker, 1984). Se cultiva tanto en climas tropicales como en semiáridos. La planta de amaranto además de producir la tan abundante y nutritiva semilla, es magnífica productora de quelites; tanto las hojas como las semillas son comestibles. Para su utilización estas semillas generalmente son tostadas o cocidas.

La época de cultivo de amaranto en nuestro país comprende el periodo de Primavera-Verano, para evitar su degradación y aumentar el tiempo de almacenamiento, es necesario que las semillas contengan niveles bajos de humedad (< 10%), por lo que éstas son sometidas a un proceso de secado después de haber sido recolectadas. A continuación se muestra una fotografía del *A. Hypochondriacus* (Tovar et al., 1994) tomada en un Zeiss DSM 950 (Scanning Electrón Microscope).

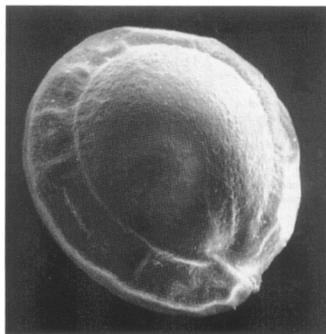


Figura 10.- *Amaranthus Hypochondriacus*.

Actualmente la mayoría de la población mundial recibe el grueso de sus requerimientos proteicos y calóricos de 20 especies de vegetales aproximadamente en especial de los cereales como trigo, arroz, maíz, sorgo; tubérculos como papa, camote; leguminosas como el frijol, soya, entre otros. Una de las características más importantes del amaranto es, sin duda, el alto valor nutritivo, el cual no radica sólo en la cantidad sino en la calidad de las proteínas que contiene, presentando un excelente balance de aminoácidos (Becerra, 2002).

Tiene una única composición de proteínas, carbohidratos, y lípidos; contiene de 15 a 18% más proteína (lisina y metionina dos aminoácidos esenciales que frecuentemente no se encuentran en los granos) que otro cereal en forma de grano, contiene aproximadamente de 5 a 9% más aceite que otros cereales, 77% grasas insaturadas (ácido linoléico), del 5 a 8% de escualeno, altos niveles de fibra, calcio, hierro, potasio, fósforo, y vitaminas A, E y C, estas características lo hace más atractivo como alimento, y en combinación con otros cereales aumenta su valor nutricional (Hughes, 2001).

Altas velocidades y temperaturas reducen gravemente la calidad del alimento (Ferrante, 1996); debido a esto hay que tener precaución con la temperatura de operación ya que podemos degradar las proteínas que contiene el amaranto.

ANÁLISIS	A. HYPOCHONDRIACUS
Humedad	13.5 - 17
Proteína cruda	17.9
Grasa	7.7
Fibra	2.2

Tabla 4.- Composición aproximada de amaranto (porcentaje en base seca).

A continuación se muestra el resumen nacional del cultivo de amaranto en nuestro país en los últimos 5 años y la producción por estado, proporcionados por el Centro de Estadística Agropecuaria (C.E.A.), Sistema de Información Agropecuaria de Consulta, obtenido de la base de datos SIACON, Versión 1.1.

Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular

<b>RESUMEN NACIONAL</b>	<b>1997</b>	<b>1998</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>
Superficie sembrada (Ha)	3268	1834	3217	3119	3332
Superficie Cosechada	2844	1791	3210	3119	3259
Superficie Siniestrada (Ha)	424	43	7	0	73
Volumen de Producción (Ton)	3453	1879.7	5862	4240.3	4782.6
Valor Producción(\$ millones)	26.806	14.068	46.439	35.964	26.257
Rendimiento(Ton/Ha)	1.214	1.05	1.826	1.36	1.468
Precio Medio Rural(\$/Ton)	7763	7484	7921	5781	5490

Tabla 5.- Resumen nacional del cultivo de amaranto <sup>(1)</sup>.

Volumen de producción (TON)	<b>1997</b>	<b>1998</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>
Baja California Sur	6	0	0	0	17
Campeche	0	6	15	20	0
DF	180	214	247	218.1	257
Guanajuato	0	16.4	3	7	0
Guerrero	1	0.6	0	0	0
Hidalgo	1	0	0	0	3
Jalisco	1	1	0	0	0
Edo. de México	627	337.7	1548	147	598
Morelos	567	534	604.2	506	437.4
Nayarit	0	0	0	0	76.8
Oaxaca	0	0	0	7	8

Tabla 6.- Producción de amaranto por identidad federal <sup>(1)</sup>.

<sup>1</sup> Centro de Estadística Agropecuaria (C.E.A.), Sistema de Información Agropecuaria de Consulta, obtenido de la base de datos SIACON, Versión 1.1.

### **B. Datos generales**

Temperatura (K)	Tiempo de secado (hrs.)	Humedad del aire (SC). (kg H <sub>2</sub> O/ kg AS)	Velocidad del aire (m/s)
313	180	Menores a 0.002	0.12
323	180	Menores a 0.002	0.12
333	180	Menores a 0.002	0.12
343	180	Menores a 0.002	0.12

Tabla 7.- Condiciones experimentales de operación del secado de charola.

Capacidad calorífica de la semilla de amaranto (Caballero, 1999).

$$C_B = \bar{M}(7.53T + 556.8) + 6.72T - 793.5$$

Ec. 63

### C. Análisis Diferencial de Barrido (DSC)

La rampa de calentamiento utilizada se muestra en la siguiente tabla:

TA Instruments Thermal Analysis -- DSC RCS/MCA
Rampa 50.00 °C/min hasta 65.00 °C
Rampa 5.00 °C/min hasta 75.00 °C
Isoterma durante 180.00 min
Terminar el método

Tabla 8.- Rampa de calentamiento (DSC).

TA Instruments Thermal Analysis -- DSC RC)S/MCA

Muestra: Amaranto a 75 °C

Masa: 23.4200 mg

Operador: Andrews

Tiempo	Flujo de calor	Tiempo	Flujo de calor
Min	W/g	Min	W/g
0.00	-0.01910	100.00	-0.009931
10.00	-0.29220	110.00	-0.009534
20.00	-0.15090	120.00	-0.007362
30.00	-0.06751	130.00	-0.006211
40.00	-0.03972	140.00	-0.005752
50.00	-0.02768	150.00	-0.004556
60.00	-0.02101	160.00	-0.004167
70.00	-0.01671	170.00	-0.004651
80.00	-0.01427	180.00	-0.003900
90.00	-0.01214		

Tabla 9.- Datos de flujo de calor vs tiempo para el DSC.

### D. Datos Experimentales Balanza de Humedad

Temperatura de operación 313K / Secado realizado en la balanza de humedad.							
10%		18%		25%		31%	
t (min)	Wo (g)	t (min)	Wo (g)	t (min)	Wo (g)	t (min)	Wo (g)
0.00	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00
5.00	9.97	5.33	9.90	5.33	9.83	6.33	9.95
10.00	9.92	11.47	9.77	11.47	9.60	11.47	9.54
15.00	9.87	15.33	9.68	15.33	9.46	15.33	9.40
20.00	9.82	19.00	9.60	19.00	9.35	19.00	9.27
25.00	9.78	23.33	9.54	23.33	9.23	23.33	9.14
30.00	9.74	25.77	9.47	25.77	9.16	25.77	9.07
35.00	9.70	30.58	9.41	30.58	9.08	30.58	8.95
40.00	9.67	35.70	9.35	35.70	8.96	35.70	8.84
45.00	9.64	42.47	9.30	42.47	8.87	42.47	8.71
50.00	9.61	47.27	9.25	47.27	8.80	47.27	8.65
55.00	9.58	55.17	9.21	55.17	8.71	55.17	8.56
60.00	9.56	61.00	9.17	61.00	8.65	61.00	8.50
70.00	9.55	69.53	9.14	69.53	8.60	69.53	8.44
80.00	9.54	74.75	9.11	74.75	8.57	74.75	8.41
90.00	9.53	82.00	9.08	82.00	8.55	82.00	8.37
103.00	9.52	88.25	9.06	88.25	8.53	88.00	8.35
117.00	9.51	95.48	9.04	95.48	8.51	95.48	8.32
130.00	9.50	110.00	9.02	110.00	8.50	110.00	8.29
142.00	9.49	118.00	9.01	118.00	8.48	118.00	8.27
155.00	9.48	125.00	9.00	125.00	8.47	125.00	8.25
169.00	9.47	139.00	8.99	139.00	8.46	139.00	8.23
180.00	9.46	152.00	8.98	152.00	8.45	152.00	8.21
		180.00	8.97	180.00	8.44	180.00	8.18

Tabla 10.- Datos Experimentales del secado de amaranto a 313K, BH.

Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular

Temperatura de operación 323K / Secado realizado en la balanza de humedad.							
10%		18%		25%		31%	
t (min)	Wo (g)	t (min)	Wo (g)	t (min)	Wo (g)	t (min)	Wo (g)
0.00	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00
5.00	9.89	2.00	9.90	1.42	9.95	3.25	9.80
10.83	9.80	5.00	9.70	2.55	9.90	4.42	9.65
15.00	9.76	10.00	9.52	4.42	9.80	6.50	9.49
20.00	9.73	15.00	9.40	5.43	9.70	8.50	9.33
25.00	9.70	20.00	9.31	6.63	9.60	10.08	9.20
42.13	9.64	25.00	9.27	7.75	9.50	12.25	9.06
45.00	9.63	30.00	9.20	9.38	9.40	15.00	8.94
49.45	9.61	35.00	9.16	10.93	9.30	20.00	8.80
55.65	9.60	40.00	9.11	12.33	9.20	26.00	8.65
65.00	9.58	45.00	9.07	14.67	9.10	36.00	8.53
80.50	9.55	50.00	9.03	16.73	9.00	47.00	8.39
92.00	9.54	55.00	9.01	18.58	8.95	56.00	8.32
94.63	9.53	60.00	8.99	23.02	8.85	70.58	8.25
106.45	9.52	65.00	8.97	25.97	8.80	87.48	8.20
114.68	9.51	70.00	8.95	29.58	8.75	96.52	8.16
118.70	9.50	80.00	8.93	34.05	8.70	106.85	8.14
130.00	9.49	90.00	8.91	39.00	8.66	115.82	8.12
139.00	9.48	100.00	8.89	42.30	8.63	125.33	8.10
156.00	9.47	110.00	8.87	47.47	8.60	136.92	8.08
179.00	9.46	120.00	8.86	51.02	8.58	141.05	8.07
		130.00	8.85	55.30	8.56	150.03	8.06
		140.00	8.84	60.23	8.54	159.25	8.05
		150.00	8.83	66.17	8.52	171.33	8.04
		160.00	8.82	73.33	8.50	180.00	8.03
		170.00	8.81	80.53	8.48		
		180.00	8.80	95.20	8.45		
				101.00	8.44		
				114.60	8.42		
				122.08	8.41		
				130.82	8.40		
				138.78	8.39		
				149.67	8.38		
				160.67	8.37		
				173.25	8.36		

Tabla 11.- Datos Experimentales del secado de amaranto a 323K, BH.

Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular

Temperatura de operación 333K / Secado realizado en la balanza de humedad.							
10%		18%		25%		31%	
t (min)	Wo (g)	t (min)	Wo (g)	t (min)	Wo (g)	t (min)	Wo (g)
0.00	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00
2.00	9.91	2.03	9.85	1.38	9.90	2.00	9.87
4.00	9.84	5.02	9.55	2.02	9.80	5.53	9.57
6.00	9.80	10.00	9.25	2.53	9.70	7.50	9.29
8.00	9.75	15.00	9.10	3.13	9.60	9.53	9.08
10.50	9.72	20.00	9.05	3.77	9.50	11.55	8.88
12.00	9.70	25.00	8.98	4.55	9.40	14.00	8.78
15.00	9.68	30.00	8.93	5.40	9.30	16.08	8.69
17.00	9.66	35.00	8.90	6.28	9.20	19.25	8.58
19.00	9.64	40.00	8.88	7.33	9.10	22.38	8.49
21.00	9.63	45.00	8.86	8.70	9.00	26.18	8.42
23.00	9.62	50.00	8.84	10.50	8.90	32.33	8.35
25.00	9.61	55.02	8.82	12.85	8.80	41.18	8.26
27.00	9.60	60.00	8.80	16.18	8.70	47.62	8.18
29.00	9.59	65.00	8.78	18.62	8.65	60.50	8.14
33.00	9.57	70.00	8.76	21.50	8.60	75.63	8.09
35.00	9.56	80.00	8.74	25.63	8.55	86.90	8.05
37.00	9.55	90.00	8.72	30.90	8.50	92.72	8.02
41.00	9.53	100.00	8.70	36.72	8.46	102.13	8.01
46.00	9.51	110.00	8.69	42.13	8.43	115.42	8.00
49.25	9.50	119.97	8.68	48.42	8.40	125.58	7.99
56.00	9.48	130.00	8.67	53.58	8.38	136.00	7.98
63.25	9.46	140.00	8.65	57.00	8.36	147.97	7.97
67.67	9.45	150.07	8.64	66.97	8.34	158.33	7.96
72.50	9.44	160.00	8.63	76.33	8.32	165.08	7.95
77.75	9.43	170.03	8.62	86.08	8.30	180.60	7.94
83.00	9.42	180.00	8.61	92.60	8.29		
89.00	9.41			99.87	8.28		
95.17	9.40			115.08	8.26		
102.00	9.39			123.67	8.25		
109.00	9.38			134.18	8.24		
116.00	9.37			146.08	8.23		
125.00	9.36			159.17	8.22		
134.00	9.35			174.05	8.21		
143.50	9.34						
156.50	9.33						
167.00	9.32						
180.00	9.31						

Tabla 12.- Datos Experimentales del secado de amaranto a 333K, BH.

Temperatura de operación 343K / Secado realizado en la balanza de humedad.
--

Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular

10%		18%		25%		31%	
t (min)	Wo (g)						
0.00	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00
2.00	9.88	0.98	9.95	2.12	9.70	3.85	9.38
5.98	9.70	1.83	9.80	2.60	9.60	5.55	9.08
8.28	9.63	2.50	9.70	3.00	9.52	6.50	8.95
10.43	9.59	3.20	9.60	3.97	9.35	8.23	8.75
12.40	9.56	4.05	9.50	4.28	9.30	11.33	8.53
15.60	9.52	5.10	9.40	5.00	9.20	14.43	8.39
18.78	9.49	8.60	9.20	5.82	9.10	17.08	8.31
22.67	9.46	11.23	9.10	6.77	9.00	19.23	8.27
25.62	9.44	12.82	9.06	7.93	8.90	21.88	8.22
27.20	9.43	15.12	9.02	9.52	8.80	23.82	8.19
29.02	9.42	17.65	8.98	11.55	8.70	27.48	8.14
30.88	9.41	20.98	8.94	14.40	8.60	32.65	8.09
34.97	9.39	24.08	8.91	16.32	8.55	36.83	8.06
39.17	9.37	28.80	8.87	18.67	8.50	43.00	8.03
41.67	9.36	32.15	8.85	21.10	8.46	48.22	8.00
44.88	9.34	35.45	8.83	23.90	8.42	58.92	7.97
51.73	9.32	39.58	8.81	27.63	8.38	66.53	7.96
55.08	9.31	44.15	8.79	31.15	8.35	72.83	7.94
59.33	9.30	49.73	8.77	34.25	8.33	82.17	7.92
63.92	9.29	52.55	8.76	38.90	8.30	91.62	7.91
69.33	9.28	55.20	8.75	42.80	8.28	97.58	7.90
74.87	9.27	58.60	8.74	47.67	8.26	103.50	7.89
80.60	9.26	62.15	8.73	53.27	8.24	117.65	7.88
86.70	9.25	65.95	8.72	60.47	8.22	132.50	7.87
93.50	9.24	70.00	8.71	68.67	8.20	141.00	7.86
101.95	9.23	74.17	8.70	78.30	8.18	153.00	7.85
108.00	9.22	78.90	8.69	90.83	8.16	176.50	7.84
116.50	9.21	84.25	8.68	97.92	8.15		
128.33	9.20	90.17	8.67	105.83	8.14		
137.63	9.19	96.73	8.66	114.33	8.13		
149.50	9.18	103.83	8.65	123.10	8.12		
164.05	9.17	112.00	8.64	131.68	8.11		
180.00	9.16	120.33	8.63	140.70	8.10		
		128.17	8.62	131.68	8.11		
		138.43	8.61	140.70	8.10		
		150.63	8.60	151.67	8.09		
		163.00	8.59	163.17	8.08		
				176.33	8.07		

Tabla 13.- Datos Experimentales del secado de amaranto a 343K, BH.

### E. Datos Experimentales Secador de Charola

T <sub>operación</sub> 313 K / Secador de Charola.			
W <sub>ss</sub> = 3.96 g 27%		W <sub>ss</sub> = 3.82 g 31%	
t (min)	w (g)	t (min)	w (g)
0.00	5.00	0.00	5.00
6.00	4.88	6.00	4.92
9.00	4.76	9.00	4.82
13.00	4.70	13.00	4.72
16.50	4.64	16.50	4.65
18.00	4.59	18.00	4.59
23.00	4.56	23.00	4.53
28.00	4.51	28.00	4.46
33.00	4.46	33.00	4.40
43.00	4.41	43.00	4.34
48.00	4.38	50.00	4.30
53.00	4.34	55.00	4.27
58.00	4.32	62.30	4.24
67.00	4.29	73.00	4.22
75.00	4.27	80.00	4.20
81.00	4.26	90.00	4.18
89.00	4.25	97.00	4.17
99.00	4.24	111.00	4.16
131.00	4.22	130.00	4.15
141.00	4.21	140.00	4.14
158.00	4.21	155.00	4.13
179.00	4.20	179.00	4.12

Tabla 14.- Datos Experimentales del secado de amaranto a 313 K, SC.

T <sub>operación</sub> 323 K / Secador de Charola.			
W <sub>ss</sub> = 3.96 g 27%		W <sub>ss</sub> = 3.82 g 31%	
t (min)	w (g)	t (min)	w (g)
0.00	5.00	0.00	5.00
2.00	4.95	3.25	4.84
4.00	4.85	6.50	4.75
6.45	4.75	9.50	4.68
9.35	4.65	13.08	4.60
13.67	4.55	18.25	4.50
16.73	4.50	30.00	4.35
23.02	4.43	38.00	4.25
29.58	4.38	45.00	4.21
34.05	4.35	52.00	4.17
47.47	4.30	63.00	4.14
66.17	4.26	73.00	4.12
80.53	4.24	85.58	4.10
95.20	4.23	98.48	4.08
101.00	4.22	110.52	4.07
114.60	4.21	122.85	4.06
122.08	4.21	138.82	4.05
130.82	4.20	154.33	4.04
138.78	4.20	172.92	4.03
149.67	4.19		
160.67	4.19		
173.25	4.18		

Tabla 15.- Datos Experimentales del secado de amaranto a 323 K, SC.

Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular

T <sub>operación</sub> 333 K / Secador de Charola.			
W <sub>ss</sub> = 3.96 g		W <sub>ss</sub> = 3.82 g	
27%		31%	
t (min)	w (g)	t (min)	w (g)
0.00	5.00	0.00	5.00
2.80	4.91	2.61	4.92
4.70	4.85	4.20	4.86
6.50	4.79	5.80	4.78
9.10	4.73	8.15	4.63
12.30	4.65	10.60	4.56
14.05	4.58	14.15	4.45
17.30	4.52	17.30	4.41
21.70	4.44	20.70	4.35
26.30	4.38	25.30	4.28
33.80	4.34	31.80	4.21
38.00	4.30	39.00	4.16
46.50	4.26	45.50	4.13
54.50	4.23	53.50	4.10
60.12	4.21	59.00	4.08
68.30	4.19	67.00	4.06
73.40	4.17	73.00	4.04
83.00	4.16	83.00	4.03
90.30	4.15	90.30	4.02
98.50	4.14	98.50	4.01
114.00	4.13	114.00	4.00
125.70	4.12	125.70	3.99
142.11	4.11	142.00	3.98
160.00	4.10	160.00	3.97
180.00	4.09	180.00	3.96

Tabla 16.- Datos Experimentales del secado de amaranto a 333 K, SC.

T <sub>operación</sub> 343 K / Secador de Charola.			
W <sub>ss</sub> = 3.96 g		W <sub>ss</sub> = 3.82 g	
27%		31%	
t (min)	w (g)	t (min)	w (g)
0.00	5.00	0.00	5.00
6.00	4.86	6.00	4.86
9.00	4.72	9.00	4.72
13.00	4.59	13.00	4.59
16.50	4.50	16.50	4.49
18.00	4.48	18.00	4.38
23.00	4.38	23.00	4.28
28.00	4.32	28.00	4.20
33.00	4.29	33.00	4.14
43.00	4.24	43.00	4.08
48.00	4.21	50.00	4.05
53.00	4.20	55.00	4.03
58.00	4.19	62.30	4.01
67.00	4.18	73.00	3.99
75.00	4.17	80.00	3.97
81.00	4.15	90.00	3.96
89.00	4.14	97.00	3.95
99.00	4.13	111.00	3.94
131.00	4.12	130.00	3.93
141.00	4.11	140.00	3.92
158.00	4.10	155.00	3.91
179.00	4.09	179.00	3.90

Tabla 17.- Datos Experimentales del secado de amaranto a 343 K, SC.

### F. Cálculo del Coeficiente de Difusión Efectivo Promedio

$\bar{M}$	313 K	323 K	333 K	343 K
0,25	3,23E-09	6,54E-09	9,68E-09	1,85E-08
0,24	2,87E-09	5,88E-09	8,85E-09	1,70E-08
0,23	2,54E-09	5,26E-09	8,05E-09	1,55E-08
0,22	2,24E-09	4,68E-09	7,30E-09	1,41E-08
0,21	1,96E-09	4,15E-09	6,59E-09	1,28E-08
0,20	1,71E-09	3,65E-09	5,92E-09	1,16E-08
0,19	1,47E-09	3,19E-09	5,29E-09	1,04E-08
0,18	1,26E-09	2,77E-09	4,69E-09	9,25E-09
0,17	1,07E-09	2,39E-09	4,14E-09	8,20E-09
0,16	9,03E-10	2,04E-09	3,62E-09	7,21E-09
0,15	7,51E-10	1,72E-09	3,14E-09	6,30E-09
0,14	6,17E-10	1,44E-09	2,70E-09	5,44E-09
0,13	4,99E-10	1,19E-09	2,29E-09	4,65E-09
0,12	3,97E-10	9,62E-10	1,92E-09	3,93E-09
0,11	3,10E-10	7,67E-10	1,59E-09	3,27E-09
0,10	2,36E-10	5,98E-10	1,29E-09	2,68E-09
0,09	1,75E-10	4,54E-10	1,02E-09	2,14E-09
0,08	1,25E-10	3,34E-10	7,87E-10	1,67E-09
0,07	8,54E-11	2,36E-10	5,86E-10	1,26E-09
0,06	5,50E-11	1,57E-10	4,18E-10	9,11E-10
0,05	3,27E-11	9,78E-11	2,79E-10	6,20E-10
0,04	1,73E-11	5,46E-11	1,71E-10	3,87E-10

Tabla 18.- Valores calculados de la  $D_{ef}$  por el MRR.

T (K)	1/T (1/K)	$\overline{D_{ef}} _T$	$\ln(\overline{D_{ef}} _T)$	R (J/K mol)	Pendiente	EA (J/mol)	A
313	3.19E-03	1.24E-09	-20.50	8.31	-3484	28952	-9.38
323	3.09E-03	1.97E-09	-20.05			28952	-9.26
333	3.00E-03	2.60E-09	-19.77			28952	-9.31
343	2.91E-03	3.05E-09	-19.52			28952	-9.37

Tabla 19.- Valores promedio de la  $D_{ef}$  evaluados a T=cte, SC.

## G. Modelo Homogéneo (Programa)

- c Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa
- c Maestría en Ingeniería Química
  
- c Programa para evaluar el secado de granos de amaranto por lotes  
c utilizando el modelo homogéneo de Zahed y Epstein (1992)
  
- c Programa elaborado por M.I.Q. Carlos Martínez Vera e I.Q. Hugo  
c Espinosa Andrews utilizando el método numérico trazadores cúbicos.

```
program dryz
implicit double precision (a-h,o-z)
double precision u(50), x(50), s(50), par(1), ms, xguess(50)
character*20 nombre, profile

common /dat01/n;                common /dat0/x0,t0
common /dat1/u,s;              common /dat2/ga,vs,ms,as
common /dat3/alfa,y1;         common /dat4/dt
common /dat5/p;              common /dat6/t1
common /dat8/rp;             common /dat9/beta
common /dat10/hum;           common /dat11/ca,cv,cs,cl
common /dat12/y

external fcn, dneqnf

open(312,file='resultados.dat',status='unknown');
open(10,file='secado.dat',status='unknown')
write (*,*) 'Tiempo de Impresion'; read (*,*) time; ts = time
call DATOS

sn0 = 0.1d0;  du = 1.0d0/(n-1);  t = 0.0d0
ne = n + 1;      itmax = 200;  errrel = .0001

do 5 j = 1,n
    s(j) = x0
    u(j) = ((j-1)*du)**beta
    x(j) = x0 +(sn0-x0)*u(j)
5 continue

c condición inicial y aprox. inicial para la temperatura
x(n+1) = t0;                s(n+1) = t0

write (10,*)' t      hum      x(n)  T      y'
max = 360
```

Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular

```

do 20 i = 1,max
    do 24 j=1,n+1;          xguess(j) = x(j)
24      continue
t = t + dt

call UMACH (2, NOUT)
call DNEQNF(FCN,errrel,ne,itmax,xguess,x,fnorm)

15      do 15 j = 1,n;
        s(j) = x(j)

if (dabs(t - ts) .lt. 1.0d-6) then
    write(10,23)t,hum,x(n),x(n+1),y
212      do 212 l = 1,n;          write (312,23) u(l),x(l)
        continue

ts = ts + time
endif
s(n+1) = x(n+1)
20      continue
26      format (5f12.2)
23      format (5f12.6)
close(10,status ='keep');   close(312,status ='keep')

stop;  end

SUBROUTINE FCN(x,g,ne)
implicit double precision (a-h,o-z)
double precision x(50),g(50)
double precision cm(4,49),u(50),s(50),z(50),break(50), ms, cddf
double precision cdf , punto , punton, df, f, atemp, btemp
integer n, ne, nintv
intrinsic dexp, dlog
external dcsint, dcsval, dcsder
common /dat01/n;          common /dat0/x0,t0
common /dat1/u,s;        common /dat2/ga,vs,ms,as
common /dat3/alfa,y1;    common /dat4/dt
common /dat5/p;          common /dat6/t1
common /dat8/rp;         common /dat10/hum
common /dat11/ca,cv,cs,cl;  common /dat12/y

5      do 5 j = 1,n;
        z(j) = u(j)
call DCSINT (n, z, x, break, cm)

```

Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular

```

punto = u(1)
cdf = DCSDER(1,punto,n-1,break,cm)
g(1) = cdf

do 10 j = 2,n-1

! Difusividad efectiva
!pre potencia (temp en K)
  atemp = (1.625d-10*(x(n+1))**2)-(1.017d-7*(x(n+1)))+1.609d-5
! Potencia
  btemp = (3.75d-4*(x(n+1))**2)-(0.2723d0*(x(n+1)))+51.3660
! Difusividad del amaranto (m2/s)
  d = (atemp*(x(j))**(btemp))
! Derivada de la difusividad (m2/s)
  dm = (atemp*btemp*(x(j))**(btemp-1))
  nintv = n - 1
  punto = u(j)
  cdf = DCSDER(1,punto,nintv,break,cm)
  cddf = DCSDER(2,punto,nintv,break,cm)
  g(j) = x(j) - s(j) - alfa*dt*(d*(punto*cddf + cdf)
*   + punto*dm*cdf**2)

10 continue

ponton = u(n)
dx = DCSDER(1,punton,nintv,break,cm)

! Actividad del agua para el amaranto
fcoef = (3.77d-2*x(n+1)*x(n))**1.068d0
f      = 1.0d0 - dexp(- fcoef)
! Derivada de la actividad de agua respecto a T
dfcoef = 1.068d0*(x(n+1)**0.068d0)*(3.77d-2*x(n))**1.068
df      = (dfcoef * dexp(- fcoef))

! Presión de vapor
pv = 100.0d0*dexp(27.0214d0 - 6887.0d0/x(n+1) -
*   5.31d0*dlog(x(n+1)/273.16d0))
! Fracción de vapor
y  = 0.622d0*f*pv/(p - f*pv)
c  Condición de frontera sin considerar resistencia en la interfase
dn = (atemp*(x(n))**(btemp))
g(n) = dx - rp*ga*(y1 - y)*vs/(2*ms*as*dn)

c  Cálculo de humedad promedio

```

Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular

```
call AVERAGE(x,rmav)
hum = rmav
```

- c **Ecuación para la entalpía**  

$$dh = (462d0*x(n+1)**2)*((6887.0d0/x(n+1)**2) - (5.31d0/x(n+1))) +$$
 \* (df/f)

**!Cp del amaranto en función de M y T (J/kg K)**

$$cs = ((hum)*(7.53d0*x(n+1)+556.8d0)+6.72d0*x(n+1)-793.5d0)$$

- c **Ecuación para la temperatura**

- \* 
$$g(n+1) = x(n+1) - s(n+1) - dt*(ga*(ca + y1*cv)*(t1 - x(n+1)) -$$
 \* 
$$ga*(y - y1)*dh)/(ms*(cs + hum*cl))$$

```
return;      end
```

```
SUBROUTINE AVERAGE(x,rmav)
implicit double precision (a-h,o-z)
double precision u(50),x(*),break(50)
double precision cscoef(4,49),fu(50),s(50)
external dcsint ,dcsitg
common /dat01/n;      common /dat0/x0,t0;      common /dat1/u,s
```

- 10 

```
do 10 j = 1,n;      fu(j) = u(j)**0.5d0*x(j)
continue
call DCSINT (n, u, fu, break, cscoef)
a = u(1);      b = u(n)
nintv = n-1
q = DCSITG(a,b,nintv,break,cscoef)
rmav = 1.5d0*q
```

```
return;      end
```

```
subroutine DATOS
implicit double precision (a-h,o-z)
double precision ms
common /dat01/n;      common /dat0/x0,t0
common /dat2/ga,vs,ms,as;      common /dat3/alfa,y1
common /dat4/dt;      common /dat5/p
common /dat6/t1;      common /dat8/rp
common /dat9/beta;      common /dat11/ca,cv,cs,cl
```

Determinación del Coeficiente de Difusión Efectivo en Sólidos Porosos  
Utilizando el Método De Régimen Regular

n = 30.0	!Particiones	
x0 = 0.20d0	!Humedad inicial	[=] kg/kg
t0 = 313d0	!T de entrada del grano	[=] K
ga = 3.648d-3	!Flujo másico de aire	[=] kg/seg
ms = 0.560d0	!Masa del grano	[=] kg
y1 = 0.00001d0	!Humedad del aire en la entrada	[=] kg/kg
dt = 0.50d0	!Paso de integración	
p = 78000d0	!P total del sistema	[=] Pa
t1 = 343.16d0	!T de operación	[=] K
rp = 0.0005d0	!Radio de partícula	[=] m
beta = 0.5d0	!Partición del radio	0<beta<=1
ca = 1006d0	!Cp gas (aire)	[=] 1006 J/kg K
cv = 1890d0	!Cp vapor de agua	[=] 1890 J/kg K
cl = 4190d0	!Cp agua líquida	[=] 4190 J/kg K
vs = 5.236d-10	!Volumen del sólido	[=] m <sup>3</sup>
as = 3.142d-6	!Área sup. del sólido	[=] m <sup>2</sup>
alfa = 4.0d0/rp**2	!Cte. de adim.	[=] m <sup>2</sup>
return;	end	

## H. Definiciones

**Amilopectina** es un componente del almidón.

**Contenido de humedad de un sólido** generalmente se describen en función del porcentaje en peso de humedad, a menos que se indique lo contrario, se sobre entiende que esta expresado en base húmeda es decir, Kg de humedad/ Kg de sólido húmedo

$$\frac{\text{kg de humedad}}{\text{kg sólido seco} + \text{kg humedad}} 100 = 100 \frac{M}{1 + M}$$

**Contenido de humedad en base seca** se expresa como kg de humedad entre kg de sólido seco

$$\frac{\text{kg de humedad}}{\text{kg sólido seco}} = X$$

y el porcentaje de humedad en base seca = 100 X

**Difusión interna** se puede definir como el movimiento del líquido o vapor a través de un sólido, como resultado de una diferencia de concentración.

**Humedad (M)** de una mezcla aire-vapor de agua es los kilogramos de vapor de agua que hay en un kilogramo de aire seco y solo es función de la presión parcial de vapor de agua.

$$M = \frac{P_A}{P_t - P_A} \frac{18}{29}$$

Donde  $P_{AS}$  es la presión de vapor de agua pura a la temperatura establecida.

**Humedad en el equilibrio  $M_e$**  es el contenido de humedad de una sustancia que está en el equilibrio con una presión parcial del vapor.

**Humedad ligada** es la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor que la del líquido puro a la misma temperatura.

**Humedad libre** es la humedad contenida por una sustancia en exceso de humedad en equilibrio:  $M - M_e$ . Solo se puede evaporarse la humedad libre, el contenido de humedad libre de un sólido depende de la concentración del vapor en el gas.

**Número de Sherwood** contiene al coeficiente de transferencia de masa y al coeficiente de difusión, éste número adimensional relaciona la resistencia al transporte de masa por difusión con la resistencia al transporte de masa por convección:

$$Sh = \frac{kL_c}{D} = \frac{L_c/D}{1/k}$$

**Porcentaje de humedad relativa ( $M_R$ )** es la cantidad de saturación de una mezcla de aire-vapor de agua también puede expresarse como % usando presiones parciales.

$$M_R = 100 \frac{P_A}{P_{AS}}$$

**Punto de rocío** es la temperatura a la cual cierta mezcla aire-vapor de agua debe estar saturada, o en otras palabras es cuando aparece la primer gota en la mezcla gaseosa.

**Temperatura de bulbo húmedo** es la temperatura de estado estable y no de equilibrio que se alcanza cuando se pone en contacto una pequeña cantidad de agua con una corriente continua de gas en condiciones adiabáticas, puesto que la cantidad de líquido es pequeña, la temperatura y la humedad del gas no cambian.