

154



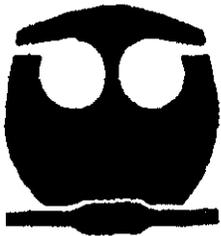
**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO**

---

**FACULTAD DE QUIMICA**

**DETERMINACION DE COEFICIENTES DE  
TRANSPORTE EN UN  
SECADOR DE CHAROLAS**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :  
**INGENIERO QUIMICO**  
P R E S E N T A :  
**JERONIMO RIVERA GUANOSTA**



MEXICO, D.F.

2001



EXAMEN DE GRADUACION  
FACULTAD DE QUIMICA



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

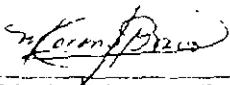
JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE	Prof.	GENOVEVO SILVA PICHARDO
VOCAL	Prof.	YOLANDA LOZADA GOMEZ
SECRETARIO	Prof.	MARTHA IMELDA MORENO BRAVO
1er SUPLENTE	Prof.	MARIANO PEREZ CAMACHO
2do. SUPLENTE	Prof	MARTIN RIVERA TOLEDO

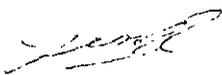
SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA

Laboratorio de Ingeniería Química  
Facultad de Química.  
Ciudad Universitaria

ASESOR

  
-----  
M en C. Martha Moreno Bravo

SUSTENTANTE

  
-----  
Jerónimo Rivera Guanosta

## AGRADECIMIENTOS

*A MIS PADRES*

*Gracias por el gran apoyo, confianza y  
por el impulso que me dieron sus buenos consejos.*

*A ESPERANZA (PERA)*

*Gracias por tu apoyo y paciencia.*

*A PAULA J.*

*HECTOR G.*

*Gracias por su comprensión*

*A IRMA, PATY, JAVIER Y ARMANDO*

*A MIS MAESTROS*

*A quienes agradezco mi preparación*

*A LA MAESTRA MARTHA I*

*Por el asesoramiento brindado durante  
el desarrollo del presente trabajo de tesis*

*A LA FACULTAD DE QUÍMICA*

*Con respeto y orgullo te menciono.*

*A MIS AMIGOS*

*Gracias por su amistad*

## LISTA DE SIMBOLOS

## INTRODUCCIÓN

## CAPITULO 1 PRINCIPIOS GENERALES

1.1	Fundamentos de secado	1
1.2	Periodos de secado	1
1.2.1	Periodo antecritico o de velocidad de secado constante	
1.2.2	Primer periodo de velocidad decreciente	
1.2.3	Segundo periodo de velocidad decreciente	
1.3	Cinética del secado	4
1.4	Mecanismo de desplazamiento de la humedad dentro del sólido	5
1.4.1	Teoría de la difusión del secado	
1.4.2	Teoría de la capilaridad del secado	
1.5	Métodos para determinar el tiempo de secado durante el periodo de velocidad constante	6
1.5.1	Método que usa la curva de secado	
1.5.2	Método que usa la curva de velocidad de secado	
1.5.3	Método que emplea los coeficientes de transferencia	
1.6	Métodos para determinar el tiempo de secado en el periodo de velocidad decreciente	9
1.6.1	Método que emplea la integración gráfica	
1.6.2	Método de cálculo para casos especiales en la region de velocidad decreciente	
1.7	Transferencia de calor en secadores discontinuos	11
1.8	Transferencia de masa en secadores	13
1.9	Cálculo del valor de velocidad de secado durante el periodo de velocidad de secado constante	14
1.10	Efecto de diferentes variables sobre la velocidad de secado dentro del periodo de velocidad de secado constante	16
1.11	Conceptos de humedad	16
1.12	Aplicacion de la psicrometria al secado	18

1.13	Aplicación de la ecuación del gas ideal	21
------	---	----

## **CAPITULO 2 PRUEBAS DE SECADO**

2.1	Descripción del secador	22
2.2	Mediciones y cálculos preliminares	23
2.2.1	Velocidad del aire de secado	
2.2.2	Estimación de $\Delta P$	
2.2.3	Determinación de áreas de sección transversal del secador	
2.3	Valores de velocidad de aire manejadas dentro del equipo	27
2.4	Carta psicrométrica	27
2.5	Pruebas de secado	30
2.6	Primera serie de pruebas de secado	30
2.6.1	Tablas de datos experimentales y resultados de la serie 1	
2.6.2	Interpretación gráfica de los resultados obtenidos en la serie 1	
2.7	Segunda serie de pruebas de secado	48
2.7.1	Tablas de datos experimentales y resultados de la serie 2	
2.7.2	Interpretación gráfica de los resultados obtenidos en la serie 2	
2.8	Tercera serie de pruebas de secado	54
2.8.1	Tablas de datos experimentales y resultados de la serie 3	
2.8.2	Interpretación gráfica de los resultados obtenidos en la serie 3	
2.9	Análisis de las curvas de secado	60

## **CAPITULO 3 TRATAMIENTO DE RESULTADOS**

3.1	Obtención de coeficientes de transferencia	62
3.1.1	Coefficientes de transferencia de calor	
3.1.2	Coefficientes de transferencia de masa	
3.2	Correlación de coeficientes de transferencia de calor y flujos masicos de aire manejados en el equipo	64
3.3	Solucion de un problema de secado	70
3.4	Análisis	73

## **CONCLUSIONES**

## **REFERENCIAS**

## Lista de Símbolos

---

- A Area de secado,  $m^2$ , de transferencia de calor  
a Constante de ecuación  
b Constante de ecuación  
C Calor específico, kcal/kg °C;  $C_{p,v}$ , del vapor;  $C_{p,L}$ , del líquido;  $C_{p,s}$ , del sólido;  $C_a$ , del aire húmedo  
D Difusividad  
D Diámetro, m,  $D_e$ , diámetro equivalente  
G Flujo másico del aire,  $kg/h\ m^2$   
g gravedad;  $g_c$ , gravedad específica  
h Coeficiente de transferencia de calor,  $kcal/h\ m^2$ ;  $h_c$   
k Conductividad térmica,  $kcal/h\ m^2\ ^\circ C$   
 $k_y$  Coeficiente de transferencia de masa,  $kg/h\ m^2$ ,  $kg\ mol/h\ m^2$ ;  $k_y$ , fracción molar  
L Espesor, m  
M Peso molecular  
m Velocidad de transferencia de masa,  $m_v$ , velocidad de vaporización;  $m_g$ , velocidad másica del gas seco;  $m$ , masa  
N Flux de transferencia de masa  
P Presión absoluta, atm  
 $P^o$  Presión de vapor, atm  
p Presión parcial del vapor, atm  
Q Velocidad de transferencia de calor del medio de calentamiento,  $kcal/h$ ,  $q$ , velocidad de transferencia de calor  
R Velocidad de secado,  $kg\ H_2O/h\ m^2$ ;  $R_c$ , en el periodo de velocidad constante;  $R'$ ,  $R''$  en primer y segundo punto crítico respectivamente, ( $R_{cr}$ )  
T Temperatura, °C;  $T_{b,s}$ , de bulbo seco;  $T_{b,h}$ , de bulbo húmedo;  $T_w$ , en la pared del sólido  $T_{gl}$ , del aire a la salida  
t Tiempo, h,  $t_{tot}$ , tiempo total,  $t_c$ , en el periodo de velocidad constante,  $t_d$ , en el periodo de velocidad decreciente  
U Coeficiente global de transferencia de vapor  
 $V_H$  Volumen húmedo  
v Velocidad del aire, m/s  
W Peso del sólido húmedo, kg;  $W_s$ , masa de sólido seco por unidad de tiempo,  $W_{s,s}$ , peso del sólido seco,  $W_h$ , peso del sólido húmedo,  $W_{char}$ , peso de las charolas contenedoras del material  
X Humedad del sólido,  $kg\ H_2O/kg\ s\ s$ ,  $X^*$ ,  $X_1$ , en el equilibrio,  $X_1$ , al final del periodo,  $X_c$ , en el punto crítico,  $X'$ ,  $X''$ , en el primer y segundo punto crítico  
Y Humedad del aire,  $kg\ H_2O/kg\ A\ S$  (aire seco),  $Y_R$ , humedad relativa  
z Altura

## SÍMBOLOS GRIEGOS

$\lambda$  Calor latente, kcal/kg de agua

$\rho$  Densidad, kg/m<sup>3</sup>

$\Delta$   $\Delta P$ , diferencia de presión

## SUBÍNDICES

bs bulbo seco

bh bulbo húmedo, w

f final

g gas

i inicial

m media

prom promedio

s.s sólido seco

i interfase

s sólido

R radiación

A agua

B aire

a mezcla aire vapor de agua

## Introducción

---

El secado de materiales constituye a menudo la operación final de un proceso de fabricación. Se entiende por secado la eliminación del agua residual y a menudo esta operación sigue a la evaporación, la filtración o la cristalización.

El secado constituye uno de los métodos que permite separar un líquido de un sólido. En general entendemos por secado la separación de la humedad de los sólidos por evaporación en una corriente gaseosa, en consecuencia, en cualquier proceso de secado hemos de tener en cuenta los mecanismos de transmisión de calor y transporte de materia. En la mayor parte de los problemas prácticos de secado, la humedad o líquido a separar suele ser vapor de agua, y el gas empleado para el secado suele ser aire, aunque las relaciones empleadas son aplicables a cualquier sistema. El secado no se restringe a un solo caso.

El proceso de secado es una operación unitaria que implica la separación del agua (o de cualquier otro líquido volátil) de los materiales sólidos. En la operación de secado el agua casi siempre se elimina en forma de vapor con aire. Los métodos mecánicos que utilizan prensas, filtros o centrifugas (así como otros métodos que se emplean para separar un líquido de un sólido) no se consideran como una operación de secado. Sin embargo, aunque resultan más económicos y más fáciles de utilizar que los métodos térmicos, no se logra mediante éstos eliminar totalmente la humedad del material y es por ello que a menudo proceden a la operación de secado.

En la mayoría de los procesos industriales el secado se lleva a cabo por una o más de las siguientes razones:

- a) Para reducir el costo del transporte.
- b) Para obtener un material más manejable (p. e. jabón en polvo, colorantes y fertilizantes)
- c) Para proporcionar unas determinadas propiedades (p. e. la fluidez de la sal común)
- d) Para evitar la presencia de la humedad, que puede provocar la corrosión.

La necesidad de tener un buen equipo de secado siempre es grande. Químicos, cerámica, tabaco, textiles, jabón, piel, cuero, productos farmacéuticos, pigmentos, alimentos, papel, cartón, madera y una multitud de productos similares deben ser secados, en el transcurso de su manufactura y es en este paso donde ocupan grandes tiempos y ellos deben ser secados adecuadamente. La operación de secado para estos productos es una gran operación vital en la actualidad.<sup>(1)</sup>

La operación de secado requiere del mejor método desde el punto de vista técnico y económico. A partir de un análisis previo del material a secar, hay que elegir la mejor máquina o equipo con la mejor eficiencia. Casi todos los procesos de secado implican la eliminación de agua por evaporación, requiriendo por lo tanto el suministro de calor. Al evaluar la eficacia de un proceso de secado, uno de los criterios más importantes radica en

la eficiente utilización del calor, junto con la velocidad, dirección y distribución del flujo de aire necesario dan el mejor resultado.

Los secadores industriales se pueden clasificar de muy distintas maneras, sin embargo, una clasificación general se hace en base a las condiciones de transferencia del calor o bien por el método de operación. Otras clasificaciones menos fundamentales pueden ser por el tipo de contacto gas-sólido o bien, de acuerdo a la condición del movimiento del sólido en el secado.

De esta manera es como se tienen distintos tipos de secadores como el secador de charolas, el secador continuo de túnel, el secador rotatorio, el secador de tambor, el secador por pulverización, secador a vacío, etc.

Las máquinas de secado están construidas de acero, acero inoxidable, aluminio, latón, cobre, recubierta con cobre, madera, ladrillo, cemento o concreto. El tipo de material usado para la construcción puede determinarse solo bajo un estudio de las condiciones a las cuales la máquina va a operar, considerando algunos efectos por ácidos y humedad para predecir los efectos de corrosión. Las máquinas de secado necesitan o requieren también de una recubierta de aislante para evitar pérdidas de calor.

El aislante utilizado depende de la temperatura en el interior del secador y el costo del calor usado en el secador. Se podría utilizar asbesto, refractario o corcho. Acertando con el espesor y costo adecuado o justo.

El diseño del secador en el análisis es rudimentario y se ha operado por largo tiempo. De su diseño inicial ha sufrido como modificación fundamental, la implementación de quemadores industriales de gas L.P. en sustitución de los serpentines de radiación como sistema de transferencia del calor y que operaba mediante la combustión de diesel.

En el presente trabajo de tesis se realizan pruebas de secado en un secador de charolas que opera a diferente velocidad y temperatura de aire. El objetivo es elaborar curvas de secado experimentales, estimar coeficientes de transporte dentro del periodo de velocidad constante y obtener una correlación entre los coeficientes de transferencia de calor obtenidos ( $h_c$ ) y los flujos máxicos de aire que maneja el equipo.

Usualmente se considera que el secado de sólidos ocurre en dos etapas. una es el periodo de velocidad constante seguido de un segundo periodo llamado periodo de velocidad decreciente.

El proceso de secado opera de manera discontinua y el material húmedo, en este caso cartón, se coloca en charolas que se cargan y se descarga del secador. El calor necesario para eliminar la humedad del material se obtiene por contacto indirecto con una corriente de aire previamente calentada por un banco de tubos aletados por cuyo interior fluye vapor de agua saturado. El secador utilizado en éste trabajo, puede denominarse como un secador de charolas.

Por la previa información expuesta, se definen los siguientes objetivos de éste trabajo:

- Realizar pruebas de secado en el equipo y elaborar las correspondientes curvas de velocidad de secado a partir de los datos obtenidos experimentalmente.
- Comparar el comportamiento de las curvas de velocidad de secado obtenidas experimentalmente con el comportamiento predicho en la bibliografía
- Calcular los coeficientes de transferencia de masa y de calor del proceso de secado.
- Encontrar una correlación entre los coeficientes de transferencia de calor y los flujos máscos de aire manejados en el equipo.
- Utilizar la correlación anterior para predecir tiempos de secado del material mojado
- Propuesta de un guión de apoyo a la enseñanza experimental en el laboratorio de ingeniería química.

El presente trabajo de tesis se compone de tres capítulos. En el capítulo 1, se presentan los fundamentos del proceso de secado y se describen los periodos que se presentan durante el secado de los sólidos húmedos.

En el capítulo 2 se describe el secador y el modo de operación del equipo. A continuación se presentan las mediciones y los cálculos de las pruebas de secado así como la evaluación de las velocidades de aire, la construcción de la carta psicrométrica para el sistema. Se expone de manera general la importancia de las pruebas de secado y los factores que deben considerarse para obtener datos confiables. Se explica la forma de realización de las pruebas de secado, indicando puntos donde se toma lectura de datos en el equipo. Finalmente se expone el análisis de las curvas obtenidas con los datos experimentales de las pruebas de secado.

En el capítulo 3 se incluyen los resultados obtenidos, siendo éstos los valores de coeficientes de transporte correlacionados con los flujos máscos de aire en el secador; el análisis de los valores obtenidos en las pruebas de secado y recomendaciones para trabajar con las mejores condiciones de operación.

Por último se exponen las conclusiones del trabajo desarrollado, así como las referencias empleadas en el presente trabajo y los apéndices, donde en el apéndice A se aprecian los esquemas que muestran la forma del secador, en el apéndice B se exponen las tablas de datos y resultados restantes, el apéndice C que expone en breve el ajuste para la obtención de las curvas de secado a partir de los datos experimentales y por último los apéndices D y E que muestran la memoria de cálculo para obtener densidad y velocidad del aire respectivamente.

# CAPITULO I

## PRINCIPIOS GENERALES

### 1.1 Fundamentos de secado.

Por lo general, el término secado se refiere a la eliminación de la humedad en un sólido y su característica fundamental es la evaporación de la humedad ya sea en una corriente de aire (aire) o sin el beneficio del gas para acarrear el vapor<sup>(15)</sup>.

El secado de sólidos incluye dos procesos simultáneos: 1) la transferencia de calor para vaporar el líquido; y 2) la transferencia de masa en forma de líquido o de vapor dentro del sólido y como vapor cuando se desprende de la superficie expuesta al secado.

Las operaciones de secado pueden clasificarse ampliamente según sean por lotes o continuas. Estos términos pueden aplicarse específicamente desde el punto de vista de la sustancia que se está secando. Así, la operación denominada secado por lotes, generalmente es un proceso en semilotes, en donde una cierta cantidad de sustancia que se va a secar se expone a una corriente de aire que fluye continuamente, en la cual se evapora la humedad. En las operaciones continuas, tanto la sustancia que se va a secar como el gas pasan continuamente a través del equipo<sup>(15)</sup>.

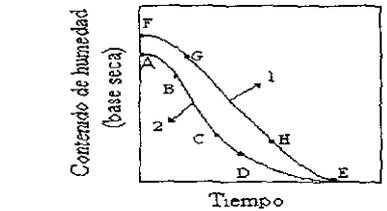
### 1.2 Periodos de secado.

En el secado de bloques con aire, el proceso se divide en dos distintas etapas. a) periodo de velocidad constante y b) periodo de velocidad decreciente. En la primera etapa, el valor de la velocidad de secado permanece constante, muy aproximado a la evaporación de una superficie líquida, el agua distribuida llega a ser no uniforme, con máxima concentración en el centro y mínima en la superficie del material. El segundo periodo se inicia con una disminución en el valor de la velocidad de secado<sup>(4)</sup>.

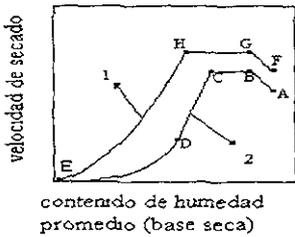
Parte del tiempo total del secado es tomado por cada uno de estos periodos y varían sobre un amplio rango para diferentes materiales, dependiendo en cada caso de la porosidad de los materiales expuestos al secado<sup>(3)</sup>.

En el secado de los diversos materiales es necesario eliminar humedad de la superficie y también humedad de su interior. Si se estudia la variación de la humedad con respecto al tiempo de un material, se obtiene una suave curva como la observada en la figura 1a, a partir de la cual puede calcularse la velocidad de secado para cualquier valor de la humedad<sup>(10)(17)</sup>. La forma de la curva de la velocidad de secado varía con la estructura y el tipo de material, representándose dos curvas típicas como las mostradas en la figura 1b, o bien en la figura 1c. La figura 1c, es otro tipo de curva que se obtiene de datos experimentales, resulta de hacer la gráfica de velocidad de secado en función del tiempo de

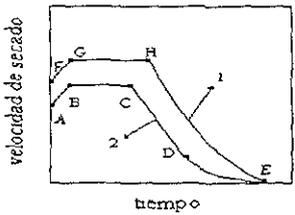
cado. En este tipo de gráficas se aprecia lo que dura exactamente cada periodo en el proceso de secado.



a) Contenido de humedad en función del tiempo



b) Velocidad de secado en función del contenido de humedad promedio



c) Velocidad de secado en función del tiempo

En las curvas 1 hay tres formas bien definidas: FG, que corresponde a un periodo de precalentamiento tanto del contenido de agua como del material y que solo podrá resaltar si se manejan materiales con un espesor considerable. GH, en la que, el valor de la velocidad de secado permanece constante, y HE, en la que hay una continua disminución de la velocidad de secado a medida que disminuye el porcentaje de humedad. La humedad al final del periodo de velocidad constante está representada por el punto H, denominándose humedad crítica

La curva 2, obtenida para otro tipo de materiales, presenta cuatro zonas: AB, BC, CD, DE. La etapa AB, que representa un periodo de precalentamiento, la etapa BC representa un periodo de velocidad constante. CD y DE son periodos en los que la velocidad de secado disminuye. En este caso, la sección CD es una línea recta y únicamente la porción DE es curva. La sección CD se denomina primer periodo de velocidad decreciente y la etapa final, DE, segundo periodo de velocidad decreciente

El secado de jabón da lugar a una curva del tipo 1 y el de arena a una curva del tipo 2

Fig. 1 Curvas de secado.

### 1.2.1 Periodo antecritico o de velocidad de secado constante.

En este periodo la superficie del sólido está totalmente cubierta por una capa de líquido y la evaporación dependerá solamente de la velocidad de difusión del vapor de agua a través de una película estacionaria de aire hacia la corriente de aire o de la intensidad de paso de calor a través de la capa límite del aire. Durante este periodo la superficie mojada se comporta como una superficie de agua libre. La resistencia de difusión a través del sólido hasta la superficie de secado es despreciable, de modo que la velocidad de difusión a través del sólido es igual a la velocidad de secado <sup>(9)</sup>.

Mientras que la superficie está completamente mojada, el proceso de secado es independiente del mecanismo mediante el cual la humedad alcanza la capa más externa y el proceso se reduce a una transferencia de masa desde la superficie del sólido a la corriente de aire y una transmisión de calor desde el aire al sólido, suponiendo que la radiación y conducción a la superficie mojada son despreciables <sup>(11)</sup>.

### 1.2.2 Primer periodo de velocidad decreciente.

Los puntos C y H de la figura 1 representan condiciones en las que la superficie ya no puede suministrar suficiente humedad libre para saturar el aire en contacto con ella. En estas condiciones el factor que influye realmente en la velocidad de secado es el mecanismo por el cual se transfiere la humedad desde el interior del material hacia la superficie <sup>(10)</sup>. La velocidad de secado varía linealmente con la humedad desde el punto crítico. La velocidad de secado está regida por la evaporación del agua sobre la fracción de superficie mojada. Puede calcularse la velocidad de secado en cualquier instante de este periodo en función de las velocidades y humedad crítica y final correspondientes a este periodo, de acuerdo con la ecuación:

$$R = R_{cr} - \frac{X_{cr} - X}{X_{cr} - X_f} (R_{cr} - R_f) \dots \dots \dots (1.1)$$

- R Velocidad de secado.
- R<sub>cr</sub> Velocidad de secado en el punto crítico
- R<sub>f</sub> Velocidad de secado final del periodo.
- X Humedad del sólido
- X<sub>cr</sub> Humedad del sólido en el punto crítico.
- X<sub>f</sub> Humedad del sólido al final del periodo

### 1.2.3 Segundo periodo de velocidad decreciente.

Al finalizar el primer periodo de velocidad decreciente puede suponerse que la superficie está seca y que el plano de separación se desplaza hacia el interior del sólido. En este caso, la vaporización tendrá lugar en el interior del sólido y el vapor alcanzará la superficie por

difusión molecular a través del material. Las fuerzas que controlen la difusión del vapor determinarán la velocidad final de secado, siendo ésta en gran parte independiente de las condiciones existentes en el exterior del material <sup>(10)</sup>. La velocidad de secado no varía linealmente con la humedad desde el punto crítico, aunque puede no presentarse esta separación neta entre ambos tramos.

Durante el segundo periodo de velocidad decreciente (segundo periodo poscrítico) la superficie está totalmente seca y la velocidad de secado ha de evaluarse atendiendo al proceso de transporte de humedad desde el interior del sólido hasta la superficie, que puede realizarse por diversos mecanismos. Si el mecanismo de transporte se realiza por difusión (caso de los sólidos de estructura continua tales como jabones, madera, papel, arcilla, etc.) la velocidad de secado viene dada por:

$$R = \frac{\pi^2 \gamma D}{4 Z} (X - X^*) \dots \dots \dots (1.2)$$

y el tiempo de secado entre las humedades  $X_1$  y  $X_2$  será:

$$t = \frac{4 Z^2}{\pi^2 D} \ln \frac{X_1 - X^*}{X_2 - X^*} \dots \dots \dots (1.3)$$

Siendo  $\gamma$  el peso específico del sólido seco, kilogramo por metro cúbico,  $Z$  el espesor, metros;  $D$  la difusividad, metros cuadrados por hora;  $X$  la humedad;  $X^*$  la humedad de equilibrio, en kilogramos de agua en kilogramos de sólido seco

En el caso de que el mecanismo de transporte esté controlado por el flujo capilar (caso de sólidos granulares tales como arenas, pigmentos, etc.), el tiempo de secado entre las humedades  $X_1$  y  $X_2$  vendrá dado por la ecuación:

$$t = \frac{W_{ss}}{A} \frac{X_1 - X^*}{R_c} \ln \frac{X_1 - X^*}{X_2 - X^*} \dots \dots (1.4)$$

en el que se supone que la velocidad de secado varía linealmente con la humedad hasta que se alcanza el equilibrio, siendo  $W_{ss}$  el peso del sólido seco y  $A$  el área del material expuesta al secado

**1.3 Cinética del secado.**

Se define la velocidad de secado por la pérdida de humedad del sólido húmedo en la unidad de tiempo, y más exactamente por el cociente diferencial  $(-dX/dt)$  operando en condiciones constantes de secado, es decir con aire cuyas condiciones (temperatura, presión humedad y velocidad) permanecen constantes con el tiempo



velocidad constante es bajo, el periodo de evaporación superficial no saturado suele presentarse en la región CD de la figura 1b (curva 2), y la curva controlada por difusión corresponde a la región DE, resultando ésta cóncava hacia arriba.

#### 1.4.2 Teoría de la capilaridad del secado.

La teoría de la capilaridad ha sido desarrollada para explicar el desplazamiento de la humedad en el lecho durante el secado de la superficie. La importancia básica de los espacios o poros existentes entre las partículas granulares fue observada en relación con el desplazamiento de la humedad en los sólidos.

La teoría capilar considera que un lecho empacado de esferas no porosas contienen espacios vacíos entre dichas esferas que se llaman poros. A medida que se evapora el agua, las fuerzas capilares se ponen en acción debido a la tensión interfacial entre el agua y el sólido. Estas fuerzas proporcionan el impulso para desplazar el agua a través de los poros hasta la superficie<sup>(10)(2)</sup>.

Durante el periodo de velocidad constante la humedad se mueve por capilaridad hasta la superficie con suficiente velocidad para mantener una superficie uniformemente húmeda. Al suceder esto, penetra aire para llenar los espacios vacíos. En el primer periodo de velocidad decreciente la interfase comienza a retraerse de la superficie. El líquido que se encuentra en los poros grandes es atraído hacia el interior de la muestra para formar los meniscos de los poros más pequeños. A medida que el secado avanza, el líquido que se encuentra en los poros grandes continúa retrayéndose hasta que llega a una cintura estrecha en el poro y entonces toma una curvatura que se ajusta a la del poro lleno. La superficie líquida queda en los capilares, la evaporación sucede debajo de la superficie en una zona o plano que gradualmente se va haciendo más profunda en el sólido. A medida que se agota la humedad, más y más poros superficiales pierden su humedad, de manera que entre los puntos CD como se aprecia en la figura 1b la porción de la superficie total saturada es cada vez menor y ocurre el segundo periodo decreciente de velocidad de secado. Hacia el final del proceso de secado, la humedad presente existe en pequeñas bolsas en las esquinas de los poros dispersos a través del sólido y el mecanismo que controla la velocidad de secado es el de difusión de calor y de masa a través del sólido. Sin embargo para sólidos muy porosos la difusión no es el mecanismo controlante y la curva de velocidad de secado en el segundo periodo de velocidad decreciente sección DE de la figura 1b suele ser recta.

La superficie líquida queda en los capilares, la evaporación sucede debajo de la superficie en una zona o plano que gradualmente se va haciendo más profunda en el sólido y ocurre el segundo periodo decreciente de velocidad de secado. Durante este periodo la difusión del vapor dentro del sólido ocurre desde el lugar de la evaporación hasta la superficie.

**1.5 Métodos para determinar el tiempo de secado durante el periodo de velocidad constante.**

**1.5.1 Método que usa la curva de secado.**

El método más directo para estimar el tiempo de secado de un determinado lote de material durante el periodo de velocidad constante, es mediante la curva de secado obtenida a las mismas condiciones de secado. Se requiere únicamente leer la diferencia en los tiempos que corresponden a los contenidos inicial y final de humedad del sólido en la curva de secado, figura 2

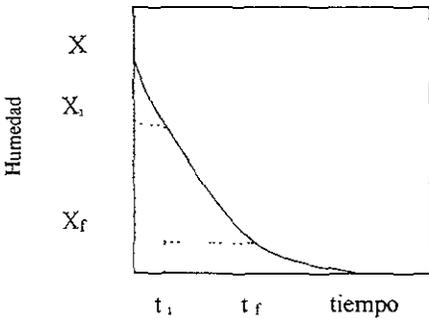


Fig 2 Curva de secado, humedad vs tiempo.

**1.5.2 Método que usa la curva de velocidad de secado.**

El tiempo de secado durante el periodo de velocidad constante se determina también a partir de la curva de velocidad de secado de la manera siguiente

$$R = -\frac{W_s}{A} \cdot \frac{dX}{dt} \quad \dots \dots \dots (16)$$

Esta expresión puede ordenarse e integrarse con respecto al intervalo para secar, desde  $X_1$  a  $t_1$  hasta  $X_2$  a  $t_2$ , de tal manera que tanto  $X_1$  como  $X_2$  sean mayores que el contenido de humedad en el punto crítico  $X_c$ , entonces  $R = R_c = \text{constante}$

$$\int_{t_1=0}^{t_2=t} dt = \frac{W_{s,s}}{A R_c} \int_{X_1}^{X_2} dX \quad \dots \dots \dots (1.7)$$

Por lo tanto al integrar la ecuación 1.7, el tiempo de secado durante el periodo de velocidad constante resulta:

$$t_c = \frac{W_{s,s}(X_1 - X_2)}{A R_c} \quad \dots \dots \dots (1.8)$$

La curva de velocidad de secado es utilizada para leer el valor de la velocidad de secado en el periodo de velocidad constante  $R_c$ . La curva utilizada puede ser la observada en la figura 1b o 1c.

### 1.5.3 Método que emplea los coeficientes de transferencia.

En este método, se considera que la transferencia de calor sólo se verifica desde el gas caliente hasta la superficie del sólido por convección y desde la superficie hacia el gas caliente por transferencia de masa. Así, en un instante dado puede formularse un equilibrio dinámico entre la velocidad de transferencia de calor y la velocidad de eliminación del líquido de la manera siguiente.

La velocidad de transferencia de calor por convección  $q_c$ , desde el gas a la temperatura  $T$ , hasta la temperatura de la superficie del sólido  $T_w$  es.

$$q_c = h_c (T - T_w) A \quad \dots \dots \dots (1.9)$$

La ecuación del flux de transferencia del vapor de agua desde la superficie se establece como

$$N_A = k_v (y_w - y) \quad \dots \dots \dots (1.10)$$

donde  $y_w$  es la fracción mol del vapor de agua en el gas en la superficie. La relación entre la humedad del aire y la fracción mol esta dada por la ecuación 1.11

$$y = \frac{Y / M_A}{1 / M_B + Y / M_A} \quad \dots \dots \dots (1.11)$$

$M_A$  y  $M_B$  son el peso molecular del agua y aire respectivamente

Puesto que la humedad del aire es pequeña, se puede establecer como una aproximación quedando

$$y = \frac{Y M_B}{M_A} \quad \dots \dots \dots (1.12)$$

$$y \quad y_w = \frac{Y_w M_B}{M_A} \quad \dots \dots \dots (1.13)$$

Sustituyendo las ecuaciones 1.12 y 1.13 en la ecuación 1.10 resulta :

$$N_A = k_y \frac{M_B}{M_A} (Y_w - Y) \quad \dots \dots \dots (1.14)$$

La cantidad de calor necesario para vaporizar  $N_A$  moles de agua, despreciando los pequeños cambios de calor sensible es:

$$q_c = M_A N_A \lambda_w A \quad \dots \dots \dots (1.15)$$

Entonces igualando las ecuaciones 1.9 y 1.15 y sustituyendo  $N_A$  según la ecuación 1.14 se tiene

$$q_c = h_c (T - T_w) A = M_A N_A \lambda_w A \quad \dots \dots \dots (1.16)$$

$$h_c (T - T_w) A = M_A k_y \frac{M_B}{M_A} (Y_w - Y) \lambda_w A \quad \dots \dots (1.17)$$

$$h_c \frac{(T - T_w)}{\lambda_w} = k_y M_B (Y_w - Y) = \frac{q_c}{A \lambda_w} = R_c \quad \dots \dots (1.18)$$

$$R_c = h_c \frac{(T - T_w)}{\lambda_w} \quad \dots \dots \dots (1.19)$$

En ausencia de la transferencia de calor por conducción y por radiación, la temperatura del sólido está a la temperatura del bulbo húmedo del aire durante el periodo de secado de velocidad constante

Al sustituir la ecuación 1.18 en la ecuación 1.8 y junto con la ecuación 1.9 el tiempo de secado durante el periodo de velocidad constante resulta

$$t_c = \frac{W_2 - (X_1 - X_2)}{A \lambda_w} = \frac{W_2 - \lambda_w (X_1 - X_2)}{A h_c (T - T_w)} \quad \dots (1.20)$$

$$t_c = \frac{W_{s,s}(X_1 - X_2)}{A k_y M_B (Y_w - Y)} \dots \dots \dots (1.21)$$

**1.6 Métodos para determinar el tiempo de secado en el periodo de velocidad decreciente.**

**1.6.1 Método que emplea la integración gráfica.**

El tiempo de secado para cualquier región entre  $X_1$  y  $X_2$  está dado por:

$$t = \frac{W_{s,s}}{A} \int_{X_1}^{X_2} \frac{-dX}{R} \dots \dots \dots (1.22)$$

Durante el periodo de velocidad decreciente,  $R$  varía y por lo tanto la ecuación 1.22 puede integrarse gráficamente para cualquier forma de la curva de secado de velocidad decreciente, trazando valores de  $1/R$  en función de  $X$  y determinando el área bajo la curva

**1.6.2 Método de cálculo para casos especiales en la región de velocidad decreciente.**

La ecuación para predecir el tiempo de secado, ecuación 1.22, puede integrarse analíticamente en los siguientes casos

1. La velocidad es una función lineal de  $X$  Si  $R$  es lineal con respecto a  $X$ , como sucede con los sólidos porosos, durante el periodo de velocidad decreciente se tiene

$$R = aX + b \dots \dots \dots (1.23)$$

donde  $a$  y  $b$  son constantes. Diferenciando  $R$  con respecto a  $X$  resulta,

$$dR = a dX \dots \dots \dots (1.24)$$

Entonces, el tiempo de secado en el periodo de velocidad decreciente  $t_d$  resulta al sustituir el valor de  $dX$  en la ecuación 1.22

$$t_d = \frac{W_{s,s}}{a A} \int_{R_f}^{R_i} \frac{dR}{R} = \frac{W_{s,s}}{a A} \ln \frac{R_i}{R_f} \dots \dots \dots (1.25)$$

donde  $R_i$  y  $R_f$  son las velocidades inicial y final del periodo decreciente, respectivamente; y la constante  $a$  es la pendiente de la curva de velocidad de secado y ésta puede escribirse como.

$$a = \frac{R' - R''}{X' - X''} \dots \dots \dots (1.26)$$

donde  $R'$  y  $X'$  son la velocidad de secado y el contenido de humedad en el primer punto crítico, respectivamente (punto C de las figuras 1); en tanto que  $R''$  y  $X''$  son la velocidad de secado y el contenido de humedad en el segundo punto crítico ( punto D), respectivamente.

Sustituyendo la ecuación 1.26 en la ecuación 1.25 resulta:

$$t = \frac{W_{s,s} (X' - X'')}{A (R' - R'')} \ln \frac{R_i}{R_f} \dots \dots \dots (1.27)$$

Si el proceso de secado incluye tanto el periodo de velocidad constante como el periodo de velocidad decreciente, el valor de  $X_2$  en la ecuación 1.8 es igual a  $X'$  y el valor de  $R_1$  de la ecuación 1.27 resulta ser  $R'$ . Entonces el tiempo total de secado es

$$t = t_c + t_d = \frac{W_{s,s}}{A} \left[ \frac{X_1 - X'}{R'} + \frac{X' - X''}{R' - R''} \right] \ln \frac{R_i}{R_f} \dots \dots \dots (1.28)$$

donde  $R' = R_c$

La velocidad de secado en el periodo de velocidad constante  $R_c$  es igual en valor al primer punto crítico,  $R_c = R'$

2. La velocidad es una función lineal que pasa a través del origen. En algunas situaciones, una recta proyectada desde el contenido crítico de humedad pasando a través del origen, representa la totalidad del periodo de velocidad decreciente, esto puede observarse en una gráfica de velocidad de secado R en función de la humedad X. Entonces, se tienen las siguientes consideraciones:

$$a = \frac{R'}{X'} \quad , \quad \frac{R'}{R_f} = \frac{X'}{X_f} \quad \text{y} \quad R' = R_c \quad \dots \dots \dots (1.29)$$

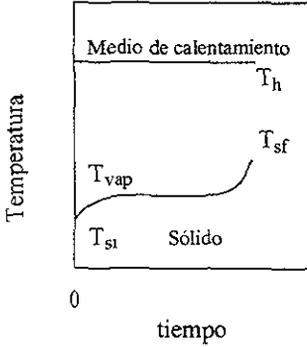
$$t = t_c + t_a = \frac{W_{s,s}(X_1 - X')}{A R_c} + \frac{W_{s,s}}{a A} \ln \frac{R'}{R_f} \quad \dots \dots \dots (1.30)$$

$$t = \frac{W_{s,s}}{A R_c} \left[ (X_1 - X') + X' \ln \frac{R'}{R_f} \right] \quad \dots \dots \dots (1.31)$$

$$t = \frac{W_{s,s}}{A R_c} \left[ (X_1 - X') + X' \ln \frac{X'}{X_f} \right] \quad \dots \dots \dots (1.32)$$

**1.7 Transferencia de calor en secadores discontinuos.**

La variación de la temperatura en un secador depende de la naturaleza y del contenido del líquido del material a secar, de la temperatura del medio de calentamiento y del tiempo de secado. El perfil típico de la temperatura en un secador adiabático que opera de manera discontinua se indica en la figura 3 <sup>(13)</sup>. Con un medio de calentamiento donde la temperatura es constante, la temperatura del sólido húmedo se incrementa desde un valor inicial T<sub>si</sub> hasta llegar a la temperatura de vaporización T<sub>vap</sub>. En los procesos adiabáticos la temperatura de vaporización sucede a la temperatura de bulbo húmedo del aire. Si el proceso de secado no es adiabático T<sub>vap</sub> es superior a la temperatura de bulbo húmedo. La temperatura de vaporización es siempre inferior a la temperatura de calentamiento y puede prolongarse por un periodo de tiempo considerable.



Hacia la etapa final del ciclo de secado, la temperatura del sólido se incrementa hasta una temperatura  $T_{sf}$ , la cual puede exceder ligeramente a  $T_{vap}$  o ser significativamente superior

Fig. 3. Perfil de temperaturas en un secador discontinuo.

El calor necesario para secar un material húmedo debe incluir el calentamiento de las etapas siguientes.

1. Calentamiento del sólido y del líquido a la temperatura de vaporización
2. Vaporización del líquido.
3. Calentamiento del sólido y del vapor a su temperatura final.

La cantidad de calor requerido en las etapas 1 y 3 es despreciable comparada con la cantidad de calor necesaria para vaporizar el líquido (etapa 2). La transferencia de calor se puede entonces calcular de la siguiente manera <sup>(13)</sup>. Si  $W_{s,s}$  es la masa del sólido seco por unidad de tiempo,  $X_i$  y  $X_f$  son los contenidos inicial y final de la masa del líquido por unidad de masa del sólido seco, respectivamente; entonces la cantidad total de calor transferida por unidad de masa del sólido  $q_{a-s} / W_{s,s}$ , estará dada por:

$$\frac{q_{a-s}}{W_{s,s}} = C_{ps} (T_{sf} - T_{si}) + X_i C_{pL} (T_{vap} - T_{si}) + (X_i - X_f) \lambda_{vap} + X_f C_{pL} (T_{sf} - T_{vap}) + (X_i - X_f) C_{pV} (T_{vf} - T_{vap}) \quad \dots \quad (133)$$

donde  $q_{a-s}$  es el calor transferido del aire al sólido,  $T_{vf}$  es la temperatura final del vapor, y  $C_{ps}$ ,  $C_{pL}$  y  $C_{pV}$  son el calor específico del sólido, del líquido y del vapor, respectivamente

La ecuación 1.33 considera que el calor específico y el calor de vaporización son constantes y que toda la vaporización ocurre a  $T_{vap}$ . Estas condiciones suceden rara vez, sin embargo la ecuación 1.33 resulta ser una buena aproximación para predecir la transferencia de calor desde el aire hacia el sólido.

En un secador adiabático  $T_{gf}$  es la temperatura del aire a la salida del secador. El calor transferido al sólido, al líquido y al vapor se establece con la ecuación 1.33; el gas entonces perderá calor sensible y se enfriará mientras la humedad evaporada absorbe el calor latente de vaporización. Por lo tanto, el calor transferido al gas de secado por el medio de calentamiento estará dado por

$$q_{hg} = m_g (1 + y) C_{gj} (T_{gi} - T_{gf}) \quad \dots \dots \dots (1.34)$$

donde  $m_g$  es la velocidad másica del gas seco, y  $C_{gj}$  es la capacidad calorífica del gas húmedo a la entrada del secador. La fracción mol del vapor en el gas ( $y$ ), está definida como

$$y = \frac{Y_i / M_A}{1 / M_B + Y_i / M_A} \quad \dots \dots \dots (1.35)$$

donde  $Y_i$  es la humedad del gas al inicio del secador,  $M_A$  es el peso molecular del vapor, y  $M_B$  es el peso molecular del gas seco<sup>(13)</sup>.

**1.8 Transferencia de masa en secadores.**

En todos los secadores en los cuales el flujo del gas es paralelo o transversal a la superficie de secado, la vaporización del líquido tiene lugar en la superficie del sólido o en el interior del material. La velocidad de vaporización  $m_v$ , puede calcularse con la siguiente relación<sup>(13)(5)</sup>

$$m_v = W_{ss} (X_i - X_f) \quad \dots \dots \dots (1.36)$$

Si el gas de secado entra a la humedad  $Y_i$ , la humedad de salida  $Y_f$  estará dada por

$$Y_f = Y_i + \frac{W_{ss}(X_i - X_f)}{m_g} \quad \dots \dots \dots (1.37)$$

$$Y_f = Y_i + \frac{m_v}{m_g} \dots \dots \dots (1.38)$$

El cálculo de la velocidad de vaporización mediante la ecuación 1.36 no resulta ser confiable. Un cálculo exacto requiere del conocimiento del mecanismo de movimiento del líquido y del vapor a través del sólido, y además se debe considerar el equilibrio dinámico que se establece entre la velocidad de suministro de calor desde el gas y la velocidad de eliminación de la humedad desde el sólido.

**1.9 Cálculo del valor de la velocidad de secado durante el periodo de velocidad de secado constante.**

Atendiendo a la difusión del vapor, la evaporación por unidad de superficie o velocidad de secado  $R_c$  vendrá dada por:

$$R_c = k_y (Y_1 - Y) \dots \dots \dots (1.39)$$

siendo  $k_y$  el coeficiente de transporte de materia;  $Y$ , la humedad en el seno del aire e  $Y_1$  la humedad en la interfase.

Atendiendo a la intensidad de paso de calor, si el calor se emplea exclusivamente en evaporar la humedad, la velocidad de secado vendrá dada por:

$$R_c = \frac{U}{\lambda_i} (T - T_i) \dots \dots \dots (1.40)$$

siendo  $U$  el coeficiente integral de transmisión de calor;  $\lambda_i$ , es el calor latente de vaporización del líquido a la temperatura de interfase  $T_i$  y  $T$  es la temperatura en el seno del aire. La ecuación de transporte es análoga a las deducidas en relación con el estudio de la temperatura húmeda.

Normalmente se hace uso de la ecuación 1.40, ya que el error en la determinación de  $T_i$  afecta a  $(T - T_i)$  menos que el error de  $Y_i$  al término  $(Y_i - Y)$ . Por otra parte, pueden conocerse con mayor seguridad los coeficientes de la ecuación 1.40, cuyo cálculo se indica a continuación.

**Coficiente integral de transmisión de calor .-** El valor de este coeficiente depende del mecanismo de transferencia de calor al cuerpo húmedo

a) Si la transmisión de calor se efectúa solamente por convección del aire a la superficie húmeda

$$U = h_c \quad \dots \dots \dots (1.41)$$

siendo  $h_c$  el coeficiente de convección en las condiciones de trabajo, que para la mezcla aire-agua puede calcularse a partir de las expresiones siguientes:

Para el flujo de aire paralelo a la superficie y valores de  $G$  comprendidos entre 2 500 y 30 000  $\text{kg/h m}^2$  <sup>(9)(11)</sup>:

$$h_c = 0.0176 G^{0.8} \text{ (kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C)} \quad \dots \dots \dots (1.42)$$

Para flujo de aire paralelo a una superficie lisa de longitud  $L$ , el valor medio de  $h_c$  viene dado por

$$\text{Nu}_m = \frac{h_c L}{k} = 0,664 \text{ Re}^{1/2} \text{ Pr}^{1/3} \quad \text{Re} = \frac{u \rho L}{\mu} \leq 100\,000 \quad (1.43)$$

$$\text{Nu}_m = \frac{h_c L}{k} = 0,057 \text{ Re}^{0,78} \text{ Pr}^{0,78} \quad \text{Re} \geq 500\,000 \quad (1.44)$$

Con superficies rugosas, deberá tomarse para  $h_c$  un valor superior en un 5% al calculado por estas ecuaciones.

Para flujo de aire perpendicular a la superficie, con valores de  $G$  comprendidos entre 4 000 y 20 000  $\text{kg/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$  puede emplearse la ecuación <sup>(9)</sup>:

$$h_c = G^{0.37} \text{ kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \quad \dots \dots \dots (1.45)$$

**b)** Si la transmisión de calor se efectúa por convección y radiación, el coeficiente integral viene dado por

$$U = h_c + h_R \quad \dots \dots \dots (1.46)$$

En el caso particular de secaderos de bandejas, a la superficie de las bandejas llega calor por convección desde el aire, por radiación de la bandeja superior, y por conducción a través del material. Admitiendo que los coeficientes  $h_c$  y  $h_R$  son los mismos para las superficies de las bandejas y el material, se llega a la expresión

$$U = (h_c + h_R) \left[ 1 + \frac{1}{1 + \frac{L}{k} (h_c + h_R)} \right] \quad (1.47)$$

siendo  $L$  el espesor del material húmedo y  $k$  su conductividad calorífica

### 1.9.1 Condiciones de interfase.

Aunque las condiciones de interfase ( $T_i$ ;  $Y_i$ ) permanecen constantes en este periodo, su valor depende del mecanismo de transmisión de calor.

a) Si el calor llega exclusivamente por convección a la superficie húmeda, las condiciones de interfase son prácticamente las mismas que las de la temperatura húmeda del aire, y se deducen del diagrama psicrométrico. Es decir, la temperatura de la superficie del sólido permanece constante en un valor sensiblemente igual a la temperatura húmeda del aire. En realidad siempre hay transmisión de calor por radiación y conducción a la superficie mojada, y la temperatura de esa superficie será un poco mayor que la temperatura húmeda del aire (del orden de  $2^\circ\text{C}$ ).

b) Si la superficie húmeda recibe calor por radiación y conducción además de la convección, la temperatura de la superficie estará comprendida entre la temperatura húmeda y la temperatura de ebullición del agua o líquido a evaporar.

### 1.10 Efecto de diferentes variables sobre la velocidad de secado dentro del periodo de velocidad de secado constante.

#### D) Velocidad del aire.

Si la radiación y la conducción a través del sólido son despreciables,  $R_c$  es proporcional a  $G^{0,8}$ , para flujo paralelo a la superficie y a  $G^{0,37}$  cuando el flujo es perpendicular, de acuerdo con las ecuaciones 1.42 y 1.45. Si la radiación y la conducción son significativas, el efecto de la velocidad del gas suele ser poco importante.

A velocidad de aire constante,  $h_c$  y  $k$ , no son afectados, siendo el efecto principal sobre la fuerza de impulsión  $(T_g - T_i)$  o  $(p_i - p_g)$ .

#### II) Temperatura del aire.

Al aumentar la temperatura del aire aumenta la magnitud  $(T - T_i)$  y por lo tanto, aumenta  $R_c$ . En ausencia de efectos de radiación y despreciando la variación del calor latente de vaporización para intervalos moderados de temperatura,  $R_c$  es proporcional a  $(T - T_i)$  de acuerdo con la ecuación 1.40.

#### III) Humedad del aire.

$R_c$  varía directamente con  $(Y_i - Y)$  así que, al aumentar la humedad ( $Y$ ) disminuye la velocidad de secado. Generalmente las variaciones de  $Y$  y  $T$  implican variaciones simultáneas de  $T_i$  e  $Y_i$  y los efectos se estiman por aplicación directa de la ecuación

$$R_c = k_y (Y_i - Y) = \frac{(h_c + U_k)(T - T_i) + h_R(T_R - T_i)}{\lambda_i} \quad (1.48)$$

#### IV) Espesor del sólido.

Al aumentar el espesor del sólido disminuye el área de contacto por unidad de volumen y, por consiguiente, disminuye la velocidad de secado.

### 1.11 Conceptos de humedad.

#### I) Humedad.

El contenido de humedad de un sólido puede expresarse sobre base seca o base húmeda. En los cálculos de secado resulta más conveniente referir la humedad a base seca, debido a que ésta permanece constante a lo largo del proceso de secado. Por tanto, a no ser que se indique lo contrario, entenderemos por humedad de un sólido el peso de agua que acompaña a la unidad de peso de sólido seco.

#### II) Humedad de equilibrio.

Cuando un sólido húmedo se pone en contacto, durante tiempo suficiente, con aire de temperatura y humedad determinadas y constantes (suponiendo que la cantidad de aire es lo suficientemente grande para que sus condiciones no varíen con el tiempo de contacto) se alcanzarán las condiciones de equilibrio entre el aire y el sólido húmedo.

El vapor de agua que acompaña al aire ejerce una presión de vapor determinada; se alcanzan las condiciones de equilibrio cuando la presión parcial del agua que acompaña al sólido húmedo es igual a la presión de vapor del agua en el aire. Se denomina humedad de equilibrio del sólido a la humedad alcanzada por el sólido en equilibrio con el aire en las condiciones dadas. La humedad de equilibrio,  $X^*$ , es el límite al que puede llevarse el contenido de humedad de una sustancia por contacto con aire de humedad y temperatura determinada.

Si la humedad del sólido es mayor que la de equilibrio, el sólido se secará hasta alcanzar la humedad de equilibrio, mientras que si su humedad es menor que la de equilibrio absorberá agua del aire hasta que alcance las condiciones de equilibrio.

Para condiciones dadas del aire la humedad de equilibrio es función de la naturaleza del cuerpo, del estado de su superficie y de la temperatura.

#### III) Humedad libre.

Se denomina humedad libre a la humedad contenida por una sustancia en exceso de la humedad en el equilibrio  $X - X^*$ . Solo puede evaporarse la humedad libre, el contenido de humedad libre de un sólido depende de la concentración del vapor en el aire o gas.

#### IV) Humedad ligada.

Se refiere a 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.

#### V) Humedad no ligada.

Es la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad ligada; o bien la humedad libre del sólido en contacto con aire saturado. Es evidente que si el sólido tiene humedad desligada se comportará como húmedo.

Estas relaciones se muestran en forma gráfica en la figura 4, para un sólido con un contenido de humedad  $X$  expuesto a un gas de humedad relativa  $Y_R$ .

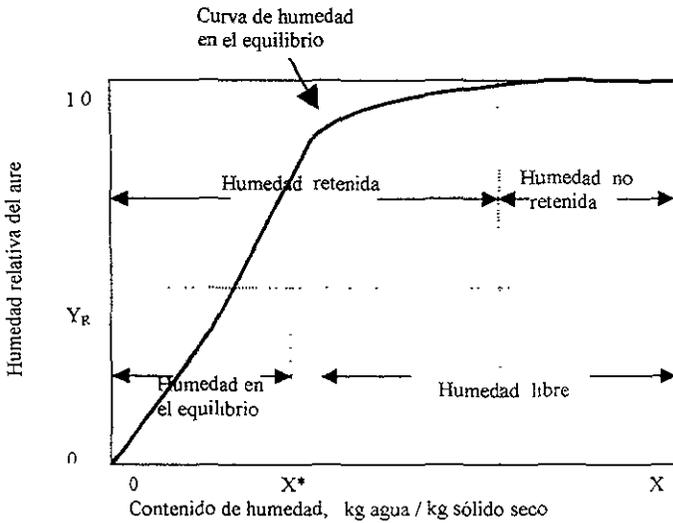


Fig 4 Tipos de humedad.

### 1.12 Aplicación de la psicrometría al secado.

En el proceso de secado, la temperatura y la velocidad a las cuales se produce la vaporización del líquido dependen de la concentración del vapor en la atmósfera circundante. Es por ello que el uso de la carta psicrométrica en la operación de secado (figura 2.7), resulta de utilidad en el conocimiento de los cambios que se verifican cuando el aire se pone en contacto con los sólidos húmedos para secarse. En casi todas las operaciones de secado, el agua es el líquido evaporado y el aire es el gas que se emplea comúnmente para eliminar la humedad. Una carta de humedad generalmente incluye los siguientes parámetros

1. La línea de temperatura de bulbo húmedo o de saturación, indica la cantidad de vapor de agua que puede llevar un kilogramo de aire seco en la intersección con la temperatura de bulbo seco mostrada en la abscisa a la humedad de saturación. En la mezcla de aire- agua, la presión parcial del vapor de agua es igual a la presión del vapor de agua a la temperatura establecida. La humedad de saturación  $Y_{sat}$  se define por la siguiente expresión

$$Y_{sat} = \frac{P^\circ}{P - P^\circ} \cdot \frac{18}{29} \quad (1.49)$$

donde  $P^\circ$  es la presión de vapor del agua a  $T_{sat}$ ;  $P$  es la presión absoluta en el secador, y  $18 / 29$  es la relación de los pesos moleculares del agua respecto al del aire. Del mismo modo, la humedad en cualquier condición menor que el nivel de saturación se obtiene con

$$Y = \frac{p}{P - p} \cdot \frac{18}{29} \quad (1.50)$$

donde  $p$  es la presión parcial de agua en el aire.

2. Las líneas de porcentaje de humedad relativa  $Y_R\%$  indican la cantidad de saturación de la mezcla de aire-vapor de agua a través de presiones parciales:

$$Y_{R\%} = 100 \frac{p}{P^\circ} \quad (1.51)$$

3. La capacidad calorífica del aire húmedo  $C_a$  es la cantidad de calor necesaria para elevar en un grado la temperatura de la mezcla de aire-vapor de agua. En unidades de S.I  $C_a$  está definido como

$$C_a = 1.005 + 1.884 (Y) \quad (1.52)$$

4. El volumen húmedo  $V_{H1}$  de la mezcla aire vapor de agua en unidades del S.I es

$$V_{H1} = (0.00283 + 0.00456(Y)) T \quad (1.53)$$

Las líneas de temperatura de bulbo húmedo representan también las líneas de saturación adiabática para el aire y el vapor de agua, y se basan en la siguiente relación

$$Y_{sat} - Y = \frac{C_a}{\lambda_{sat}} (T - T_{sat}) \quad (1.54)$$

donde la pendiente de la curva de saturación adiabática es la relación  $C_a / \lambda_{sat}$

La temperatura de bulbo húmedo se establece por el equilibrio dinámico entre la transferencia de calor y la transferencia de masa cuando el líquido se evapora desde una masa pequeña (por ejemplo el bulbo húmedo de un termómetro) hacia una masa de gas muy grande, de tal manera que ésta última no sufre ningún cambio de temperatura o de humedad. Este equilibrio se explica por medio de la relación siguiente

$$h_c (T - T_w) = k_y \lambda_w (Y_w - Y) \quad (1.55)$$

en donde  $h_c$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección,  $T_w$  es la temperatura de bulbo húmedo del aire, y  $k_y$  es el coeficiente de transferencia de masa

Para la mezcla de aire-vapor de agua, la relación  $h_c / k_y$  es igual que  $C_a$ . Por lo tanto, en vista de que la razón  $(Y_w - Y)/(T_w - T)$  es igual que  $(h_c/k_y)/\lambda_w$  que representa la pendiente de las líneas de temperatura de bulbo húmedo, también es igual que  $C_a/\lambda_{sat}$  la pendiente de las líneas de saturación adiabática.

### 1.13 Aplicación de la ecuación del gas ideal.

La ecuación del gas ideal se utilizó para obtener la densidad del aire de la manera siguiente:

$$PV = nRT \quad (1.56)$$

$$PV = \frac{m}{P.M} RT \quad (1.57)$$

$$\frac{m}{V} = \frac{(P)(P.M.)}{RT} \quad (1.58)$$

$$\rho = \frac{(P)(P.M.)}{RT} \quad (1.59)$$

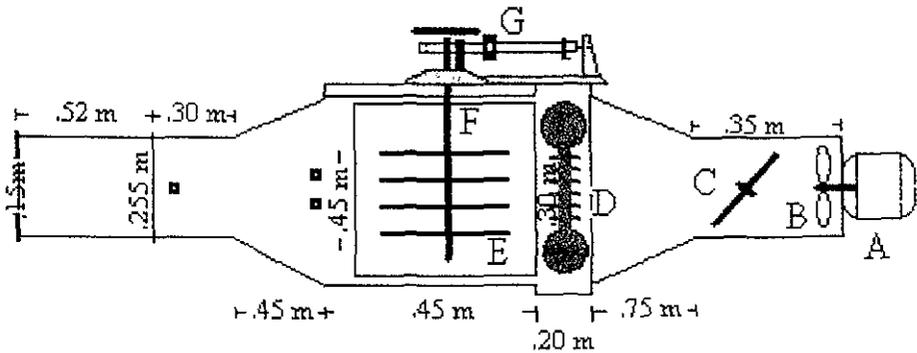
En el apéndice D se muestra una memoria de cálculo.

## CAPITULO 2 PRUEBAS DE SECADO

### 2.1 Descripción del secador.

El presente trabajo se desarrolló en un secador de charolas, ubicado en el laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química.

El secador está construido por paredes metálicas de acero inoxidable; las partes del secador se mencionan y se aprecian en la figura 2.1 .



- A - Motor del ventilador.
- B - Ventilador.
- C - Disco (para control de flujo de aire)
- D - Banco de tubos aletados
- E - Charolas.
- F - Columpio o soporte de las charolas
- G - Báscula

Figura 2.1 Secador de charolas

Se puede decir que el secador consta de tres secciones. En la primera sección, que es una sección circular, fluye el aire de entrada impulsado por el ventilador y cuya velocidad puede ser controlada por un disco o mariposa que puede cerrar el conducto.

La segunda sección es el armario o gabinete donde se colocan las charolas en un columpio que está fijo a una báscula tipo granataria que sirve para pesar el material húmedo durante el transcurso del secado. Las charolas se introducen al secador por una pequeña puerta que se encuentra a un costado. En ésta misma sección se encuentra el banco de diez tubos aletados colocados en forma vertical que pueden calentar el aire cuando hace contacto de forma cruzada para después dirigirse sobre el material húmedo colocado en las charolas.

La tercera sección lo forma un conducto circular por donde sale el aire

El aire se hace llegar por medio de un ventilador axial que opera con un motor de 0.7 amperios y 2700 RPM que se sitúa al inicio del secador.

Las condiciones de secado se controlan o se fijan en base a la temperatura del aire caliente que es calentado cuando cruza el banco de tubos y estos a su vez por el flujo de vapor por su interior, este flujo de vapor es fijado y controlado por una válvula de paso. Otra de las condiciones que puede hacerse variar del proceso es el flujo de aire controlado por una mariposa de obstrucción que fija también una velocidad de aire.

El vapor utilizado proviene de una caldera situada en otra sección del laboratorio que maneja vapor de baja presión, hasta  $5 \text{ kg/cm}^2$ .

Las charolas se introducen con el material húmedo al secador y son cuatro charolas de  $19\text{cm} \times 19\text{cm} \times 1\text{cm}$  de profundidad las que pueden colocarse dentro del secador. Esto indica que el área del material expuesta al secado es de  $19\text{m} \times 19\text{m} \times 4$  charolas =  $0.1444 \text{ m}^2$ , dato que se utiliza para estimar las velocidades de secado con la ecuación (1.5) tomando en cuenta que el material ocupa todo el espacio en las charolas

## 2.2 Mediciones y cálculos preliminares.

En esta parte experimental se realizaron las siguientes mediciones y cálculos. medición de velocidades de aire que pueden trabajarse en el equipo y el planteamiento para la construcción de una carta psicrométrica

### 2.2.1 Velocidad del aire de secado.

La medición de la velocidad del aire de secado se hizo con un micromanómetro tipo consola (equipo localizado en el laboratorio de ingeniería química)

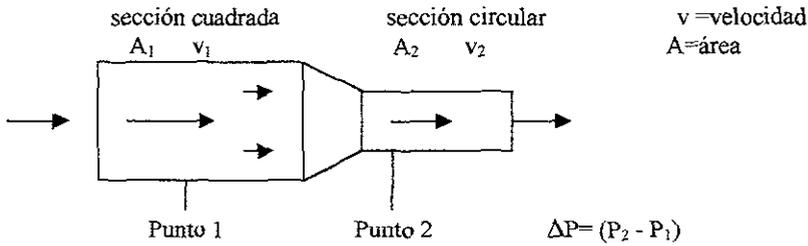


Figura 2.2 Puntos de medición para tomar la caída de presión.

La estimación de la velocidad de aire se hizo a partir de la ecuación de continuidad y la de Bernoulli, considerando pérdidas por fricción mínimas.

por continuidad:  $\rho_1 m_1 = \rho_2 m_2$  (2.1)

$$A_1 v_1 \rho_1 = A_2 v_2 \rho_2$$
 (2.2)

si  $\rho_1 = \rho_2 = \rho_{cte}$   $A_1 v_1 = A_2 v_2$  (2.3)

Para fluidos compresibles se puede utilizar la ecuación de Bernoulli junto con las consideraciones siguientes:

$$W = 0 \quad (\text{energía mecánica})$$

$$\Sigma F \cong 0 \quad (\text{mínimas pérdidas por fricción})$$

$$z_1 g_1 + \frac{v_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} = z_2 g_2 + \frac{v_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho}$$
 (2.4)

si  $z_1 = z_2$  y  $g_1 = g_2$

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho}$$
 (2.5)

Utilizando la ecuación de continuidad (ec. 2.3)  $v_2 = v_1 A_1 / A_2$  y sustituyendo en la ecuación 2.5

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} = \frac{v_1^2 A_1^2 / A_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho}$$
 (2.6)

Desarrollando la ecuación para dejarla en términos de  $v_1$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2(P_2 - P_1)(g_c)}{\rho \left( (A_1/A_2)^2 - 1 \right)}} \quad (2.7)$$

La ecuación desarrollada (ec 2.7) es la utilizada para estimar la velocidad del aire en la sección donde se encuentran las charolas con el material húmedo

Análisis dimensional para la ecuación 2.7 en S.I.

$$v = \sqrt{\frac{(kg_f / m^2)(kg_m \cdot m / kg_f \cdot s^2)}{(kg_m / m^3)}} = \sqrt{m^2/s^2} = m/s \quad (2.8)$$

$v_1$  es la velocidad del aire que hace contacto con el material húmedo. Para hacer la medición se colocaron las dos sondas del micromanómetro en los puntos ubicados en el equipo y marcados como punto 1 y punto 2 (indicados en la figura 2.2). El micromanómetro nos da una lectura que representa la diferencia de presión entre el punto 1 y el punto 2. Este valor se sustituyó posteriormente en la ecuación 2.7.

De otra manera y para verificar se tomó la lectura del micromanómetro cuando se colocó una sonda en el primer punto y se dejó abierta la segunda sonda a presión atmosférica, que permanece constante en el lugar de trabajo. Trabajando de la misma manera para el punto 2 se obtuvo un segundo valor de presión con el que se pudo hacer la diferencia de presión  $\Delta P$ .

### 2.2.2 Estimación de $\Delta P$ .

La velocidad del aire en el equipo puede ser manipulada por un disco que puede obstruir el paso del aire y este disco es manejado por una manija que puede ser fijada en una de las seis diferentes posiciones (fig 2 3).

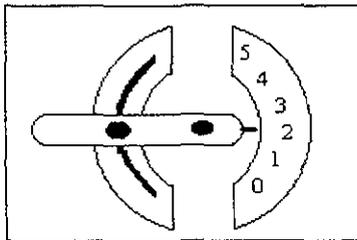


Figura 2 3 Manija deslizante del secador

Tabla 2.1 Lecturas de  $\Delta P$  tomadas del micromanómetro en las seis diferentes posiciones de la manija.

Posición de la manija	$\Delta P$ (mmH <sub>2</sub> O)
5 (abierto)	4
4	4
3	4
2	2
1	1
0 (cerrado)	1

Por los valores obtenidos de  $\Delta P$  en las diferentes posiciones de la manija, en la tabla 2.1, se observa un mismo valor de  $\Delta P$  para la posición de manija en 5, 4 y 3, esto nos indica que se está manejando casi la misma velocidad de aire en estos tres puntos. Es suficiente tomar solo una (posición 5) para hacer las pruebas de secado junto con las velocidades dadas por las posiciones de la manija en 2 y 1 (tabla 2.3).

Tabla 2.3 Valores de  $\Delta P$  utilizados para las pruebas de secado.

Posición de la manija	$\Delta P$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P$ (kgf/m <sup>2</sup> )
5	4	4.132
2	2	2.066
1	1	1.033

La conversión de mm H<sub>2</sub>O a kgf/m<sup>2</sup> se muestra en el apéndice E

### 2.2.3 Determinación de áreas de sección transversal del secador.

La parte del equipo analizada para determinar las velocidades del aire consta de dos diferentes secciones como se observa en la figura 2.2

Para completar los datos de la ecuación 2.7, se tomaron las áreas transversales de estas dos secciones, tanto de la cuadrada como de la circular (fig. 2.4).

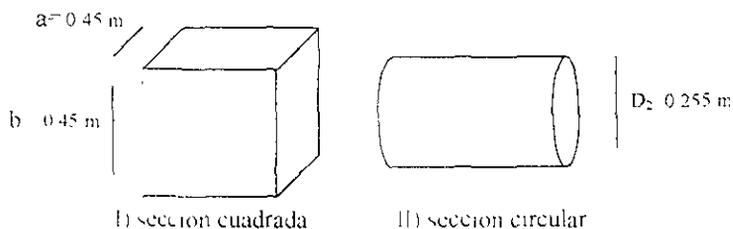


Figura 2.4 Geometría del secador

I) Por lo tanto el área transversal para esta sección cuadrada es:

Se utilizó la ecuación 2.9 para obtener el diámetro equivalente (De) de este conducto<sup>(16)</sup>

$$De = \frac{1.3(a b)^{3/8}}{(a + b)^{1/4}} \quad (2.9)$$

donde los valores correspondientes de a y b (figura 2.4 sec. I) se manejaron en "pulgadas" (a= b= 0.45 m = 17 716 plg) De ésta manera, De = 19.367 plg = 0.492 m

$$A_1 = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.492m)^2}{4} = 0.19 \text{ m}^2$$

II) Para la sección circular el área transversal es:

$$A_2 = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.255m)^2}{4} = 0.051 \text{ m}^2 \quad (2.10)$$

Se sustituyeron estos valores de área transversal en la ecuación 2.7 para encontrar las velocidades de aire  $v_1$ , que es el valor de la velocidad del aire en el gabinete dado en función de los valores de  $\Delta P$  y la densidad del aire a la temperatura correspondiente, ya que  $g_c$  es el factor de conversión gravitacional de valor constante ( $9.8 \text{ kg}_m \text{ m} / \text{kg}_f \text{ s}^2$ ).

### 2.3 Valores de velocidad de aire manejados dentro del equipo.

Con la ecuación 2.7, las velocidades de aire manejadas en el equipo se dan como lo indica la tabla 2.4

Tabla 2.4 Valores de velocidad de aire.

$\Delta P$ ( $\text{kg}_f/\text{m}^2$ )	$T_{\text{prom. aire}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\rho_{\text{aire}}$ ( $\text{kg}_m/\text{m}^3$ )	$v$ ( $\text{m}/\text{s}$ )	$v$ (m/s) (valor utilizado)
4 132	69	0.796	2.81	<b>2.8</b>
2 066	61	0.815	1.96	<b>2.0</b>
1 033	59	0.82	1.38	<b>1.4</b>

En el apéndice E se muestra una memoria de cálculo para obtener las velocidades de aire dentro del secador, con la ecuación 2.7

### 2.4 Carta Psicrométrica.

Se utilizó el sistema aire-vapor de agua para el planteamiento de la construcción de la carta de humedad a la presión absoluta de 585 mmHg, con las temperaturas que predominan en el túnel de secado

Las líneas de humedad relativa se obtienen de la siguiente manera. Al despejar la presión

parcial de la ecuación ( 1.51) y al sustituirla en la ecuación (1 50 ) para llegar a

$$Y = \frac{(Y_R\% P^o)}{P - (Y_R\% P^o)} \frac{18}{29} \quad (2.11)$$

entonces al asignar valores para la humedad relativa  $Y_R\%$  y evaluando la presión de vapor del agua  $P^o$  para el rango de temperaturas establecido, se obtienen valores de  $Y$  en función de  $Y_R\%$

Las líneas de bulbo húmedo se calculan mediante la ecuación (1 54)

$$Y_{sat} - Y = \frac{C_a}{\lambda_{sat}} (T - T_{sat}) \quad (1.54)$$

Al fijar un valor de  $T_{sat}$  , se obtiene tanto el valor de la presión de vapor a esta temperatura como el calor latente de vaporización; entonces, se calcula el valor de  $Y_{sat}$  mediante la ecuación ( 1 49 ).

$$Y_{sat} = \frac{P^o}{P - P^o} \frac{18}{29} \quad (1.49)$$

A continuación, se supone un valor de  $Y$  y se calcula la capacidad calorífica del aire húmedo mediante la ecuación (1 52).

$$C_a = 1.005 + 1.884 (Y) \quad (1.52)$$

Se resuelve entonces la ecuación (1 54) para  $T$  y con este valor se verifica el valor de  $Y$  supuesto

Todas las propiedades del sistema aire-agua se grafican en los diagramas psicrométricos o cartas de humedad, que tienen la forma de la figura 2 5 y 2.6<sup>(15)(18)</sup>

La carta psicrométrica empleada en este trabajo corresponde a la presión de 585 mm Hg y se aprecia en la figura 2 7

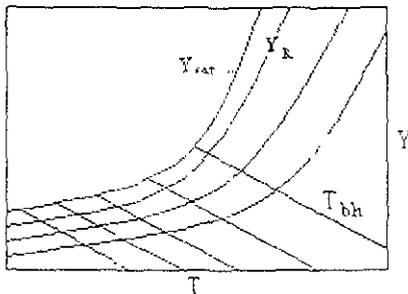


Figura 2 5 Forma de la carta psicrometrica

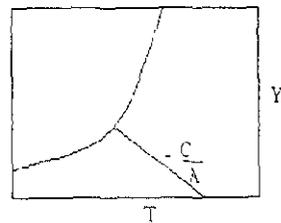


Figura 2 6 Carta psicrometrica

# carta psicrométrica

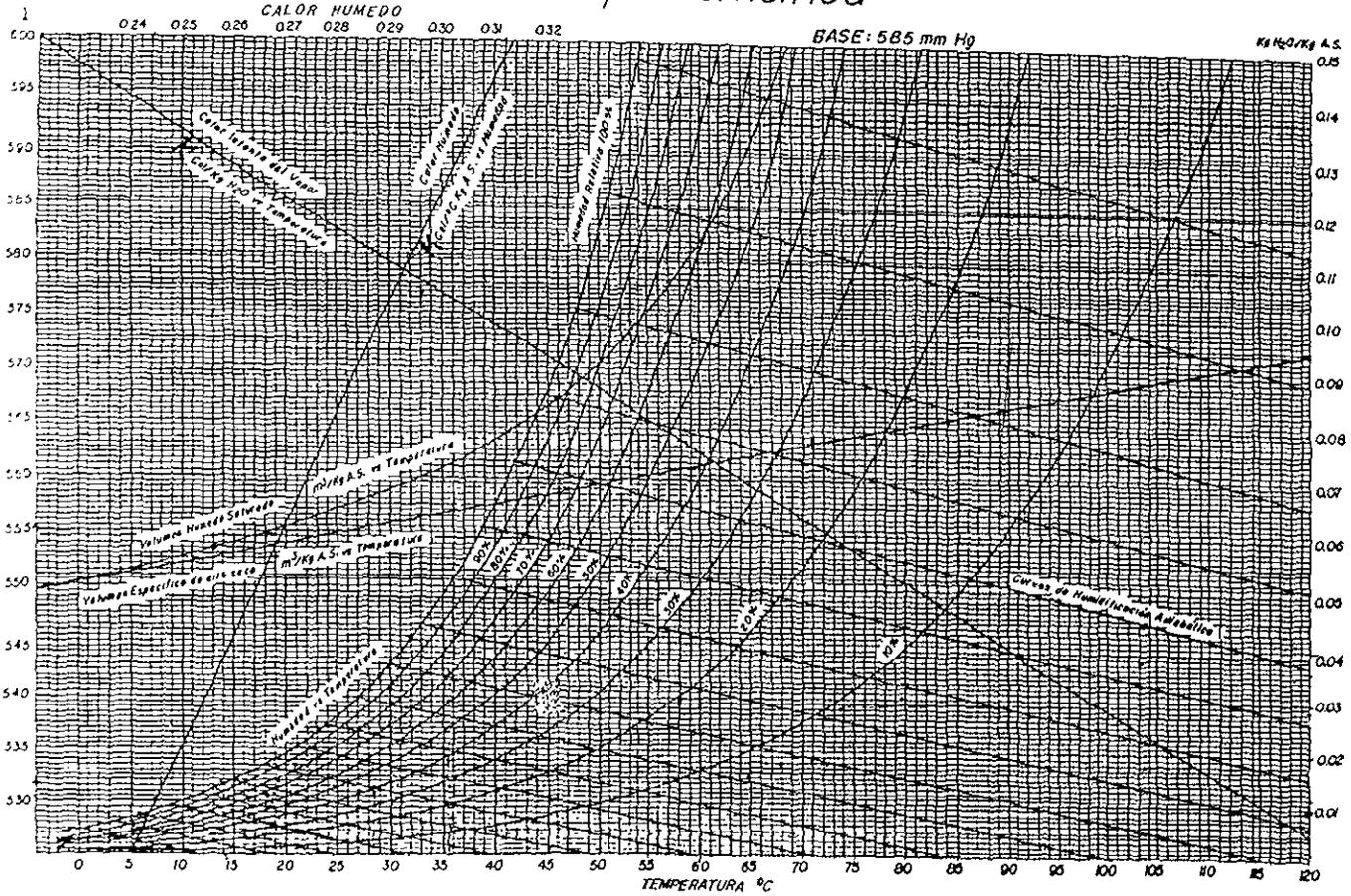


Figura 2.7 CARTA PSICROMETRICA (Base 585 mmHg)

## 2.5 Pruebas de secado.

Con respecto a la muestra de un material, la rapidez de secado puede determinarse suspendiendo la muestra en una corriente de aire, para un balance. Entonces el peso de la muestra seca puede medirse como una función del tiempo. Las pruebas de secado tienen diversas aplicaciones, desde obtención de datos de diseño para seleccionar un tipo de secador adecuado para un material en particular, hasta verificar si el funcionamiento actual de un secador es correcto

Deben observarse ciertas precauciones para que los datos sean de máxima utilidad. La muestra no debe ser muy pequeña; más aún, las condiciones del aire deben ser las mismas a la entrada en cuanto a velocidad, humedad y temperatura durante la operación. La exposición de la muestra al aire con temperatura, humedad y velocidad constante constituye el secado en condiciones constantes de secado.

Durante las pruebas realizadas para este trabajo de tesis, se trató de que las pruebas de secado cumplieran con las recomendaciones anteriores. Para este trabajo se utilizó cartón por ser un sólido manejable, barato y reciclable

Las lecturas de peso se realizaron durante el proceso de secado en lapsos de cinco minutos ya que las charolas donde se coloca el sólido húmedo están sujetas al soporte de la báscula. Los intervalos de cinco minutos fueron suficientes para tomar lecturas tanto de peso como de temperaturas de bulbo seco como de bulbo húmedo y nuevamente regresar a cuidar la presión del vapor en un valor fijo que garantice temperatura de aire constante durante la operación. Esto debido a que el aire es calentado cuando cruza un banco de diez tubos aletados que a su vez son calentados con un flujo de vapor de agua por el interior de éstos

Las mediciones que se tomaron durante el secado fueron el peso de las piezas de sólido húmedo y las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo

Las pruebas consistieron en realizar series de pruebas que corresponden a las tablas 2.6, 2.22 y 2.38. Estas indican las diferentes condiciones a las que operó el secador de charolas. Las condiciones de operación fueron a una velocidad de aire constante y corridas de diferente presión de vapor de agua que se fijaron como 138, 207, 276, 345, y 414 kPa (20, 30, 40, 50 y 60 lb/plg<sup>2</sup>)

## 2.6 Primera serie de pruebas de secado.

Una vez dominada la técnica, así como fijado el intervalo de tiempo de lectura, con el material elegido, con disposición de vapor de agua proveniente de la caldera y corriente eléctrica, pudo realizarse la primera prueba de secado que consistió en operar el equipo bajo las condiciones siguientes:

Velocidad del aire 1.4 m/s

Presión del vapor 138 kPa

Los datos experimentales obtenidos durante esta primera prueba llamada corrida 1 se indican en la tabla 2.8, en la tabla se reporta el peso de la muestra al tiempo en los que estos se evaluaron. El peso se determino usando la báscula fija al secador, la cual permitió detectar las variaciones de peso durante la operación. También se indica en la tabla 2.8 las lecturas de temperatura del aire a la salida del gabinete, las lecturas de temperaturas del aire a la entrada del gabinete (cuando estas fueron tomada al operar nuevamente bajo las mismas condiciones de secado).

La tabla 2.7 solo hace resaltar las condiciones y datos adicionales de operación

Los datos de peso del material húmedo se pasaron a contenidos de humedad usando la ecuación 2.13

$$X = \frac{W_0 - W_{s.s}}{W_{s.s}} \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg s.s}} \quad (2.13)$$

La memoria de cálculo se indica en el apéndice B. Una tabla anexa, tabla 2.9, muestra los resultados obtenidos de la correspondiente prueba de secado. Estos nuevos valores calculados son humedad(X), humedad promedio( $X_{prom}$ ) y velocidad de secado(R), la memoria de cálculo también se indica en el apéndice B

A continuación, los datos de estas tablas se presentan gráficamente como el contenido de humedad en función del tiempo (fig. 2.8). En la figura 2.8 están representadas las curvas de la nombrada serie 1, que son, las que se realizaron bajo la condición de una velocidad de aire constante y que en este caso fue de 1.4 m/s, donde se observa que el tiempo de secado para estas corridas fue de entre los 55 y 80 minutos. Bajo la condición de velocidad de aire, de 1.4 m/s, se trabajaron las nombradas corridas que corresponden a operar bajo la presión siguiente (Tabla 2.5)

Tabla 2.5 Presiones de trabajo a velocidad de aire de 1.4 m/s

Corrida	Presión del vapor (kPa)
1	138
2	207
3	276
4	345
5	414

Las tablas para esta primera serie se presentan de manera ordenada por presión ascendente de vapor. También de esta manera son presentadas las gráficas de a) velocidad de secado (R) en función del tiempo(t) y b) velocidad de secado en función de la humedad promedio ( $X_{prom}$ ) para cada corrida de manera correspondiente ( fig. 2.9 \ 2.10, 2.11 y 2.12, 2.13 y 2.14, 2.15 y 2.16, 2.17 y 2.18 )

### 2.6.1 Tablas de datos experimentales y resultados de la serie 1.

Para la serie 1, las condiciones a las que operó el equipo se indican en la tabla 2.6.

Tabla 2.6 Condiciones a las que se opero en la serie 1.

Velocidad de aire = 1.4 m/seg	Corrida	Presión del vapor
	1	138 kPa
	2	207 kPa
	3	276 kPa
	4	345 kPa
	5	414 kPa
Area del material expuesta al secado (A) = 0.1444 m <sup>2</sup>		

Tabla 2.7 Condiciones de operación y datos de la corrida 1.

Condiciones de Operacion		Peso de Charolas con columpio $W_{char}$ (g)	Peso inicial del material húmedo $W_h$ (g)	Peso del material al final del secado $W_{s_s}$ (g)
Velocidad del aire (m/seg)	Presión del vapor (kPa)			
1.4	138	1348.0	246	120

Tabla 2.8 Tabla de datos experimentales. Corrida 1.

Tiempo t (minutos)	Tiempo t (horas)	Peso total $W_{tot}$ (g)	Peso del Material húmedo $W_h$ ( $W_{tot} - W_{char}$ ) (g)	Temperatura de salida °C		Temperatura de entrada °C	
				$T_{bs}$	$T_{bh}$	$T_{bs}$	$T_{bh}$
0	0	1594	1594 - 1348 = 246	38	24		
5	0.083	1588	240	50	26	66	27
10	0.166	1576.5	228.5	56	25	68	27
15	0.250	1561	213	58	25	69	* 28
20	0.333	1544.5	196.5	59	25	69	28
25	0.416	1529	181	59	26	69	28
30	0.500	1515	167	59	25	69	28
35	0.583	1505	157	60	26		
40	0.666	1494.5	146.5	59	26		
45	0.750	1487.5	139.5	59	26		
50	0.833	1481.5	133.5	60	26		
55	0.916	1477.5	129.5	60	26		
60	1.000	1474.5	126.5	60	26		
65	1.083	1472	124	60	26		
70	1.166	1470	122	60	26		
75	1.250	1469	121	60	26		
80	1.333	1468	120	61	26		
85	1.416	1468	120	61	26		
90	1.500	1468	120	61	26		

Tabla 2.9 Tabla de resultados. Corrida 1.

Peso del Material húmedo $W_h$ (kg)	Humedad $X$ $(W_h - W_s) / W_s$ (kg H <sub>2</sub> O/ kg s s)	Humedad Promedio $X_{prom}$ $(X_1 + X_2) / 2$ (kg H <sub>2</sub> O/ kg s s)	Velocidad de secado $R$ (kg H <sub>2</sub> O/ h m <sup>2</sup> )
0.2460	$0.246 - 0.120 / 0.120 = 1.050$	$(1.05 + 1.0) / 2 = 1.025$	0.49
0.2400	$0.240 - 0.120 / 0.120 = 1.000$	$(1.0 + 0.9) / 2 = 0.950$	0.99
0.2285	0.900	0.837	1.24
0.2130	0.775	0.706	1.37
0.1965	0.637	0.572	1.28
0.1810	0.508	0.449	1.16
0.1670	0.391	0.349	0.82
0.1570	0.308	0.264	0.86
0.1465	0.221	0.191	0.58
0.1395	0.162	0.137	0.49
0.1335	0.112	0.095	0.32
0.1295	0.079	0.066	0.24
0.1265	0.054	0.043	0.20
0.1240	0.033	0.024	0.16
0.1220	0.016	0.012	0.07
0.1210	0.008	0.004	0.07
0.1200	0		

**Corrida 1.** En la tabla 2.8, puede leerse que el tiempo de secado fue de 80 minutos (1 hora, 10 minutos), las temperaturas del aire a la entrada se establecieron en  $T_{in} = 69^\circ\text{C}$  y  $T_{bh} = 28^\circ\text{C}$ , las temperaturas de aire a la salida fueron de valor variable de manera ascendente entre los 50 y 60 °C para  $T_{in}$  y entre los 25 y 26 °C para  $T_{bh}$ .

En la tabla de resultados 2.9 puede leerse el peso del material húmedo en kilogramos, que es el peso neto del material húmedo. En esta columna se observa que el material llegó al mínimo contenido de humedad, humedad de equilibrio, el valor leído es de 0.120 kg. Este último es el peso del material seco  $W_s$  y se utilizó para determinar la humedad del material ( $X = (W_h - W_s) / W_s$ ). El valor de  $R$  se estimó con la ecuación  $R = (W_s / A) (-dX/dt)$  (ec. 1.5).

Para el primer valor de la columna de humedad ( $X$ ),

$$X = (W_h - W_s) / W_s = 0.246 - 0.120 / 0.120 = 1.050 \text{ kg H}_2\text{O/ kg s s}$$

Para el primer valor de la columna de humedad promedio ( $X_{prom}$ ).

$$X_{prom} = (X_1 + X_2) / 2 = (1.05 + 1.0) / 2 = 1.025 \text{ kg H}_2\text{O/ kg s s}$$

Para el primer valor de la columna de velocidad de secado ( $R$ ),

$$R = (W_s / A) (-dX/dt) = (0.120 / 0.1444) (-1.0 - 1.05) / (0.083 - 0) = 0.49 \text{ kg H}_2\text{O/ h m}^2$$

donde  $A$  es el área expuesta al secado o área de transferencia  $0.1444 \text{ m}^2$  dato obtenido a partir de las dimensiones de las charolas del equipo (pag. 23)

$(dX/dt)$  Variación de la humedad ( $X$ ) con respecto al tiempo ( $t$  en horas)

La memoria de cálculo correspondiente a las tablas de resultados se muestra en el apéndice B para las tablas ahí mostradas.

Tabla 2.10 Condiciones de operación y datos de la corrida 2

Condiciones de Operación		Peso de Charolas con columpio $W_{char}$  (g)	Peso inicial del material húmedo $W_h$  (g)	Peso del material al final del secado $W_{s,s}$  (g)
Velocidad del aire ( m/seg)	Presión del vapor ( kPa )			
1.4	207	1348.0	257	119.5

Tabla 2.11 Tabla de datos experimentales. Corrida 2.

Tiempo t (minutos)	Tiempo t (horas)	Peso total $W_{tot}$ (g)	Peso del Material húmedo $W_h$ ( $W_{tot} - W_{char}$ ) (g)	Temperatura de salida °C		Temperatura de entrada °C	
				$T_{bs}$	$T_{bh}$	$T_{bs}$	$T_{bh}$
0	0	1605	257	46	24		
5	0.083	1592	244	58	24	72	27
10	0.166	1575	227	60	25	73	* 27
15	0.250	1557	209	61	26	73	27
20	0.333	1540	192	62	26	73	27
25	0.416	1525	177	63	26	73	27
30	0.500	1512	164	63	26	73	27
35	0.583	1501	153	63	26		
40	0.666	1494.5	146.5	63	26		
45	0.750	1487	139	63	26		
50	0.833	1480	132	64	26		
55	0.916	1476	128	65	27		
60	1.000	1472	124	65	27		
65	1.083	1469.5	121.5	65	27		
70	1.166	1468	120	65	27		
75	1.250	1467.5	119.5	65	27		
80	1.333	1467.5	119.5	65	27		
85	1.416	1467.5	119.5	65	27		

Tabla 2.12 Tabla de resultados. Corrida 2

Peso del Material húmedo $W_h$ (kg)	Humedad X $(W_h - W_{s,s} / W_{s,s})$ (kg H <sub>2</sub> O/ kg s.s)	Humedad Promedio $X_{prom}$ $(X_1 + X_2) / 2$ (kg H <sub>2</sub> O/ kg s.s)	Velocidad de secado R (kg H <sub>2</sub> O/ h m <sup>2</sup> )
0.257	1.150	1.095	1.08
0.244	1.041	0.970	1.41
0.227	0.899	0.824	1.48
0.209	0.749	0.677	1.42
0.192	0.606	0.543	1.24
0.177	0.481	0.426	1.08
0.164	0.372	0.326	0.91
0.153	0.280	0.253	0.53
0.1465	0.226	0.194	0.62
0.139	0.163	0.133	0.58
0.132	0.104	0.087	0.32
0.128	0.071	0.054	0.33
0.124	0.037	0.026	0.20
0.1215	0.016	0.010	0.11
0.120	0.004	0.002	0.03
0.1195	0		

**Corrida 2.** El seguimiento para la elaboración de estas tablas fue el mismo que para la corrida anterior, pero la diferencia se hace notar por las condiciones de operación al secar con la misma velocidad de aire de 1.4 m/s y una presión del vapor de 207 kPa; como consecuencia resulta un tiempo de secado de 75 minutos, temperaturas del aire a la entrada de  $T_{hs} = 73\text{ °C}$  y  $T_{bh} = 27\text{ °C}$  y temperaturas del aire a la salida de 58 a 65 °C para  $T_{hs}$  y de 24 a 27 °C para  $T_{bh}$ .

Tabla 2.13 Condiciones de operación y datos de la corrida 3.

Condiciones de Operación		Peso de charolas con columpio $W_{char}$ (g)	Peso inicial del material húmedo $W_h$ (g)	Peso del material al final del secado $W_{ss}$ (g)
Velocidad del aire (m/seg)	Presión del vapor (kPa)			
14	276	1348.0	241	118.5

Tabla 2.14 Tabla de datos experimentales. Corrida 3.

Tiempo t (minutos)	Tiempo t (horas)	Peso total $W_{tot}$ (g)	Peso del Material húmedo $W_h$ ( $W_{tot} - W_{char}$ ) (g)	Temperatura de salida °C		Temperatura de entrada °C	
				$T_{bs}$	$T_{bh}$	$T_{bs}$	$T_{bh}$
0	0	1589	241	60	26		
5	0.083	1571.5	223.5	65	26	75	*
10	0.166	1552	204	65	26	75	29
15	0.250	1535	187	67	27	75	29
20	0.333	1516.5	168.5	68	27	75	29
25	0.416	1504.5	156.5	68	28	75	29
30	0.500	1493.5	145.5	70	28	75	29
35	0.583	1485	137	70	28	75	29
40	0.666	1479	131	70	28		
45	0.750	1475	127	70	28		
50	0.833	1472	124	70	28		
55	0.916	1470	122	71	28		
60	1.000	1468	120	71	28		
65	1.083	1467	119	71	28		
70	1.166	1466.5	118.5	71	28		
75	1.250	1466.5	118.5	71	28		
80	1.333	1466.5	118.5	71	26		

Tabla 2.15 Tabla de resultados. Corrida 3.

Peso del Material húmedo $W_h$ (kg)	Humedad X $(W_h - W_{s,s} / W_{s,s})$ (kg H <sub>2</sub> O/ kg s.s)	Humedad Promedio $X_{prom}$ $(X_1 + X_2) / 2$ (kg H <sub>2</sub> O/ kg s.s)	Velocidad de secado R (kg H <sub>2</sub> O/ h m <sup>2</sup> )
0.241	1.033	0.959	1.44
0.2235	0.886	0.803	1.62
0.204	0.721	0.649	1.40
0.187	0.578	0.500	1.53
0.1685	0.422	0.371	1.00
0.1565	0.320	0.273	0.91
0.1455	0.227	0.191	0.69
0.137	0.156	0.130	0.50
0.131	0.105	0.088	0.33
0.127	0.071	0.058	0.24
0.124	0.046	0.037	0.16
0.122	0.029	0.020	0.16
0.120	0.012	0.008	0.07
0.119	0.004	0.002	0.03
0.1185	0		

**Corrida 3.** Como se observa en la tabla de condiciones de operación para esta corrida (tabla 13), muestra que se operó manteniendo la velocidad de aire (1.4 m/s) con un incremento en la presión del vapor a 276 kPa. Con estas condiciones se alcanzó un tiempo de secado de 70 minutos (tabla 2.14)

Tabla 2.16 Condiciones de operación y datos de la corrida 4

Condiciones de Operación		Peso de Charolas con columpio $W_{char}$ (g)	Peso inicial del material húmedo $W_h$ (g)	Peso del material al fina del secado $W_{ss}$ (g)
Velocidad del aire ( m/seg)	Presión del vapor ( kPa )			
1.4	345	1348 0	235	118 5

Tabla 2.17 Tabla de datos experimentales. Corrida 4

Tiempo t (minutos)	Tiempo t (horas)	Peso total $W_{tot}$ (g)	Peso del Material húmedo $W_h$ ( $W_{tot} - W_{char}$ ) (g)	Temperatura de salida °C		Temperatura de entrada °C	
				$T_{bs}$	$T_{bh}$	$T_{bs}$	$T_{bh}$
0	0	1583	235	40	23		
5	0 083	1567.5	219.5	67	27	80 *	29
10	0 166	1547.5	199.5	65	27	80 *	29
15	0.250	1529	181	70	27	80	29
20	0 333	1514	166	70	28	80	29
25	0.416	1500	152	71	28	80	29
30	0.500	1491	143	71	28	80	29
35	0.583	1482.5	134.5	72	28		
40	0 666	1476.5	128.5	72	28		
45	0 750	1471.5	123.5	73	28		
50	0 833	1469.5	121.5	73	28		
55	0 916	1467.5	119.5	73	28		
60	1 000	1467	119	74	28		
65	1 083	1466.5	118.5	74	28		
70	1 166	1466.5	118.5	74	28		
75	1 250	1466.5	118.5	74	28		

Tabla 2.18 Tabla de resultados. Corrida 4.

Peso del Material húmedo $W_h$ (kg)	Humedad X $(W_h - W_{s,s}/W_{s,s})$ (kg H <sub>2</sub> O/ kg s s)	Humedad Promedio $X_{prom}$ $(X_1 + X_2) / 2$ (kg H <sub>2</sub> O/ kg s s)	Velocidad de secado R (kg H <sub>2</sub> O/ h m <sup>2</sup> )
0.235	0.983	0.917	1.29
0.2195	0.852	0.767	1.66
0.1995	0.683	0.605	1.53
0.181	0.527	0.463	1.25
0.166	0.400	0.341	1.15
0.152	0.282	0.244	0.74
0.143	0.206	0.170	0.69
0.1345	0.135	0.109	0.50
0.1285	0.084	0.063	0.41
0.1235	0.042	0.033	0.16
0.1215	0.025	0.016	0.16
0.1195	0.008	0.006	0.039
0.119	0.004	0.002	0.039
0.1185	0		

**Corrida 4.** Como se ha ido presentando, el cambio en las condiciones de operación se presenta con un incremento en la presión del vapor a 345 kPa (tabla 2.16), manteniendo la velocidad de aire constante (1.4 m/s).

El tiempo de secado alcanzado a estas condiciones fue de 65 minutos.

Tabla 2.19 Condiciones de operación y datos de la corrida 5.

Condiciones de Operación		Peso de Charolas con columpio $W_{char}$ (g)	Peso inicial del material húmedo $W_h$ (g)	Peso del material al final del secado $W_{ss}$ (g)
Velocidad del aire (m/seg)	Presión del vapor (kPa)			
14	414	1348.0	247.5	118.0

Tabla 2.20 Tabla de datos experimentales. Corrida 5.

Tiempo t (minutos)	Tiempo t (horas)	Peso total $W_{tot}$ (g)	Peso del Material húmedo $W_h$ ( $W_{tot} - W_{char}$ ) (g)	Temperatura de salida °C		Temperatura de entrada °C	
				$T_{bs}$	$T_{bh}$	$T_{es}$	$T_{eh}$
0	0	1595.5	247.5	67	27		
5	0.083	1578.5	230.5	70	28	84	* 29
10	0.166	1556.5	208.5	72	28	84	* 29
15	0.250	1534	186	73	28	84	29
20	0.333	1517	169	75	28	85	29
25	0.416	1502.5	154.5	74	28	85	29
30	0.500	1490.5	142.5	75	28	85	29
35	0.583	1481.5	133.5	76	28	84	29
40	0.666	1476	128	76	29	84	29
45	0.750	1469.5	121.5	77	28		
50	0.833	1467	119	77	29		
55	0.916	1466.5	118.5	78	28		
60	1.000	1466	118	78	28		
65	1.083	1466	118	78	28		
70	1.166	1466	118	78	28		

Tabla 2.21 Tabla de resultados. Corrida 5.

Peso del Material húmedo $W_h$ (kg)	Humedad $X$ $(W_h - W_{s,s} / W_{s,s})$ (kg H <sub>2</sub> O/ kg s s)	Humedad Promedio $X_{prom}$ $(X_1 + X_2) / 2$ (kg H <sub>2</sub> O/ kg s s)	Velocidad de secado $R$ (kg H <sub>2</sub> O/ h m <sup>2</sup> )
0.2475	1.097	1.025	1.41
0.2305	0.953	0.859	1.83
0.2085	0.766	0.671	1.86
0.186	0.576	0.504	1.41
0.169	0.432	0.370	1.20
0.1545	0.309	0.258	0.99
0.1425	0.207	0.169	0.74
0.1335	0.131	0.107	0.46
0.128	0.084	0.056	0.54
0.1215	0.029	0.018	0.20
0.119	0.008	0.006	0.04
0.1185	0.004	0.002	0.04
0.118	0		

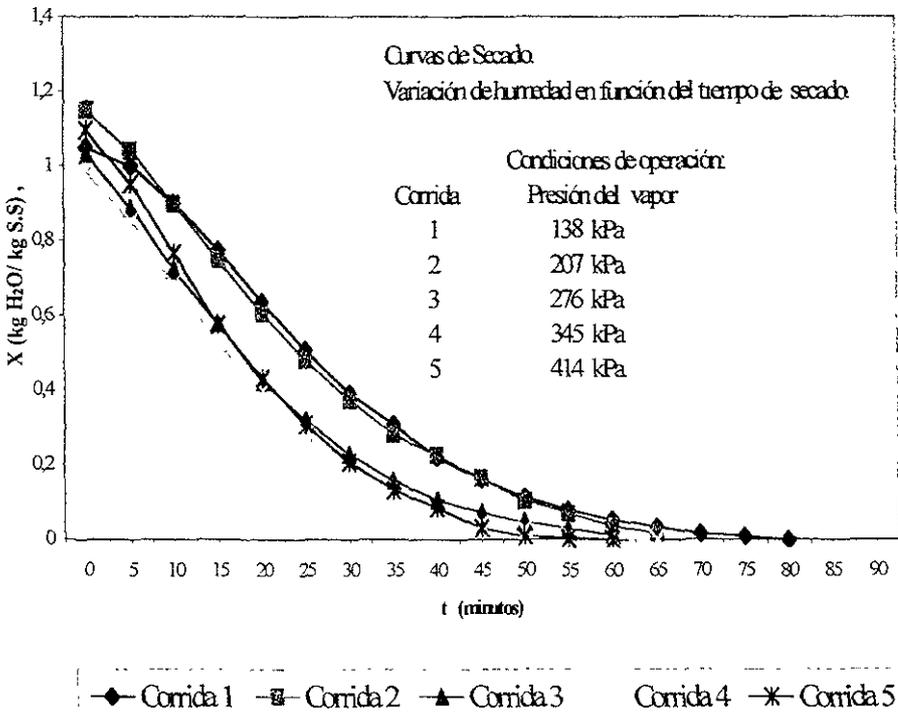
**Corrida 5.** Esta es la última corrida de la primera serie en donde se operó hasta la presión de 414 kPa, manteniendo la velocidad del aire constante de 1.4 m/s. A estas condiciones se alcanzó un tiempo de secado de 60 minutos (tabla 2.20).

## 2.6.2 Interpretación gráfica de los resultados obtenidos en la serie 1.

A continuación, los resultados obtenidos de toda la serie 1 se presentan gráficamente en el mismo orden ascendente de presión de vapor.

Figura 2.8 Representación gráfica de la serie 1.  
Velocidad del aire = 1.4 m/s

### Humedad vs tiempo



En esta figura 2.8 puede observarse el tiempo de secado para cada uno de los lotes o corridas a sus condiciones correspondientes de operación, también se muestra que para todas las pruebas se trató de partir de un mismo contenido de humedad para que ésta no fuera una variante

En la figura 2.9 y 2.10 se representan los resultados de las velocidades de secado contra tiempo, así como las velocidades de secado contra humedad promedio respectivamente a la presión del vapor de 138 kPa. En las figuras subsiguientes se presentan para las otras presiones del vapor de 207 kPa a 414 kPa.

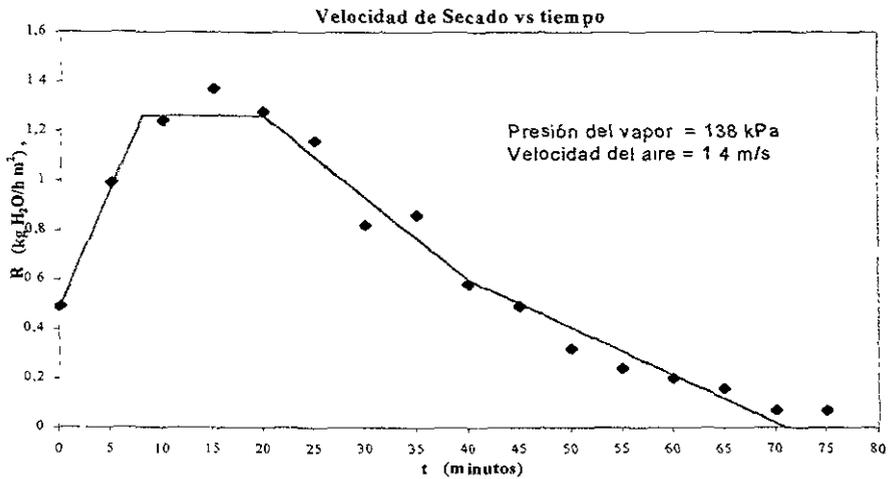


Fig 2.9 Velocidad de secado en función del tiempo, corrida 1

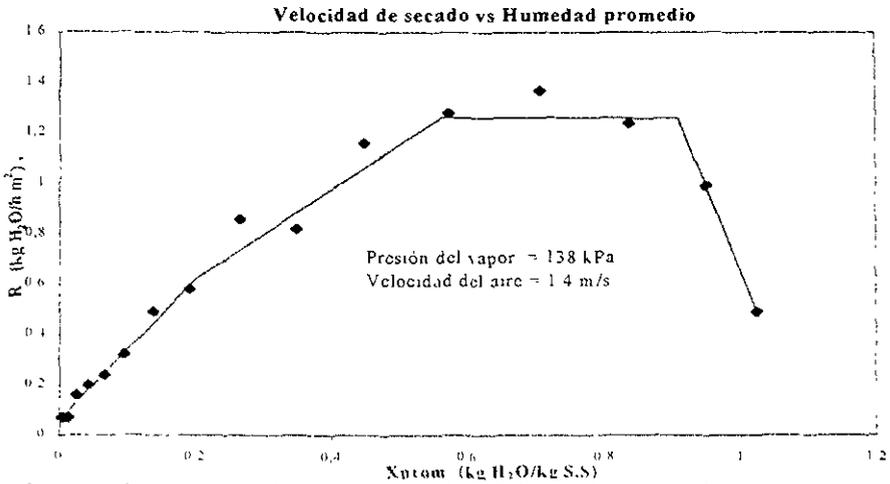


Fig 2.10 Velocidad de secado en función de la humedad promedio, corrida 1

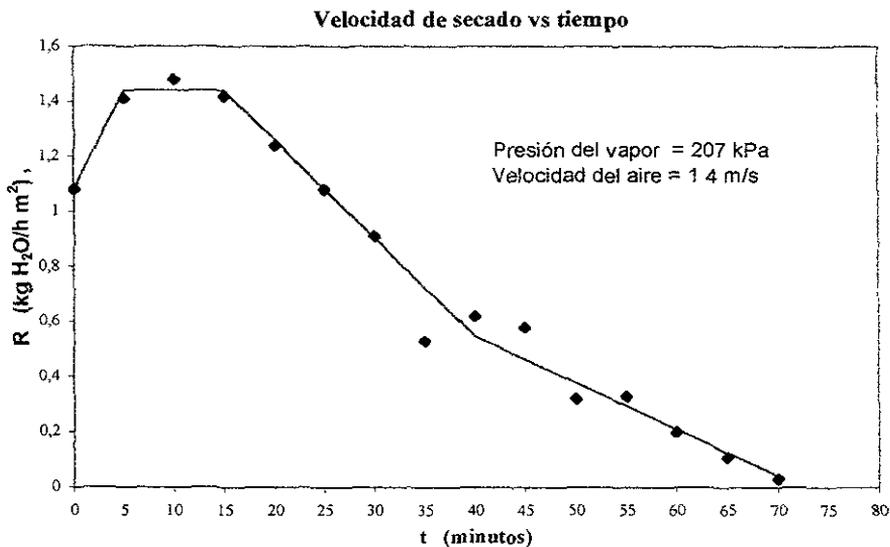


Fig 2.11 Velocidad de secado en función del tiempo, corrida 2

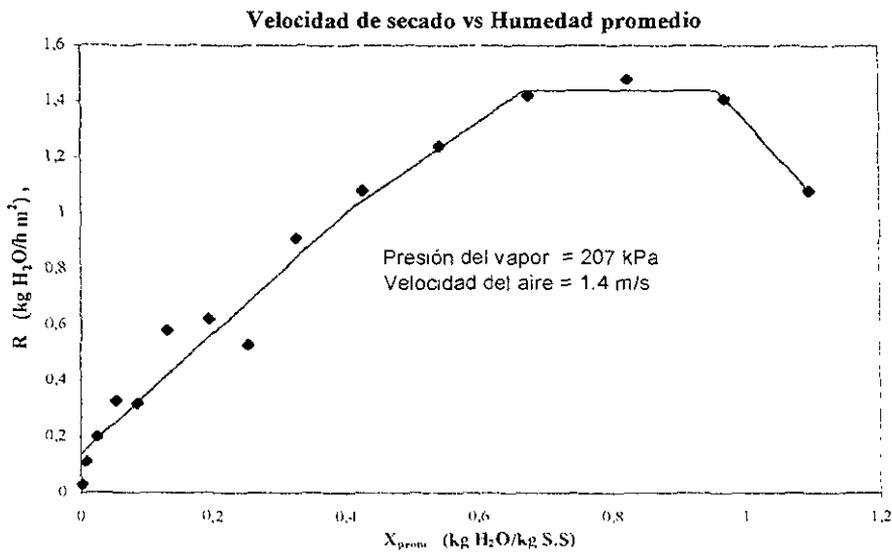


Fig 2.12 Velocidad de secado en función de la humedad promedio, corrida 2

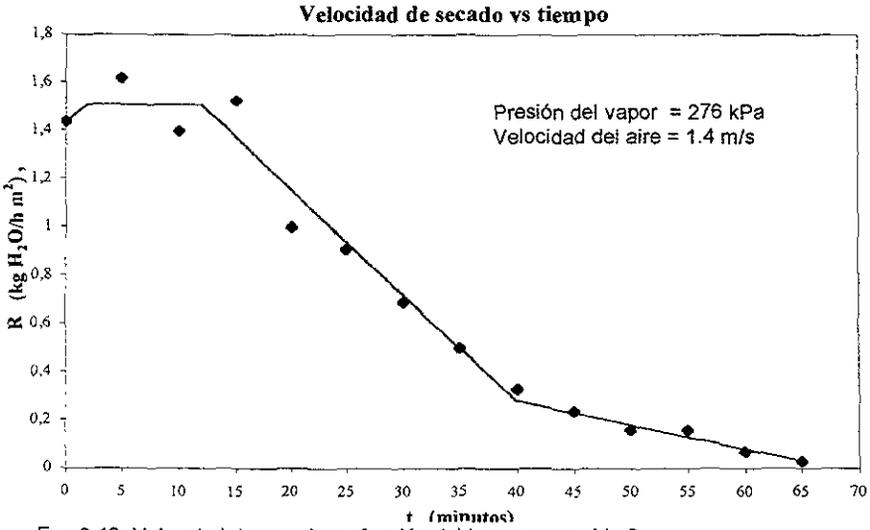


Fig 2.13 Velocidad de secado en función del tiempo, corrida 3.

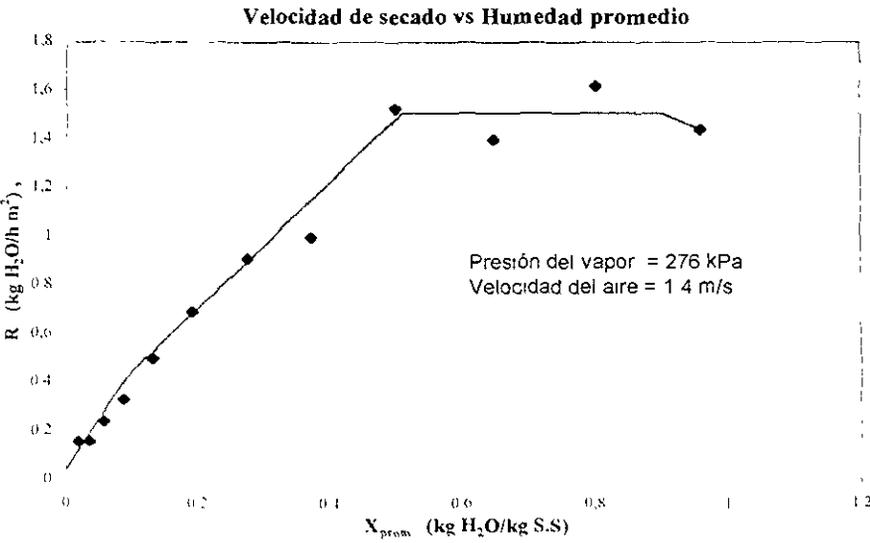


Fig 2.14 Velocidad de secado en función de la humedad promedio, corrida 3

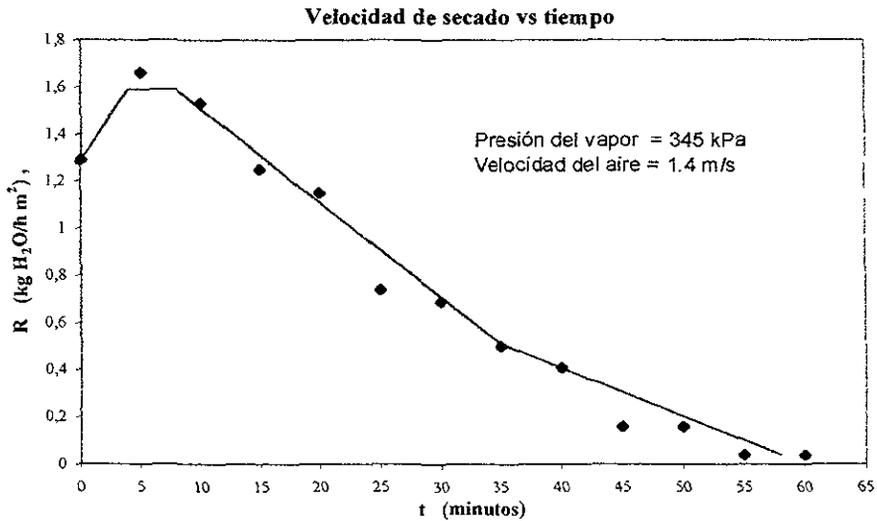


Fig. 2 15 Velocidad de secado en función del tiempo, corrida 4

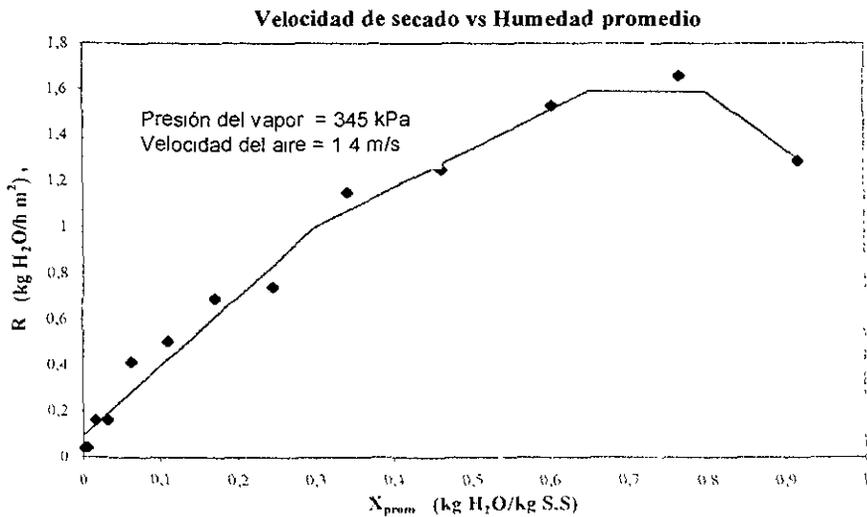


Fig. 2 16 Velocidad de secado en función de la humedad promedio, corrida 4

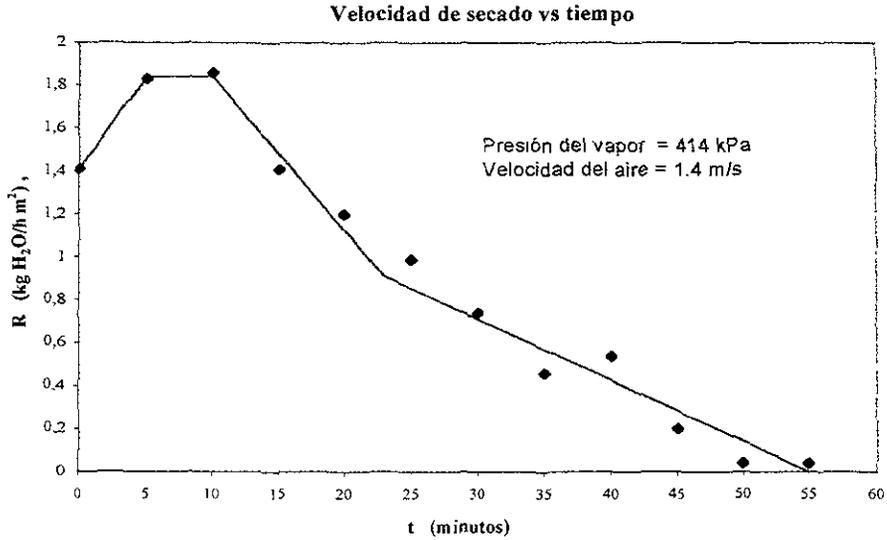


Fig. 2.17 Velocidad de secado en función del tiempo, corrida 5

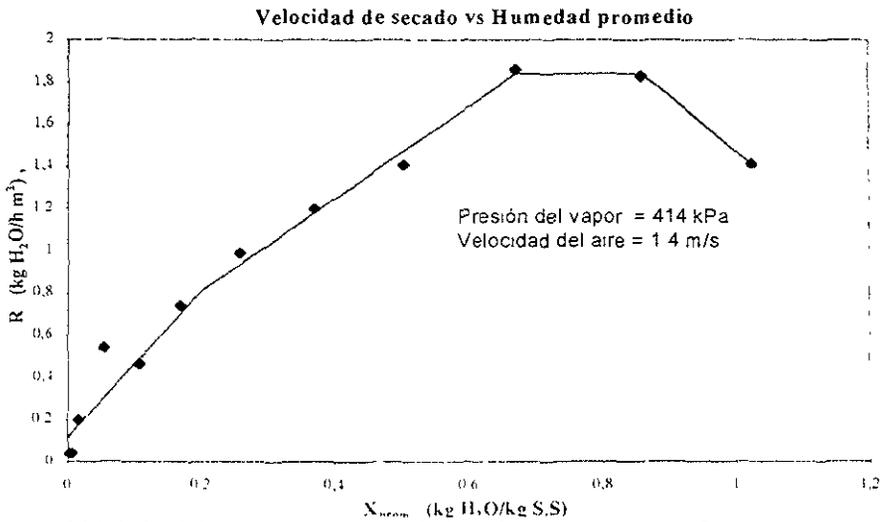


Fig. 2.18 Velocidad de secado en función de la humedad promedio, corrida 5

## 2.7 Segunda serie de pruebas de secado.

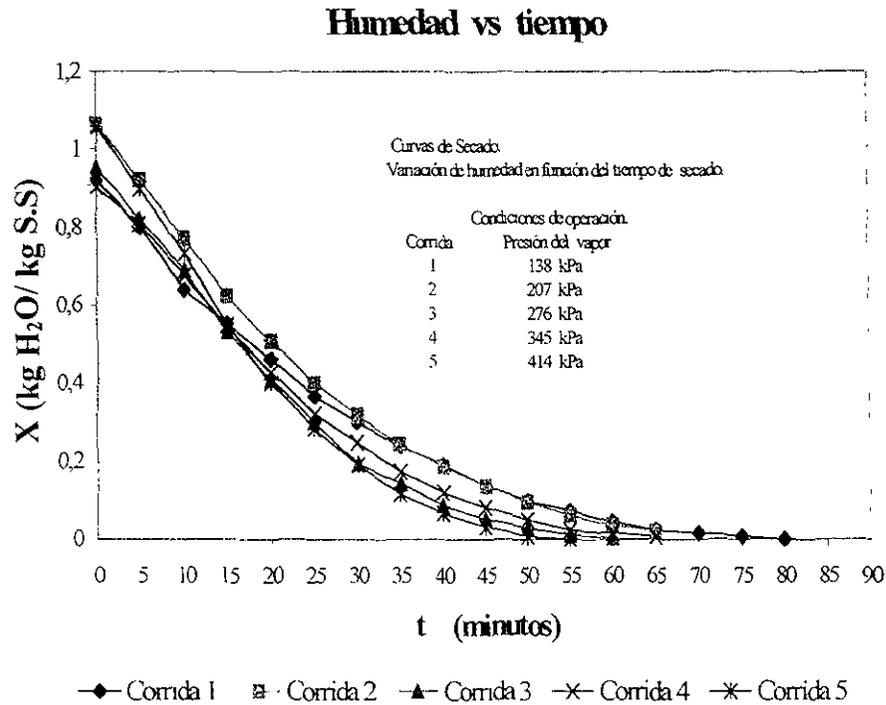
En esta parte se trabajó con una segunda serie que corresponde a un valor fijo de velocidad de aire de 2.0 m/s, operando con presiones de vapor como en la primera serie de pruebas de secado.

### 2.7.1 Tablas de datos experimentales y resultados de la serie 2.

Estas tablas se pueden observar en el apéndice B

### 2.7.2 Interpretación gráfica de los resultados obtenidos en la serie 2.

Figura 2.19 Curva de humedad en función del tiempo  
Velocidad del aire = 2.0 m/s



En las figuras 2.20 y 2.21 se presentan los resultados de las velocidades de secado contra tiempo, así como las velocidades de secado contra humedad promedio, respectivamente a la

presión del vapor de 138 kPa. En las figuras subsecuentes se reportan para las otras presiones del vapor de 207 kPa a 414 kPa.

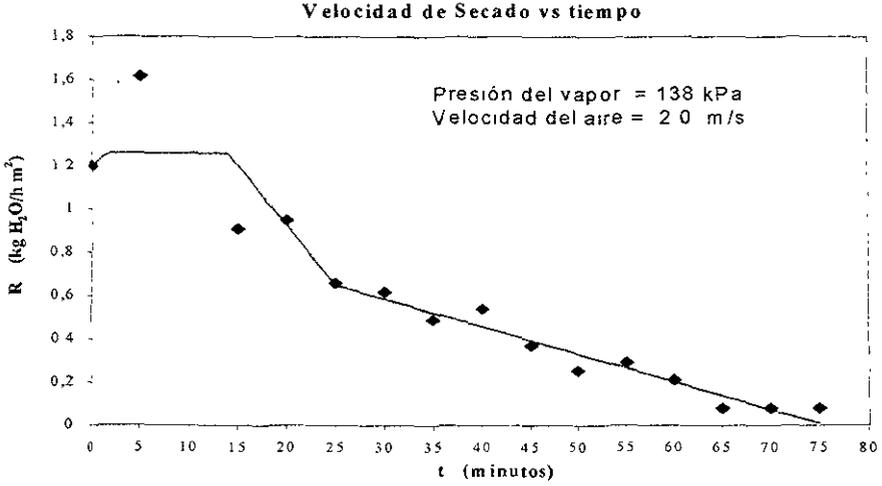


Figura 2.20 Velocidad de secado en función del tiempo, corrida 1

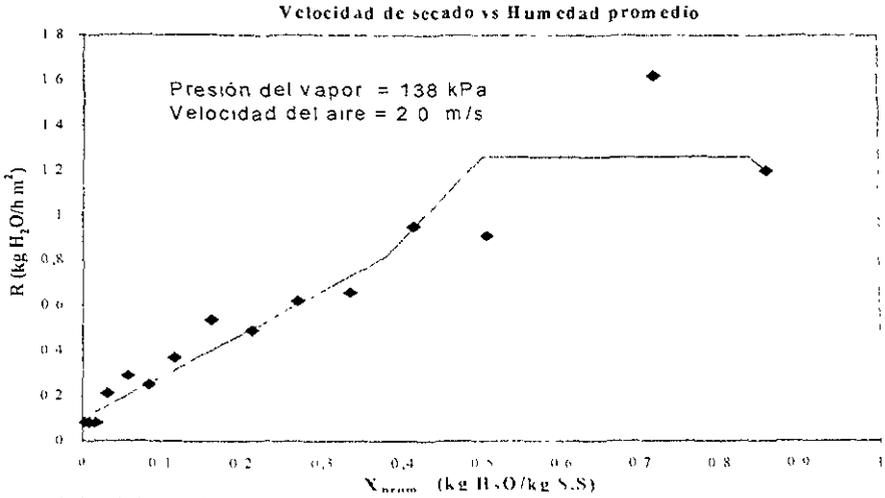


Figura 2.21 Velocidad de secado en función de la humedad promedio, corrida 1

Velocidad de secado vs tiempo

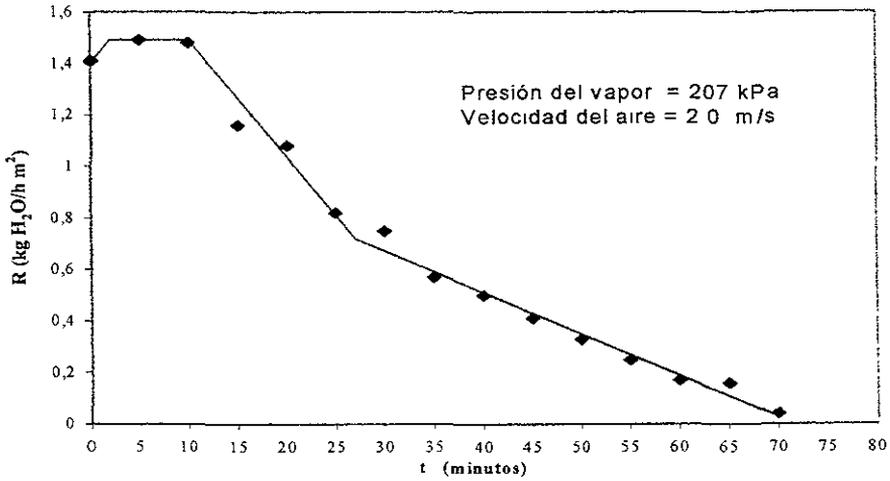


Figura 2.22 Velocidad de secado en función del tiempo, corrida 2.

Velocidad de secado vs Humedad promedio

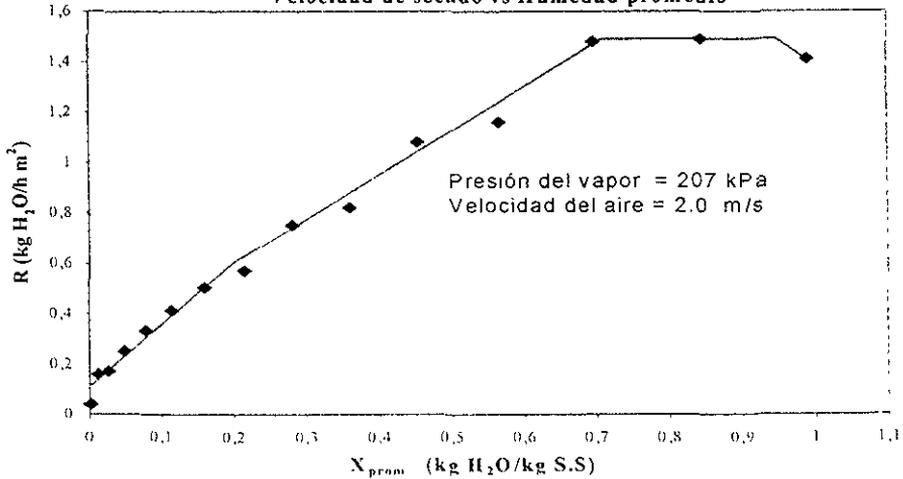


Figura 2.23 Velocidad de secado en función de la humedad promedio, corrida 2

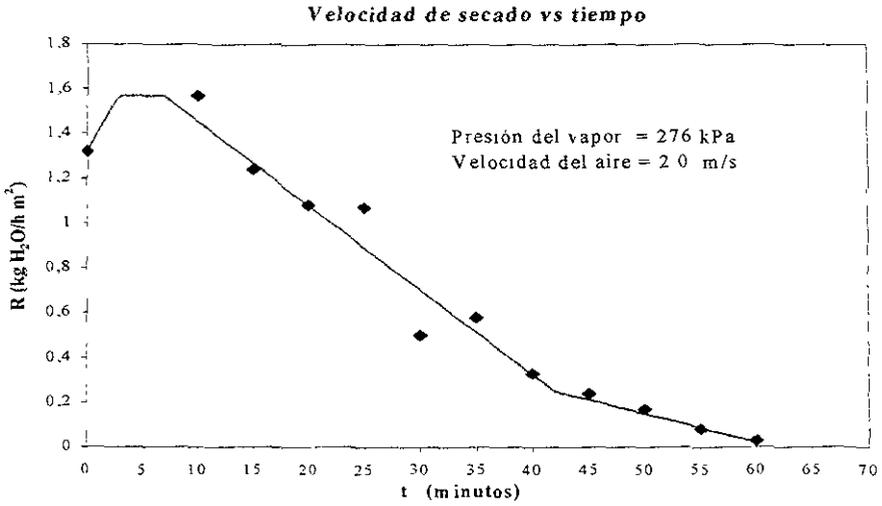


Figura 2.24 Velocidad de secado en función del tiempo. corrida 3

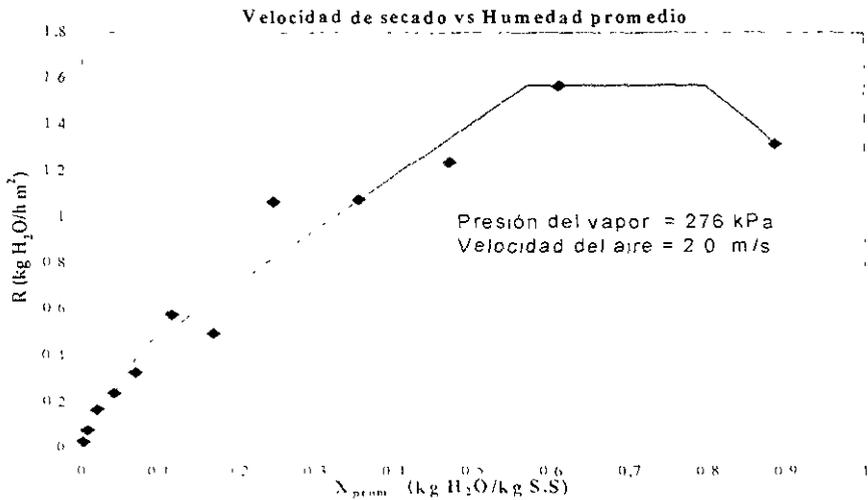


Figura 2.25 Velocidad de secado en función de la humedad promedio. corrida 3

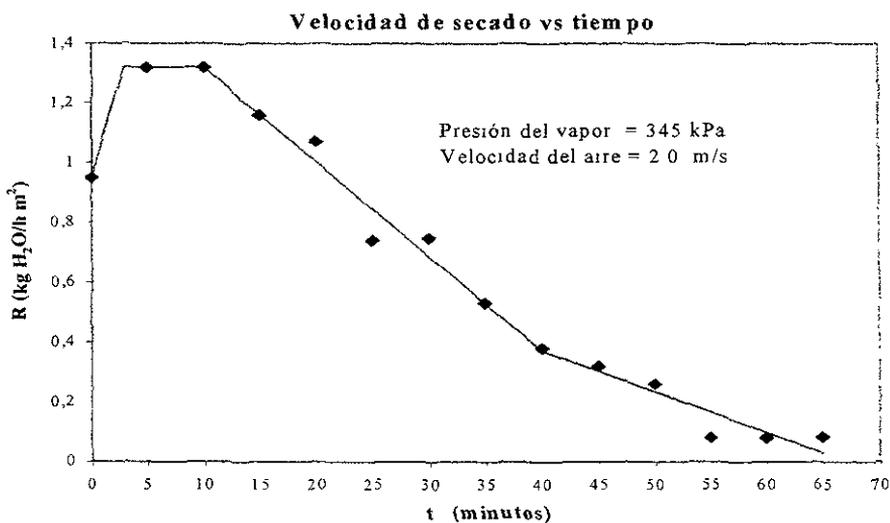


Figura 2.26 Velocidad de secado en función del tiempo, corrida 4

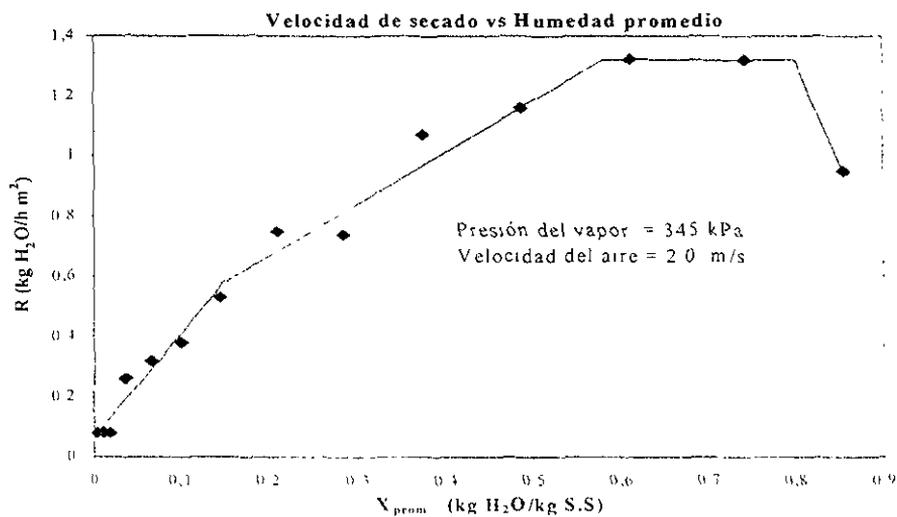


Figura 2.27 Velocidad de secado en función de la humedad promedio, corrida 4

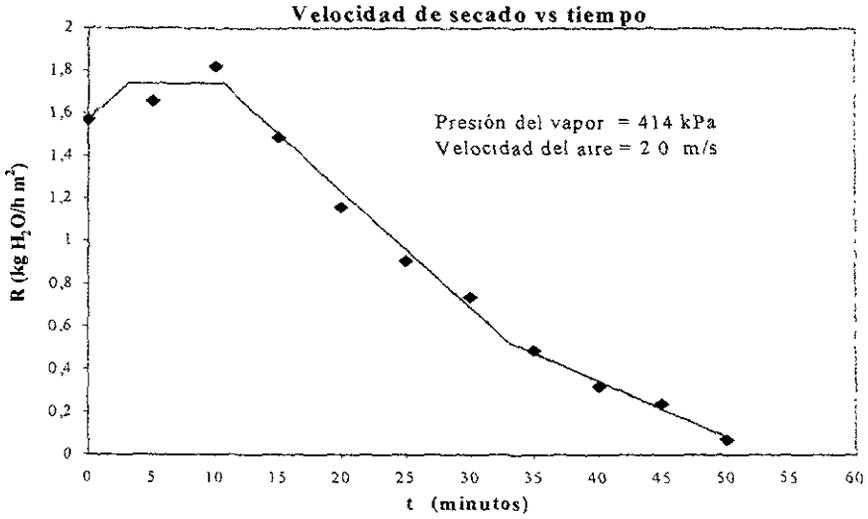


Figura 2.28 Velocidad de secado en función del tiempo, corrida 5

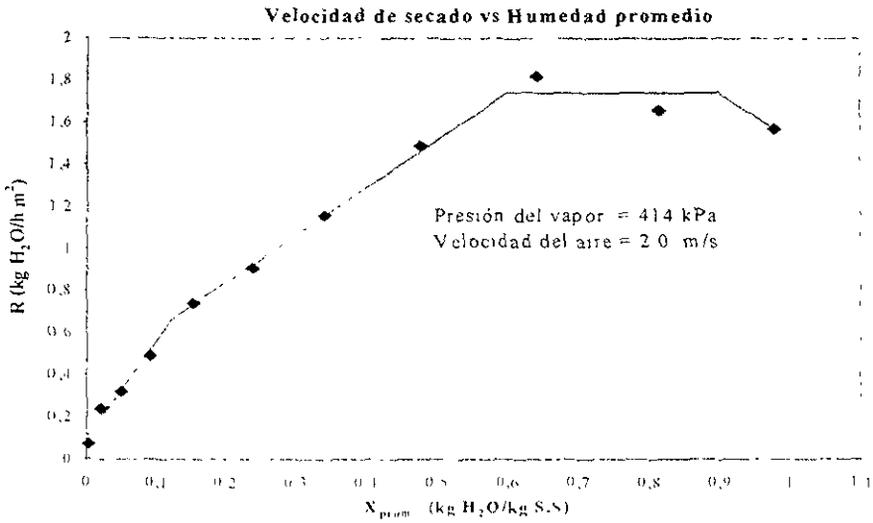


Figura 2.29 Velocidad de secado en función de la humedad promedio, corrida 5

### 2.8 Tercera serie de pruebas de secado.

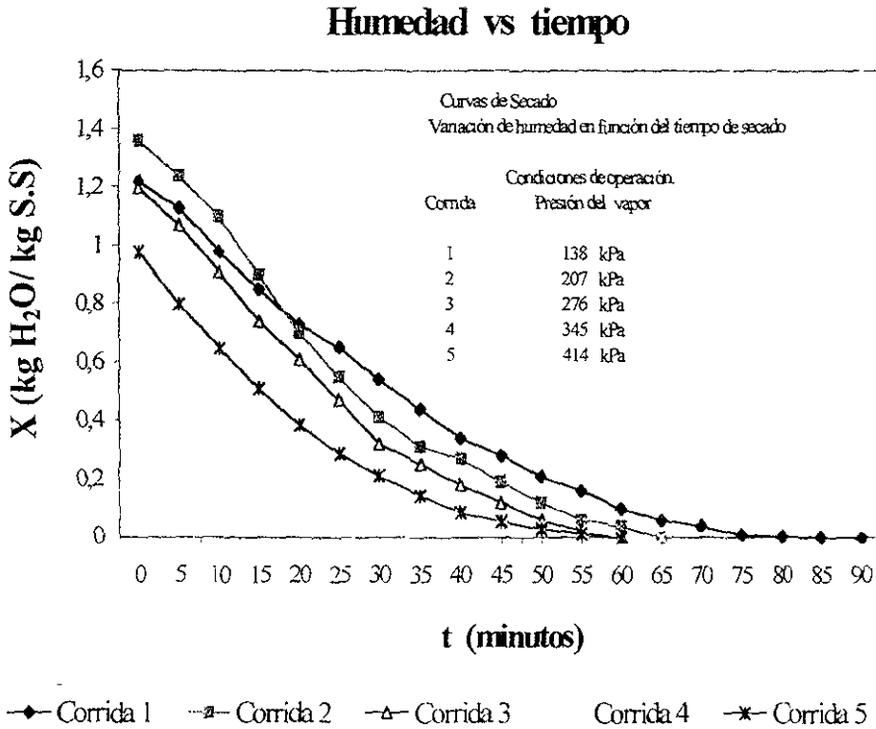
En esta tercera serie de pruebas de secado se operó con una velocidad fija de aire de 2.8 m/s y variación de presión del vapor de 138 kPa a 414 kPa.

#### 2.8.1 Tablas de datos experimentales y resultados de la serie 3.

Estas se muestran en el apéndice B.

#### 2.8.2 Interpretación gráfica de los resultados obtenidos en la serie 3.

Figura 2.30 Curva de humedad en función del tiempo.  
Velocidad del aire = 2.8 m/s



En las figuras 2.31 y 2.32 se presentan los resultados de las velocidades de secado contra tiempo, así como las velocidades de secado contra humedad promedio, respectivamente a la

presión del vapor de 138 kPa. En las figuras subsecuentes se presentan para las otras presiones del vapor de 207 kPa a 414 kPa.

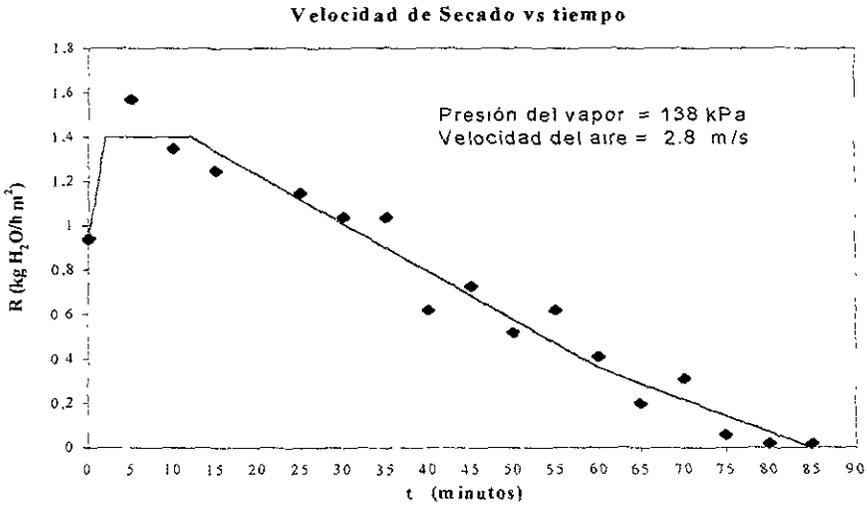


Figura 2.31 Velocidad de secado en función del tiempo, corrida 1

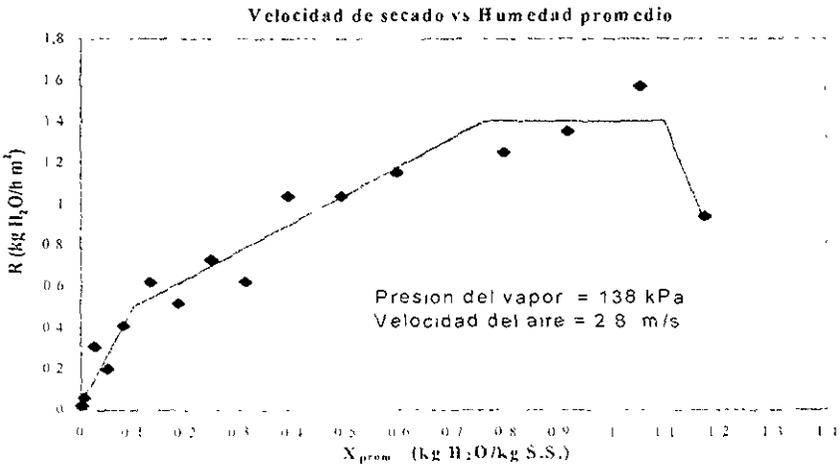


Figura 2.32 Velocidad de secado en función de la humedad promedio, corrida 1

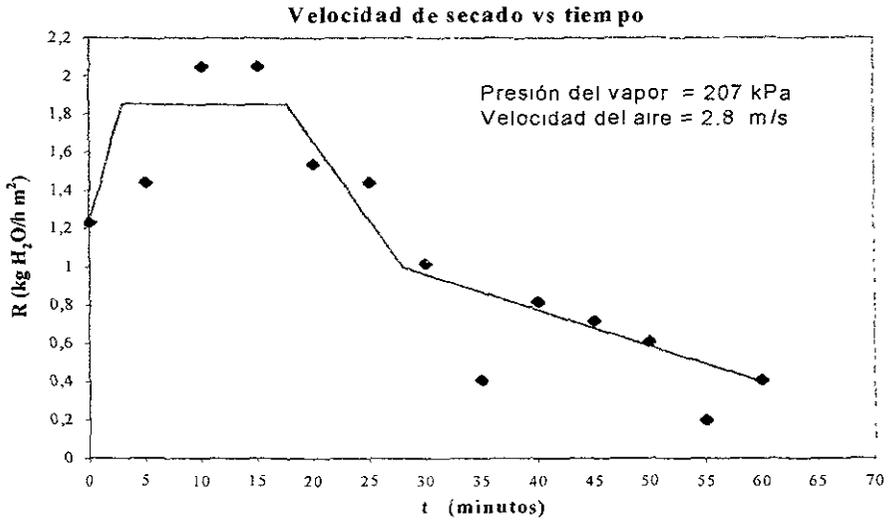


Figura 2.33 Velocidad de secado en función del tiempo, corrida 2

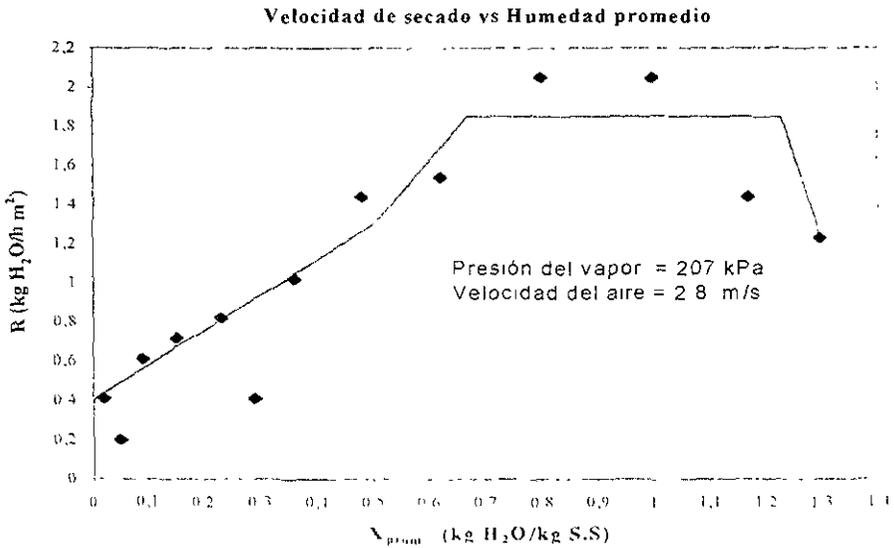


Figura 2.34 Velocidad de secado en función de la humedad promedio, corrida 2

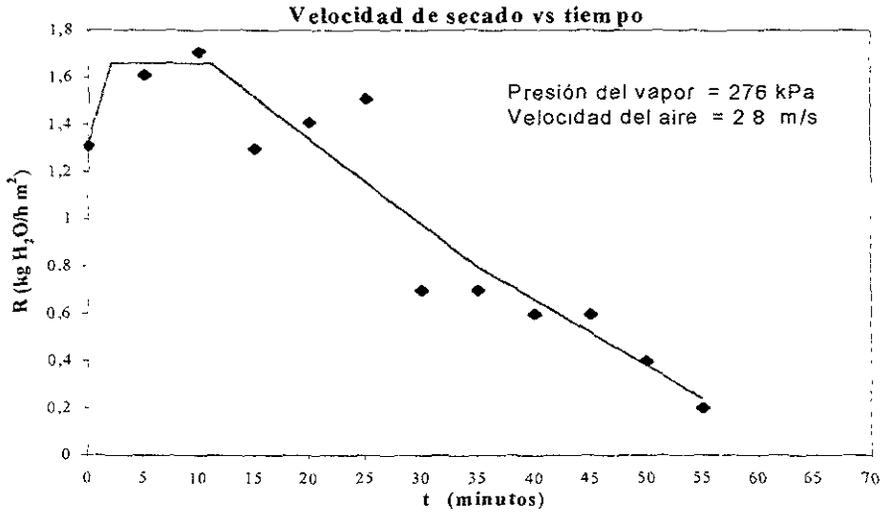


Figura 2.35 Velocidad de secado en función del tiempo, corrida 3

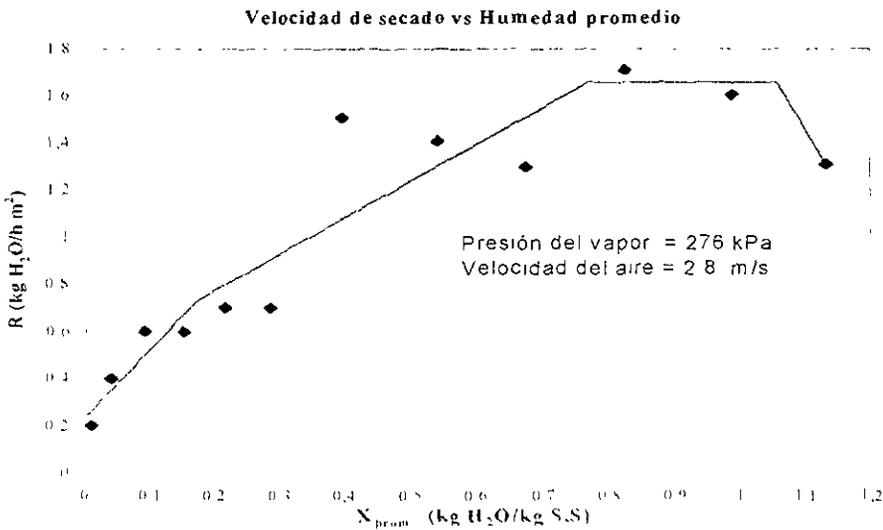


Figura 2.36 Velocidad de secado en función de la humedad promedio, corrida 3

**Velocidad de secado vs tiempo**

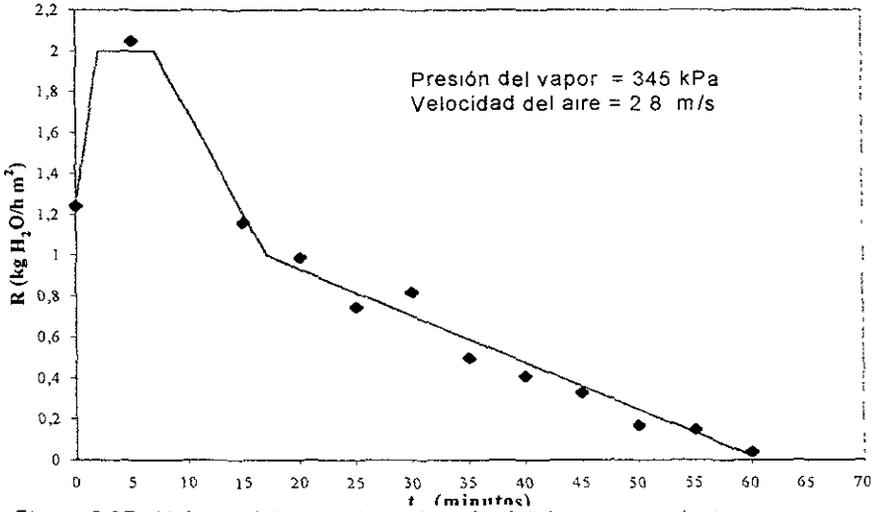


Figura 2.37 Velocidad de secado en función del tiempo, corrida 4.

**Velocidad de secado vs Humedad promedio**

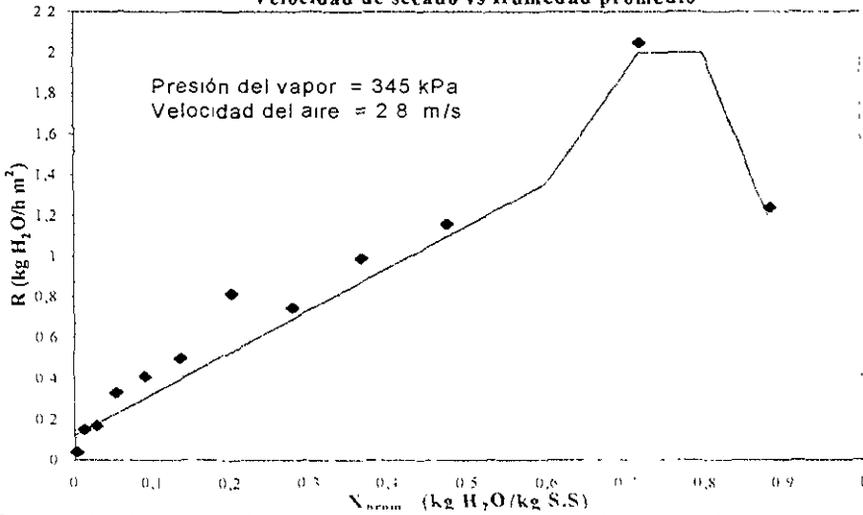


Figura 2.38 Velocidad de secado en función de la humedad promedio, corrida 4

**Velocidad de secado vs tiempo**

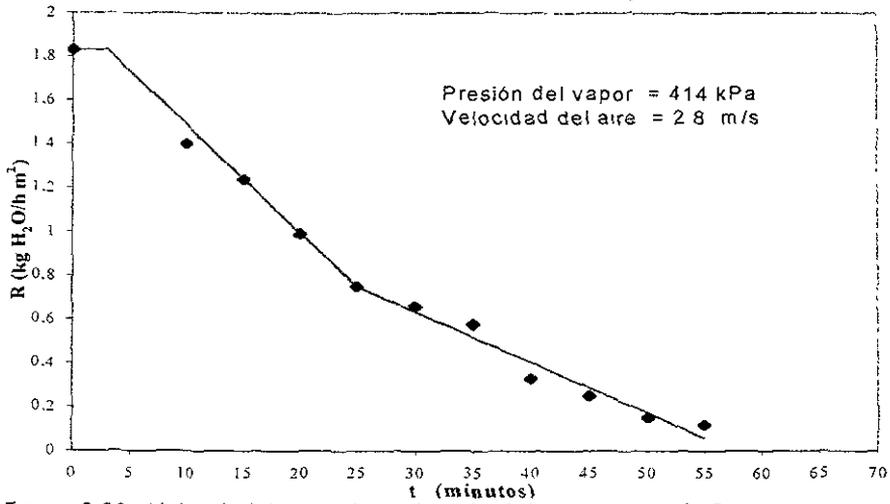


Figura 2 39 Velocidad de secado en función del tiempo, corrida 5

**Velocidad de secado vs Humedad promedio**

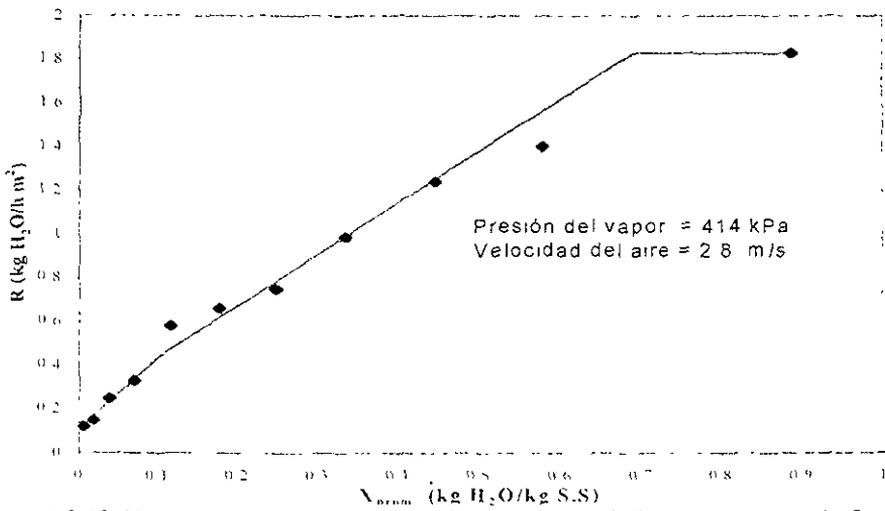


Figura 2 40 Velocidad de secado en función de la humedad promedio, corrida 5

## 2.9 Análisis de las curvas de secado.

En las curvas obtenidas pueden distinguirse las etapas del secado según la naturaleza del material empleado en este trabajo, como son el lapso de estado inestable durante el cual la temperatura del sólido alcanza su valor de estado estable, el periodo de velocidad constante, el primer periodo de velocidad decreciente y un segundo periodo de velocidad decreciente (por ejemplo figura 2.9 y 2.10).

Las curvas fueron ajustadas con líneas rectas de manera correspondiente como se muestra en el apéndice C a través de un ejemplo.

Después de ajustar las curvas de secado obtenidas con las pruebas de secado de la serie 1, podemos observar el valor máximo de velocidad de secado alcanzado en cada corrida o prueba de secado así como el lapso de tiempo en que el periodo de secado constante se mantiene.

De las curvas de secado pueden leerse los siguientes valores de velocidad de secado mostrados en la tabla 2.54, correspondientes al periodo de velocidad de secado constante  $R_c$ .

Tabla 2.54 Serie 1. Pruebas de secado con velocidad de aire de 1.4 m/s

Corrida	$P_{\text{vapor}}$ kPa	$T_{\text{aire de secado}}$ ( $T_{\text{bs entrada}}$ ) °C	$R_c$ kg $H_2O$ / h $m^2$
1	138	69	1.26
2	207	73	1.44
3	276	75	1.51
4	345	80	1.59
5	414	84	1.84

Los valores obtenidos de velocidad de secado  $R_c$ , se incrementan conforme se incrementa la temperatura del aire de secado. Y si se consultan las tablas de datos y resultados o las curvas de humedad en función del tiempo ( $X$  vs  $t$ ) de ésta primera serie, se observa que también se acortan los tiempos de secado al ir incrementando la temperatura del aire de secado.

En las curvas de la serie 2, los valores de velocidad de secado alcanzados de  $R_c$  también se presentan de manera ascendente conforme se incrementa la temperatura del aire de secado (tabla 2.55) y así mismo mejorando los tiempos de secado.

Tabla 2.55 Serie 2. Pruebas de secado con velocidad de aire de 2.0 m/s

Corrida	$P_{\text{vapor}}$ kPa	$T_{\text{aire de secado}}$ ( $T_{\text{bs entrada}}$ ) °C	$R_c$ kg H <sub>2</sub> O/ h m <sup>2</sup>
1	138	59	1.26
2	207	63	1.49
3	276	65	1.57
4	345	65	1.61
5	414	75	1.74

En la serie 3 (tabla 2.56), los valores obtenidos de velocidad de secado  $R_c$  parecen presentarse de manera ascendente aunque de manera irregular con el incremento de la temperatura del aire de secado.

Tabla 2.56 Serie 3. Pruebas de secado con velocidad de aire de 2.8 m/s

Corrida	$P_{\text{vapor}}$ kPa	$T_{\text{aire de secado}}$ ( $T_{\text{bs entrada}}$ ) °C	$R_c$ kg H <sub>2</sub> O/ h m <sup>2</sup>
1	138	54	1.40
2	207	55	1.85
3	276	56	1.66
4	345	57	2.00
5	414	63	1.83

En general los valores de velocidad de secado  $R_c$  experimentales se encuentran entre 1.26 y 2.0 kg H<sub>2</sub>O/ h m<sup>2</sup> . cuando se tiene de la bibliografía<sup>(10)</sup> que la rapidez de evaporación para el agua alcanza hasta los 2.7 kg H<sub>2</sub>O/ h m<sup>2</sup> .

## CAPITULO 3 TRATAMIENTO DE RESULTADOS

### 3.1 Obtención de coeficientes de transferencia.

Como se expuso en la sección 1.5.3, el secado de un material se lleva a cabo por la transferencia de masa del vapor de agua desde la superficie saturada del material a través del flujo de aire. La velocidad de eliminación del vapor de agua está controlada por la velocidad de transferencia de calor hasta la superficie de evaporación, la cual suministra el calor latente para el líquido. Sólo cuando la velocidad de transferencia de masa es equivalente a la velocidad de transferencia de calor, es posible calcular la velocidad de secado  $R_c$  mediante la ecuación de transferencia de calor  $h_c(T_{bs}-T_{bh})/\lambda_{bh}$  o bien, con la ecuación de transferencia de masa  $k_y M_B(Y_{sat} - Y)$ . Estas condiciones se obtienen cuando la temperatura de la superficie húmeda del sólido es igual a la temperatura de bulbo húmedo del medio de secado. Con esta condición, la velocidad de secado permanecerá constante y por lo tanto los coeficientes de transferencia también permanecerán constantes; de ahí la importancia de calcular éstos en la región de velocidad de secado constante.

La predicción de transferencia de masa por unidad de área o por unidad de volumen no es tan sencilla. Requiere el conocimiento del mecanismo del movimiento del líquido y el vapor a través del sólido.

Como se mencionó anteriormente (sec 1.9), pueden conocerse con mayor seguridad los términos de la ecuación (3.1) debido a que el error en la determinación de  $T$ , afecta a  $(T - T_s)$  menos que el error de  $Y$ , al término  $(Y_s - Y)$ .

Con los valores obtenidos de  $R_c$  a partir de las pruebas experimentales, que pueden leerse gráficamente en curvas  $R$  vs  $t$  ó  $R$  vs  $X_{prom}$ , así como las temperaturas de bulbo seco ( $T_{bs}$ ) y de bulbo húmedo ( $T_{bh}$ ), correspondientes al periodo de velocidad constante según las tablas de datos experimentales presentadas en el capítulo 2, se pueden calcular los coeficientes de transferencia de calor ( $h_c$ ) y masa ( $k_y$ ).

A continuación se describe la manera como fueron obtenidos dichos coeficientes de transferencia de calor ( $h_c$ ) y transferencia de masa ( $k_y$ ), aunado con la obtención de una correlación para los valores de  $h_c$ .

#### 3.1.1 Coeficientes de transferencia de calor.

El valor del coeficiente de transferencia de calor  $h_c$ , depende de una variedad de factores, tales como velocidad, densidad, viscosidad, conductividad térmica y calor específico del fluido, geometría de la superficie, etc.

El coeficiente de transferencia de calor se calculó utilizando la siguiente expresión:

$$h_c = \frac{\lambda_{v,bh} R_c}{(T_{bs} - T_{bh})} \quad (3.1)$$

En este ejemplo se tomaron los datos reportados en la tabla 2.8 donde podemos leer los valores de temperatura de entrada y salida del aire, tanto de bulbo seco  $T_{bs}$  como de bulbo húmedo  $T_{bh}$  en el secador, con las que obtenemos temperaturas promedio durante el periodo de velocidad constante. El periodo de velocidad de secado constante se identifica utilizando la gráfica de  $R$  vs  $t$  experimental (figura 2.9), en la cual se lee el valor de  $R_c$  ( $\text{kg H}_2\text{O} / \text{h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) y el tiempo  $t$  (min) que éste permanece.

Es posible calcular el coeficiente de transferencia de calor dado el valor promedio de la temperatura de bulbo seco  $T_{bs} = (69+58)/2 = 63.5 \text{ }^\circ\text{C}$  y la temperatura de bulbo húmedo  $T_{bh} = (28+25)/2 = 26.5 \text{ }^\circ\text{C}$  (Tabla 2.8), las cuales son representativas en el periodo de velocidad constante y el valor de  $R_c = 1.26 \text{ kg/h m}^2$  (figura 2.10). En tablas de vapor<sup>(20)</sup> se indica que a  $T_{bh} = 26.5 \text{ }^\circ\text{C}$  el calor latente de evaporación  $\lambda_{v,bh}$  es  $583 \text{ kcal/kg H}_2\text{O}$ , por lo que al sustituir los valores anteriores en la ecuación (3.1) el coeficiente de transferencia de calor del secador resulta ser:

$$h_c = \frac{583 \text{ kcal/kg H}_2\text{O} * 1.26 \text{ kg H}_2\text{O/h m}^2}{(63.5 - 26.5)^\circ\text{C}} = 19\,853 \frac{\text{kcal}}{\text{h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}}$$

Esta sustitución de valores en la ecuación (3.1) es ejemplo para obtener el primer valor de  $h_c$  que se ve en la tabla 3.3

### 3.1.2 Coeficiente de transferencia de masa.

La rapidez con la cual un componente se transfiere de una fase a otra depende de un coeficiente de transferencia de masa, o de rapidez. La transferencia termina cuando se alcanza el equilibrio

Por tanto, para lograr una separación, se depende casi completamente de las diferencias de concentración que existen en el equilibrio y no de la diferencia en coeficientes de transferencia de masa

La expresión utilizada para determinar los coeficientes de transferencia de masa es.

$$k_y = \frac{R_c}{M_B(Y_{s,u} - Y)} \quad (3.2)$$

donde a partir de temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo pueden encontrarse los valores de  $Y$  y  $Y_{sat}$  en la carta de humedad (figura 2.7),  $M_B$  es el peso molecular del aire 29 kg aire seco/kg mol, donde el valor de  $R_c$  puede leerse de las curvas experimentales (figura 2.10).

Para  $T_{bs}$  de 63°C y  $T_{bh}$  de 26°C, la carta de humedad (fig. 2.7) permite determinar un valor de la humedad ( $Y$ ) de 0.013 kg H<sub>2</sub>O/kg A.S. y de la humedad saturada ( $Y_{sat}$ ) de 0.028 kg H<sub>2</sub>O/kg A.S. Al sustituir los valores anteriores en la ecuación (3.2) se obtiene el valor del coeficiente de transferencia de masa.

$$k_y = \frac{1.26 \text{ kg H}_2\text{O/h m}^2}{29 \text{ kg aire/kg mol}(0.028 - 0.013)\text{kg H}_2\text{O/kg A.S}} = 2896 \frac{\text{kg mol}}{\text{h m}^2}$$

### 3.2 Correlación de coeficientes de transferencia de calor y flujos máscicos de aire manejados en el equipo.

Esta parte de tratamiento de resultados consistió en determinar los coeficientes convectivos de transferencia de calor en el periodo de velocidad constante en cada prueba de secado con la ecuación (3.1) y los valores obtenidos pueden verse en la tabla 3.3. Posteriormente estos coeficientes  $h_c$  son correlacionados con los flujos máscicos de aire ( $G$ ) manejados en el equipo

Los valores de flujos máscicos de aire( $G$ ) se muestran en la tabla 3 1

Tabla 3 1 Flujo máscico de aire

Posición de la manija en el secador	$v_{\text{aire}}$ m/s	$\rho_{\text{aire prom}}$ kg/m <sup>3</sup>	$G$ kg/hm <sup>2</sup>
1	1.4	0.796	<b>4012</b>
2	2.0	0.815	<b>5868</b>
5	2.8	0.82	<b>8265</b>

Como ejemplo para la tabla 3 1 se muestra la siguiente memoria de cálculo

$$G = v \rho = (1.4 \text{ m/s})(0.796 \text{ kg/m}^3)(3600 \text{ s/h}) = 4012 \text{ kg/h m}^2$$

La tabla 3.2 muestra las temperaturas promedio en cada prueba, mismas que son utilizadas para leer de tablas las propiedades del calor latente de vaporización  $\lambda$  y densidad del aire  $\rho$

La tabla 3.3 reporta los valores obtenidos para el coeficiente de transferencia de calor,  $h_c$

Tabla 3.2 Datos de  $\lambda$  y  $\rho$

	Corrida No	P vapor (kPa)	T entrada aire °C		T salida aire °C		T <sub>prom aire</sub> °C		$\lambda$ T <sub>prom bs</sub> (kcal/ kg H <sub>2</sub> O)	$\rho$ aire T <sub>prom bs</sub> (kg/m <sup>3</sup> )
			T <sub>bs</sub>	T <sub>bh</sub>	T <sub>bs</sub>	T <sub>bh</sub>	T <sub>bs</sub>	T <sub>bh</sub>		
Serie 1 V = 1.4 m/s G = 4012 kg/h m <sup>2</sup>	1	138	69	28	58	25	63.5	26.5	583.00	0.809
	2	207	73	27	60	25	66.5	26	583.35	0.801
	3	276	75	29	65	26	70	27.5	582.28	0.793
	4	345	80	29	66	27	73	28	581.93	0.786
	5	414	84	29	71	28	72.5	28.5	581.57	0.787
									<b>T<sub>prom bs</sub></b> 69	
Serie 2 V = 2.0 m/s G = 5868 kg/h m <sup>2</sup>	1	138	59	27	54	24	56.5	25.5	583.70	0.826
	2	207	63	27	55	25	59	26	583.35	0.819
	3	276	65	29	55	35	60	27	582.64	0.817
	4	345	65	29	57	26	61	27.5	582.28	0.814
	5	414	75	30	63	26	69	28	581.57	0.795
									<b>T<sub>prom bs</sub></b> 61	
Serie 3 V = 2.8 m/s G = 8265 kg/h m <sup>2</sup>	1	138	56	30	52	24	54	27	582.64	0.832
	2	207	58	31	56	25	57	28	581.57	0.825
	3	276	60	32	58	25	59	28.5	581.48	0.819
	4	345	65	30	58	25	61.5	27.5	582.28	0.814
	5	414	68	29	63	27	65.5	28	581.93	0.804
									<b>T<sub>prom bs</sub></b> 59	

Tabla 3.3 Valores obtenidos de coeficientes de transferencia de calor,  $h_c$

	Corrida No	P vapor (kPa)	T prom		R <sub>c</sub> (kg H <sub>2</sub> O/h m <sup>2</sup> )	$\lambda$ 1prom bh (kcal/kg H <sub>2</sub> O)	h <sub>c</sub> (kcal/h m <sup>2</sup> °C)
			T <sub>bs</sub>	T <sub>bh</sub>			
Serie 1 V= 1.4 m/s G= 4012 kg/h m <sup>2</sup>	1	138	63.5	26.5	1.26	583.00	19.853
	2	207	66.5	26	1.44	583.35	20.741
	3	276	70	27.5	1.51	582.28	20.688
	4	345	73	28	1.59	581.93	20.561
	5	414	72.5	28.5	1.84	581.57	24.3202
Serie 2 V= 2.0 m/s G= 5868 kg/h m <sup>2</sup>	1	138	56.5	25.5	1.26	583.70	23.724
	2	207	59	26	1.49	583.35	26.339
	3	276	60	27	1.57	582.64	27.305
	4	345	61	27.5	1.61	582.28	22.943
	5	414	69	28	1.74	581.57	24.985
Serie 3 V= 2.8 m/s G= 8265 kg/h m <sup>2</sup>	1	138	54	27	1.40	582.64	30.211
	2	207	57	28	1.85	581.57	37.1001
	3	276	59	28.5	1.66	581.48	32.175
	4	345	61.5	27.5	2.00	582.28	34.251
	5	414	65.5	28	1.83	581.93	28.398

Organizando los valores de  $h_c$  por presión del vapor y con el valor correspondiente de  $G$  se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 3.4 Agrupación de valores de  $h_c$

G (kg/h m <sup>2</sup> )	Valores de $h_c$ (kcal/h m <sup>2</sup> °C) a presión del vapor constante				
	P=138 kPa	207 kPa	276 kPa	345 kPa	414 kPa
4012	19 853	20 745	20.688	20 561	24 320
5868	23 724	26 339	27 305	22 943	24 985
8265	30 211	37 1001	32 175	34 251	28 398

en donde la representación gráfica de  $h_c$  vs  $G$  se observa en la figura 3.1. Aquí mismo es incluida la curva que sigue un modelo de referencia <sup>(1)(3)</sup>

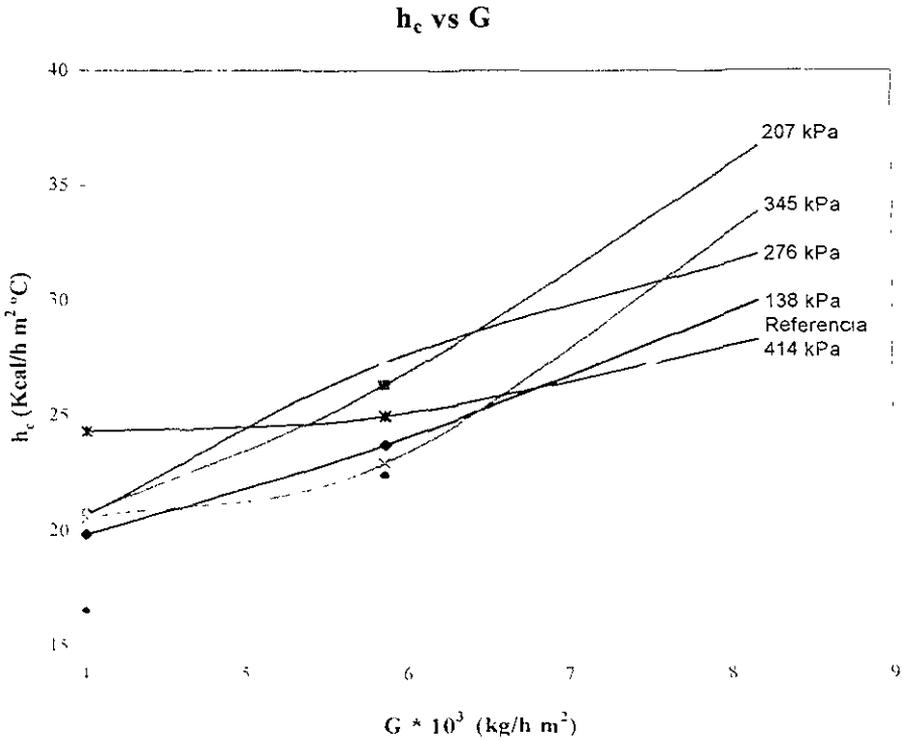


Figura 3.1 Coeficientes de transferencia de calor en función del flujo másico del aire

Las correlaciones realizadas se proponen del tipo potencial,  $h_c = A G^B$  ya que son las que más se ajustan a los datos obtenidos de manera experimental y se presentan a continuación:

G (kg/h m <sup>2</sup> )	hc (kcal/h m <sup>2</sup> °C) P=138 kPa	$hc = 0.160 G^{0.58}$ (kcal/h m <sup>2</sup> °C)  $r = 0.993$
4012	19 853	
5868	23 724	
8265	30 211	

G (kg/h m <sup>2</sup> )	hc (kcal/h m <sup>2</sup> °C) P=207 kPa	$hc = 0.026 G^{0.8}$ (kcal/h m <sup>2</sup> °C)  $r = 0.991$
4012	20 745	
5868	26 339	
8265	37 1001	

G (kg/h m <sup>2</sup> )	hc (kcal/h m <sup>2</sup> °C) P=276 kPa	$hc = 0.129 G^{0.613}$ (kcal/h m <sup>2</sup> °C)  $r = 0.993$
4012	20 688	
5868	27,305	
8265	32 175	

G (kg/h m <sup>2</sup> )	hc (kcal/h m <sup>2</sup> °C) P=345 kPa	$hc = 0.059 G^{0.7}$ (kcal/h m <sup>2</sup> °C)  $r = 0.94$
4012	20 561	
5868	22 943	
8265	34 251	

G (kg/h m <sup>2</sup> )	hc (kcal/h m <sup>2</sup> °C) P=414 kPa	$hc = 4.12 G^{0.212}$ (kcal/h m <sup>2</sup> °C)  $r = 0.925$
4012	24 32	
5868	24 985	
8265	28 398	

Las ecuaciones obtenidas presentan su coeficiente de correlación (r) correspondiente con lo cual podemos decir, en conjunto con la observación gráfica, que las tres primeras presentan mejor la tendencia

No sólo es el coeficiente  $r$  el que nos da señal de mejores condiciones de operación, si no la ecuación que nos presenta o alcanza mayores valores para los coeficientes de transferencia de calor  $h_c$  y además la que mejor se acerca al modelo propuesto por la literatura <sup>(1)(3)</sup>.

$$h_c = 0.0176 G^{0.8} \text{ kcal / h m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.3)$$

La correlación que en este caso muestra mejores resultados a favor del proceso es la segunda ecuación que corresponde a 207 kPa,

$$h_c = 0.026 G^{0.8} \text{ kcal / h m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.4)$$

Se hace notar que la ecuación obtenida es exclusiva para la presión manejada de 207 kPa, con velocidades de aire entre 1.4m/s y 2.8 m/s (tabla 3.6)

Los valores de  $h_c$  obtenidos de manera experimental se muestran en la tabla 3.3 o 3.4, en general se observa que van de 19 a 37 kcal/ h m<sup>2</sup> °C y que corresponden al intervalo de  $G$  comprendido entre los 4012 y 8265 kg/h m<sup>2</sup> alcanzado con el equipo.

Tabla 3.5 Comparación de valores de  $h_c$  experimentales y los reportados en la bibliografía <sup>(3)</sup>, considerando sólo el intervalo de  $G$  alcanzado con el equipo.

$G$ (kg / h m <sup>2</sup> )	$h_c$ experimentales (kcal / h m <sup>2</sup> °C)	$h_c$ de la literatura (kcal / h m <sup>2</sup> °C)
4012	19	20
8265	37	44

En la tabla 3.5 se hace la comparación de los valores de  $h_c$  experimentales y  $h_c$  reportados en la bibliografía<sup>(3)</sup>. Puede notarse que existe similitud entre estos valores y de esto podemos decir que se tiene un buen funcionamiento del equipo para secar el material empleado (cartón)

La tabla 3.6 muestra los tiempos totales de secado que se lograron alcanzar con el equipo las diferentes condiciones de operación.

Tabla 3.6 Tiempos de secado alcanzados con el equipo (en minutos).

Presión del vapor kPa	Serie 1	Serie 2	Serie 3
	Vel. aire= 1.4 m/s	Vel. aire= 2.0 m/s	Vel. aire= 2.8 m/s
138	80 min	80 min	85 min
207	75	75	65
276	70	65	70
345	65	70	65
414	60	55	60

Por la recomendación de trabajar estrictamente dentro del intervalo de condiciones óptimas, podríamos decir que el tiempo mínimo de secado sería el de 65 minutos, que es a lo que se llegó experimentalmente y según la ecuación obtenida (ecuación 3.4), se puede predecir un tiempo de secado para comparar con el experimental.

Para ejemplificar lo anterior se tomaron datos experimentales de este trabajo para la solución de un problema de secado.

### 3.3 Solución de un problema de secado.

Se desea secar hojas de cartón de 19x19 cm y un espesor de 3 mm en el secador de charolas desde un contenido de humedad de 1.36 kg H<sub>2</sub>O/ kg s.s ( fig. 2.19 o tabla 2.44 apéndice B). Las charolas son 4 de 19X19X1 cm de espesor y se van a distribuir de tal manera que el secado ocurre desde la superficie superior solamente. Operando el equipo a 207 kPa de presión y con velocidad del aire a 2.8 m/s, circula aire a través de los entrepaños a una temperatura promedio de 57 °C y con una temperatura promedio de bulbo húmedo de 28 °C ( tabla 3.2, el flujo másico G es de 8265 kg/h m<sup>2</sup> ).

De la información previa en condiciones similares de secado (serie 3, corrida 2, figura 2.34) se observa que el contenido de humedad crítico será 0.65 kg H<sub>2</sub>O/ kg s.s aproximadamente.

Determine el tiempo requerido de secado si se pretende secar el material hasta un contenido de humedad de  $X_f = 0.04$  kg H<sub>2</sub>O / kg s.s.

- Para este secador intermitente, la curva de velocidad de secado ( R ) contra contenido de humedad promedio ( $X_{prom}$ ) presenta la forma típica (figura 2.34). Puede suponerse que el periodo de velocidad constante se inicia en el contenido inicial de humedad. Esto es equivalente a suponer que la temperatura inicial del material es de 28 °C.

Para la velocidad de secado constante  $R_c$ , es posible calcular el coeficiente de transferencia de calor  $h_c$ , mediante la ecuación (3.4) estimada experimentalmente para este secador de charolas.

$$h_c = 0.026 G^{0.8} \text{ kcal / h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_c = 0.026 (8265)^{0.8} \text{ kcal / h m}^2 \text{ }^\circ\text{C} = \mathbf{35.38 \text{ kcal / h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}}$$

Por lo que se puede obtener  $R_c$ :

$$R_c = \frac{h_c}{\lambda} (T - T_{\text{sat}}) = \frac{35.38 \text{ kcal / h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}}{581.93 \text{ kcal / kg H}_2\text{O}} (57 - 28)^\circ\text{C} = \mathbf{1.763 \text{ kg H}_2\text{O / h m}^2}$$

de tablas de vapor  $\lambda_{T_{\text{bh}}=28^\circ\text{C}} = 581.93 \text{ kcal / kg H}_2\text{O}$

El tiempo de secado durante el periodo de velocidad constante, entonces es:

$$R_c = \frac{W_{s,s}}{A} \left( -\frac{dX}{dt} \right)$$

$$R_c = \frac{W_{s,s}}{A} \frac{(X_2 - X_1)}{t_c - t_1}$$

donde

$t_1$  = tiempo inicial = 0 h

$t_c$  = tiempo de secado durante el periodo de velocidad constante.

$A$  = área de transferencia = .19m X .19m = 0.1444 m<sup>2</sup>.

$W_{s,s}$  = peso del sólido seco = 0.124 kg (tabla 2.42 del apéndice B).

$X_1$  = humedad al inicio del secado = 1.36 kg H<sub>2</sub>O / kg s.s

$X_2$  = contenido de humedad al final del periodo de velocidad constante = 0.65 kg H<sub>2</sub>O/kg s.s  
(Valor leído de la curva R vs Xprom, figura 2.34).

$$t_c - t_1 = \frac{0.124 \text{ kg s.s}}{0.1444 \text{ m}^2} \frac{-(0.65 - 1.36) \text{ kg H}_2\text{O/kg s.s}}{1.763 \text{ kg H}_2\text{O / h m}^2} = 0.34 \text{ h} = \mathbf{20 \text{ minutos}}$$

El tiempo de secado durante el periodo de velocidad decreciente puede obtenerse de la siguiente manera,

$$t_d - t_c = \frac{-W_{s,s} (X_2 - X_1)}{A R_c} \ln \frac{X_1 - X_1}{X_c - X_1}$$

de la carta de humedad (figura 2.7) con  $T_{bs} = 57\text{ }^\circ\text{C}$  y  $T_{bh} = 28\text{ }^\circ\text{C}$

$$Y = 0.02 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg A.S} \quad \text{-----}\rightarrow \quad X_E = 0.02 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg s.s}$$

$$Y_{sat} = 0.032 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg A.S}$$

y donde

$t_d$  = tiempo de secado durante el periodo de velocidad decreciente

$t_i$  = tiempo inicial del periodo de secado = 0 h

$X_c$  = Contenido de humedad al inicio del periodo de velocidad decreciente  
= 0.65 kg H<sub>2</sub>O/kg s.s (Valor leído de la curva R vs  $X_{prom}$ , figura 2.34).

$X_E$  = humedad de equilibrio = 0.02 kg H<sub>2</sub>O / kg s.s

$X_f$  = humedad final del material = 0.04 kg H<sub>2</sub>O / kg s.s

$$t_d = \frac{-0.124 \text{ kg} (0.65 - 0.02) \text{ kg H}_2\text{O/kg s.s}}{(0.1444 \text{ m}^2) (1.763 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{h m}^2)} \ln \frac{0.04 - 0.02}{0.65 - 0.02} = (-1.3 \text{ h})(-3.4) = 1 \text{ h}$$

$$= 1 \text{ h} = \underline{\underline{60 \text{ minutos}}}$$

El tiempo total de secado será de:

$$t_{tot} = t_c + t_d = (20 + 60) \text{ minutos} = \underline{\underline{80 \text{ minutos}}}$$

El tiempo de secado depende de las condiciones de operación y de la humedad pretendida o deseada para el material. Para éste problema planteado se requiere de un tiempo de secado de 72 minutos para que el material llegue hasta un contenido de humedad de 0.04 kg H<sub>2</sub>O / kg s.s. Material considerado seco, pues está casi a la humedad de equilibrio de 0.02 kg H<sub>2</sub>O / kg s.s.

Con el modelo encontrado para este secador de charolas (ecuación 3.4) puede estimarse el tiempo de secado correspondiente al periodo de velocidad constante, utilizando como referencia la información que aquí se presenta ya que como se nota en este ejemplo desarrollado, se necesita de datos para resolver el problema o estimar un tiempo de secado.

El tiempo estimado para secar el cartón es de 80 minutos con la ecuación planteada para este secador (ec. 3.4) y sobrepasa al obtenido de manera experimental de 65 minutos bajo las mismas condiciones de operación. Con una desviación del 18 % el equipo seca el cartón en un tiempo poco menor al predicho, echo que también puede hablar de un buen funcionamiento del equipo

Puede decirse que con el modelo estimado y la información experimental de este trabajo sirven de referencia para estimar tiempos de secado para el cartón exclusivamente con las mismas características, partiendo de aproximadamente mismos contenidos de humedad.

### 3.4 Análisis.

En la figura 3.1 se presentó la trayectoria que sigue el modelo de referencia (ecuación 3.3) utilizando los flujos máxicos estimados en el secador y pudo observarse que las curvas experimentales se mantienen por encima de ésta. Algo que puede decirse sobre esto es que el modelo de la bibliografía se hizo para un sistema diferente<sup>(3)</sup>.

Se tienen cinco curvas con trayectoria ascendente, pero solo tres de ellas son las que presentan mejor comportamiento ya que las curvas correspondientes a los 347 y 414 kPa presentan un mínimo incremento en su primera etapa, lo que significa no tener mejores resultados con el aumento de presión del vapor y velocidad de aire. De otra manera significa que se gasta más energía sin obtener los mejores resultados.

Las tres primeras y mejores curvas presentan de manera ascendente mejores coeficientes de transferencia conforme se aumenta la temperatura del aire con el aumento de la presión del vapor en el equipo; pero sólo es una la que sobresale y presenta mejor similitud con la ecuación de referencia (3.3).

Esta ecuación elegida (ec. 3.4) corresponde a los 207 kPa que combinando con una velocidad de aire de 2.8 m/s alcanza un buen tiempo de secado con un mínimo en consumo de vapor.

## CONCLUSIONES.

Los objetivos definidos al inicio del presente trabajo se cumplen primeramente con las pruebas de secado, la construcción de las correspondientes curvas de secado con los datos experimentales que bien presentan similitud con las de la bibliografía y el modelo propuesto al correlacionar los coeficientes convectivos de transferencia de calor con los flujos máximos del aire. Modelo con el que se estiman tiempos de secado durante el periodo de velocidad constante.

El hecho de haber secado muestras de material en este tipo de secador con diferentes condiciones de operación, nos llevó a encontrar la combinación óptima de presión del vapor y velocidad del aire en el equipo a pesar de las dificultades que se presentan al predecir o definir las curvas de velocidad de secado.

El seguimiento para establecer las condiciones óptimas de operación del equipo fue primeramente hacer pruebas de secado, obtener curvas de secado, estimar la velocidad de secado en el periodo de velocidad constante correspondiente a cada prueba, determinar los coeficientes de transferencia de calor y obtener la correlación empírica correspondiente al tipo de equipo utilizado. El modelo obtenido se aplica de manera particular al secador utilizado para estimar tiempos de secado en el periodo de velocidad constante.

A partir de esto, podemos decir que el equipo resulta ser adecuado para el tipo de material manejado en este trabajo, cartón (hojas de 19cm X 19cm con 3mm de espesor).

El equipo finalmente cumple con su objetivo, pues su función es secar materiales y su buen funcionamiento puede notarse desde que se logra encontrar similitud entre las curvas de secado experimentales y las de la bibliografía.

De esta manera queda establecida la forma de evaluar un equipo de secado para un material en particular. Para algún otro material tendrá que llevarse el mismo seguimiento planteado en este trabajo y finalmente indicar hasta donde es favorable operar o fijar condiciones de operación en el equipo para encontrar el tiempo mínimo de secado y disminuir el consumo de energía..

La importancia de haber obtenido estos valores de  $h_c$  está en que nos indican con que facilidad se transfiere el calor del aire al material húmedo y como consecuencia puede también acelerar la transferencia de agua contenida en el material hacia la corriente de aire.

Sabemos que los coeficientes de transferencia no son una propiedad y su magnitud cambia de un problema a otro, aún cuando pueden estar involucrados el mismo sólido y la misma corriente de secado.

Por último, los coeficientes de transferencia tienen mucha importancia, porque ayudan a evaluar un proceso de secado, controlan también el tiempo que se necesita para el secado en este caso, el tamaño y costo del equipo por utilizar. debido a que  $k_c$  regula la rapidez con

la cual se alcanza el equilibrio y  $h_c$  que se define al estipular el área y una diferencia de temperaturas.

Para la gran mayoría de problemas de interés práctico, se confía con demasiada frecuencia en la determinación experimental de los coeficientes de transferencia, de ahí la importancia de este trabajo. Además, queda como propuesta para ser utilizado como guión experimental y no está limitado puesto que puede proponerse hacer pruebas de secado con otros materiales, tales como algodón, pigmentos, etc.

## REFERENCIAS

---

- 3 Fred Kershaw, *Drying Machinery*. Ind. Eng. Chem, vol 30, no10, pag. 1115, (1938).
- 4 Ernest R.C, Ardero D.B, Schmied O.K, and Tiller F.M, *Drying Commercial Solids*. Ind. Eng Chem. vol 30, no 10, pag 1119, (1938).
- 5 Molstad M.C, Farevaag P, and Farrel J.A, *Rate of Evaporation from a Free Water Surface by a Perpendicular air stream*. Ind. Eng Chem. vol 30, no 10, pag 1131, (1938).
- 6 Broughton D.B, *The Drying of Solids.....* Ind. Eng Chem. vol 37, no 12, pag 1184, (1945).
- 7 Sherwood T.K, *The Drying of Solids I*. Ind. Eng Chem. vol 21, no 1, pag 12, (1929).
- 8 Sherwood T.K, *The Drying of Solids II*. Ind. Eng Chem. vol 21, no 10, pag 976, (1929).
- 9 Sherwood T.K, *The Drying of Solids III*. Ind. Eng Chem. vol 22, no 2, pag 132, (1930).
- 0 Sherwood T.K. *The Drying of Solids IV*. Ind. Eng Chem. vol 24, no 3, pag 307, (1932).
- 1 Ocon J. y Tojo G, *Problemas de Ingeniería Química*. Tomo II. Aguilar. Madrid. (1972).
- 2 Coulson J.M, Richardson J.F. *Ingeniería Química*. Tomo II. Reverté. España. (1979).
- 3 Badger W. L, Banchemo J.T, *Introducción a la Ingeniería Química*. Mc Graw-Hill, México, (1981).
- 4 Foust A.S y Wenzel L A. *Principios de Operaciones Unitarias*. CECSA, México. (1972)
- 5 McCabe I. W. Smith J.C and Harriott P *Unit Operations of Chemical Engineering*. McGraw-Hill, Singapore, (1985).

- 14 Geankoplis C.J, Transport Processes and Unit Operations. Allyn and Bacon, USA (1995).
- 15 Treybal R.E, Operaciones de Transferencia de Masa. McGraw-Hill, México, (1993).
- 16 Mott R.L, Mecánica de Fluidos Aplicada. Prentice Hall, México, (1996).
- 17 Perry J.H, Green D.H, y Moloney J.D, Manual del Ingeniero Químico, Tomo V. McGraw-Will, México, (1992).
- 18 Valiente A.B, Noriega N.B, Manual del ingeniero Químico. Limusa, México, (1993).
- 19 Chapra S.C, y Canale R.P, Métodos Numéricos Para Ingenieros con Aplicaciones en Computadoras Personales. McGraw-Hill, México, (1994).
- 20 CRANE, Flow of Fluids. McGraw-Hill, U.S.A, (1972).
- 21 Nonhebel G. M.A, Moss A. A. H. El secado de sólidos en la industria química Reverté, España, (1978).

## APENDICE A

### Esquema del secador de charolas.

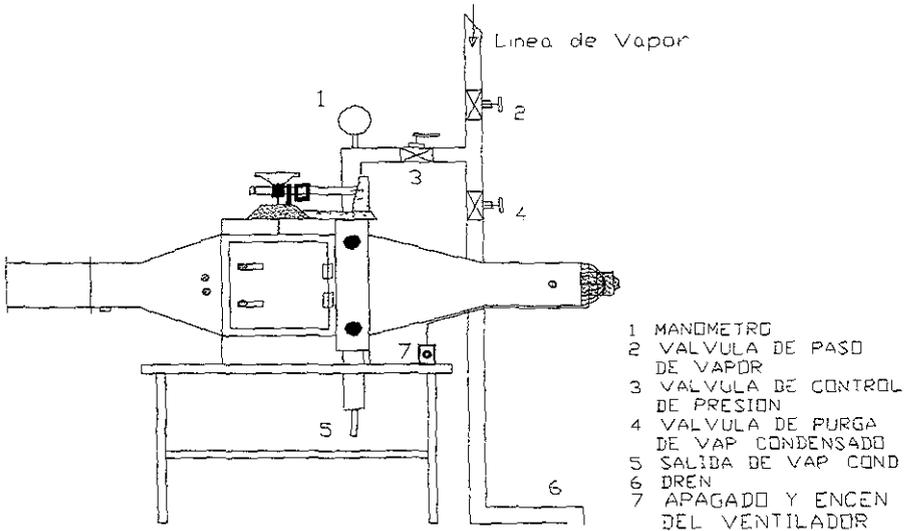


Fig A1 Secador de charolas  
Vista lateral derecha

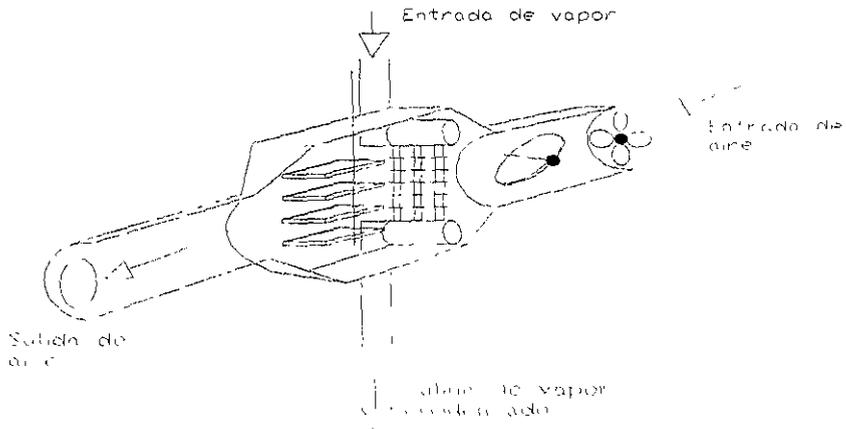


Fig A2 Vista superior del secador de charolas

### Manejo del secador de charolas.

- Verificar disponibilidad de vapor y corriente eléctrica.
- Abrir válvulas 2 y 4 (figura A.1), para purgar todo el condensado de la línea de vapor.
- Cerrar la válvula de purga 4 y abrir la válvula 3 ligeramente hasta llegar a la presión acordada.
- Colocar los termómetros en los lugares correspondientes tanto de bulbo seco como de bulbo húmedo (figura A.3).
- Introducir las charolas con el material húmedo al gabinete del secador.
- Dar posición a la manija para fijar velocidad de aire.
- Registrar el peso inicial del material húmedo con ayuda de la balanza integrada.
- Iniciar el secado con el encendido del ventilador.
- Tomar lecturas cada 5 minutos de peso del material húmedo, temperaturas de salida tanto de bulbo seco como de bulbo húmedo y verificar que la presión del vapor se mantenga fija todo el tiempo.
- La operación podrá darse por terminada cuando se registren por lo menos 3 lecturas iguales de peso de material.
- Las temperaturas de entrada se toman al arrancar el equipo nuevamente a las mismas condiciones, colocando los termómetros de bulbo seco y bulbo húmedo como lo muestra la figura A.3.

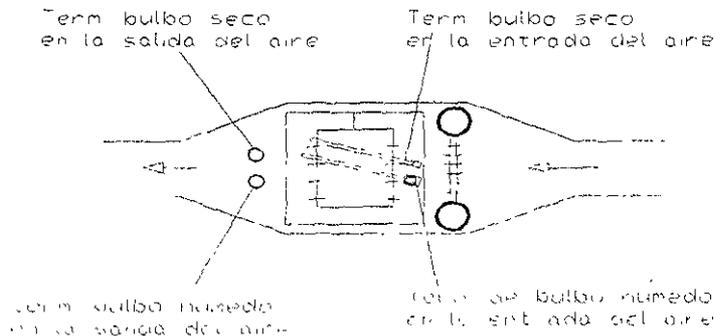


Figura A.3. Ubicación de los termómetros.

## APENDICE B

En esta parte se encuentran las tablas de datos experimentales y resultados obtenidos de las pruebas de secado correspondientes a las series 2 y 3. Utilizadas además para trazar las correspondientes curvas de secado presentadas en el capítulo 2.

Las tablas 2.22 y 2.38 indican las condiciones a las que se operó en cada caso y se hacen acompañar de los datos experimentales junto con sus resultados.

### Serie 2.

Tabla 2.22. Condiciones a las que se operó en la serie 2.

	Corrida	Presión del vapor
Velocidad de aire = 2.0 m/seg	1	138 kPa
	2	207 kPa
Area del material expuesta al secado (A) = 0.1444 m <sup>2</sup>	3	276 kPa
	4	345 kPa
	5	414 kPa

En la tabla 2.23 se indican las condiciones de operación de esta prueba de secado y los datos obtenidos se muestran en la tabla 2.24. En esta tabla tenemos una primera columna de tiempo (t) marcado cada 5 minutos. Una columna de peso total ( $W_{tot}$ ) con los valores de peso registrados cada 5 minutos durante la operación. Se muestra también una columna de peso del material húmedo ( $W_h$ ) que indica el peso neto del material húmedo que se obtiene al hacer la diferencia entre el peso total y el peso de las charolas ( $W_{char}=1348$  g), ( $W_{tot} - W_{char} = W_h$ ).

En esta misma tabla se encuentran los valores de temperatura registrados durante el secado ( $T_{bs}$ ,  $T_{bh}$ ) de entrada y de salida.

Los resultados de esta corrida 1 se muestran en la tabla 2.25. En la primera columna tenemos nuevamente el peso del material húmedo ( $W_h$ ) en unidades de kilogramos (kg)

La columna de humedad (X) se obtiene con la expresión

$$X = \frac{W_h - W_{s,s}}{W_{s,s}} \quad (2.13)$$

Tabla 2.23 Condiciones de operación y datos de la corrida 1.

Condiciones de Operación		Peso de charolas con columpio $W_{char}$ (g)	Peso inicial del material húmedo $W_h$ (g)	Peso del material al final del secado $W_{s,s}$ (g)
Velocidad del aire (m/seg)	Presión del vapor (kPa)			
2.0	138	1348.0	232.5	121.0

Tabla 2.24 Tabla de datos experimentales Corrida 1.

Tiempo t (minutos)	Tiempo t (horas)	Peso total $W_{tot}$ (g)	Peso del Material húmedo $W_h$ ( $W_{tot} - W_{char}$ ) (g)	Temperatura de salida °C		Temperatura de entrada °C	
				$T_{bs}$	$T_{bh}$	$T_{bs}$	$T_{bh}$
0	0	1580.5	1580.5-1348=232.5	45	24		
5	0.083	1566	218	54	24	59	* 27
10	0.166	1550.5	202.5	55	24	59	27
15	0.250	1536	188	55	25	59	27
20	0.333	1525	177	55	25	59	27
25	0.416	1513.5	165.5	56	25	60	27
30	0.500	1505.5	157.5	56	25	60	27
35	0.583	1498	150	56	26	60	27
40	0.666	1492	144	57	26	60	27
45	0.750	1485.5	137.5	57	26	60	27
50	0.833	1481	133	57	26		
55	0.916	1478	130	57	26		
60	1.000	1474.5	126.5	57	26		
65	1.083	1472	124	57	26		
70	1.166	1471	123	57	26		
75	1.250	1470	122	57	26		
80	1.333	1469	121	55	26		
85	1.416	1469	121	55	26		
90	1.500	1469	121	55	26		

Como ejemplo para el primer y segundo valor de la columna de humedad (X)

$$1- \quad X = \frac{0.2325 - 0.121}{0.121} = 0.92 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{Kg s s}}$$

$$2- \quad X = \frac{0.218 - 0.121}{0.121} = 0.80 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{Kg s s}}$$

Tabla 2.25 Tabla de resultados Corrida 1.

Peso del Material húmedo $W_h$ (kg)	Humedad $X$ ( $W_h - W_{s,s} / W_{s,s}$ ) (kg H <sub>2</sub> O/ kg S.S)	Humedad Promedio $X_{prom}$ ( $X_1 + X_2$ ) / 2 (kg H <sub>2</sub> O/ kg S.S)	Velocidad de secado $R$ (kg H <sub>2</sub> O/ h m <sup>2</sup> )
0.2325	0.92	0.86	1.20
0.218	0.80	0.72	1.62
0.2025	0.64	0.59	0.86
0.188	0.55	0.51	0.91
0.177	0.46	0.41	0.95
0.1655	0.37	0.33	0.66
0.1575	0.30	0.27	0.62
0.150	0.24	0.31	0.49
0.144	0.19	0.16	0.54
0.1375	0.14	0.12	0.37
0.133	0.10	0.08	0.25
0.130	0.07	0.06	0.29
0.1265	0.04	0.03	0.21
0.124	0.02	0.02	0.08
0.123	0.02	0.012	0.08
0.122	0.008	0.004	0.08
0.121	0		
0.121			

Los valores de la columna de humedad promedio ( $X_{prom}$ ) se obtuvieron con los valores de la columna de humedad ( $X$ )

$$X_{prom} = \frac{X_1 + X_2}{2}$$

Para el primer y segundo valor de esta columna

$$1- X_{prom} = \frac{0.92 + 0.80}{2} = 0.86 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg s s}}$$

$$2- X_{prom} = \frac{0.80 + 0.64}{2} = 0.72 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg s s}}$$

Valor que representa los primeros 5 minutos

Valor que representa los siguientes 5 minutos

Para la velocidad de secado se utilizó la expresión (1.5)

$$R = \frac{W_s - (-dX)}{A dt} \quad (1.5)$$

Como ejemplo para el primer y segundo valor de la columna de velocidad de secado(  $R$  )

$$1- R = \frac{0.121 \text{ kg s.s} - (0.80 - 0.92) \text{ kg H}_2\text{O}}{0.1444 \text{ m}^2 (0.083 - 0) \text{ h}} = 1.20 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{h m}^2}$$

$$2- R = \frac{0.121 \text{ kg s.s} - (0.64 - 0.80) \text{ kg H}_2\text{O}}{0.1444 \text{ m}^2 (0.083 - 0) \text{ h}} = 1.62 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{h m}^2}$$

De manera semejante se presentan las tablas para las siguientes corridas.

Tabla 2 26 Condiciones de operación y datos de la corrida 2

Condiciones de Operación		Peso de charolas con columpio $W_{char}$ (g)	Peso inicial del material húmedo $W_h$ (g)	Peso del material Después del secado $W_{ss}$ (g)
Velocidad del aire ( m/seg )	Presión del vapor ( kPa )			
2 0	207	1 348 0	249 5	121 0

Tabla 2 27 Tabla de datos experimentales Corrida 2

Tiempo t (minutos)	Tiempo t (horas)	Peso total $W_{tot}$ (g)	Peso del Material húmedo $W_h$ ( $W_{tot} - W_{char}$ ) (g)	Temperatura de salida °C		Temperatura de entrada °C	
				$T_{bs}$	$T_{bh}$	$T_{bs}$	$T_{bh}$
0	0	1597 5	1597 5-1348= 249 5	40	22	55	27
5	0 083	1580 5	232 5	54	25	61	27
10	0 166	1562 5	214 5	55	25	63 *	27
15	0 250	1544 5	196 5	56	25	63	27
20	0 333	1530 5	182 5	57	25	63	27
25	0 416	1517 5	169 5	57	25	63	27
30	0 500	1507 5	159 5	57	25	63	28
35	0 583	1498 5	150 5	57	25	63	27
40	0 666	1491 5	143 5	57	25		
45	0 750	1485 5	137 5	58	25		
50	0 833	1480 5	132 5	58	25		
55	0 916	1476 5	128 5	58	25		
60	1 000	1473 5	125 5	58	25		
65	1 083	1471 5	123 5	58	25		
70	1 166	1469 5	121 5	58	25		
75	1 250	1469	121	58	25		
80	1 333	1469	121	58	25		
85	1 416	1469	121	58	25		

En las columnas de temperatura se encuentra un asterisco marcando la temperatura que prevalece durante el periodo de velocidad constante, mismas que se utilizaron para sacar una temperatura promedio y con ésta obtener datos de densidad ( $\rho$ ), calor latente de vaporización ( $\lambda$ ) y el cálculo de  $h_c$ . Los valores obtenidos se encuentran en las tablas 3 2 y 3 3, la interpretación gráfica de los valores de  $h_c$  se encuentra en la figura 3 1

Tabla 2.28 Tabla de resultados. Corrida 2

Peso del Material húmedo $W_h$  (kg)	Humedad $X$ $(W_h - W_{ss}/W_{ss})$  (kg H <sub>2</sub> O/kg S S)	Humedad Promedio $X_{prom}$ $(X_1 + X_2) / 2$  (kg H <sub>2</sub> O/kg S S)	Velocidad de secado $R$  (kg H <sub>2</sub> O/ h m <sup>2</sup> )
0.2495	1.062	0.991	1.41
0.2325	0.921	0.846	1.49
0.2145	0.772	0.698	1.48
0.1965	0.624	0.566	1.16
0.1825	0.508	0.454	1.08
0.1695	0.400	0.359	0.82
0.1595	0.318	0.280	0.75
0.1505	0.243	0.214	0.57
0.1435	0.186	0.161	0.50
0.1375	0.136	0.115	0.41
0.1325	0.095	0.078	0.33
0.1285	0.062	0.049	0.25
0.1255	0.037	0.028	0.17
0.1235	0.020	0.012	0.16
0.1215	0.004	0.002	0.04
0.121	0		
0.121			
0.121			

Tabla 2 29 Condiciones de operación y datos de la corrida 3.

Condiciones de Operación		Peso de charolas con columpio Wchar (g)	Peso inicial del material húmedo Wh (g)	Peso del material al final del secado Ws s (g)
Velocidad del aire ( m/seg )	Presión del vapor ( kPa )			
2 0	276	1 348 0	236 5	121 0

Tabla 2 30 Tabla de datos experimentales Corrida 3

Tiempo t (minutos)	Tiempo t (horas)	Peso total Wtot (g)	Peso del Material húmedo Wh ( Wtot - Wchar ) (g)	Temperatura de salida °C		Temperatura de entrada °C	
				Tbs	Tbh	Tbs	Tbh
0	0	1584 5	236 5	45	24	64	29
5	0 083	1568 5	220 5	55	25	65	* 29
10	0 166	1552 5	204 5	56	25	65	29
15	0 250	1533 5	185 5	58	26	65	29
20	0 333	1518 5	170 5	58	26	65	29
25	0 416	1505 5	157 5	59	26	65	29
30	0 500	1492 5	144 5	59	26	65	29
35	0 583	1486 5	138 5	59	26	65	29
40	0 666	1479 5	131 5	59	26	65	29
45	0 750	1475 5	127 5	59	26		
50	0 833	1472 5	124 5	59	26		
55	0 916	1470 5	122 5	59	26		
60	1 000	1469 5	121 5	59	26		
65	1 083	1469	121	59	26		
70	1 166	1469	121	59	26		
75	1 250	1469	121	59	26		

Tabla 2.31 Tabla de resultados Corrida 3.

Peso del Material húmedo Wh (kg)	Humedad X (Wh - Wss /Ws s) (kg H <sub>2</sub> O/ kg S S)	Humedad Promedio $X_{prom}$ (X <sub>1</sub> +X <sub>2</sub> )/2 (kg H <sub>2</sub> O/ kg S S)	Velocidad de secado R (kg H <sub>2</sub> O/ h m <sup>2</sup> )
0.2365	0.921	0.871	0.995
0.2205	0.822	0.756	1.32
0.2045	0.690	0.611	1.57
0.1855	0.533	0.471	1.24
0.1705	0.409	0.355	1.08
0.1575	0.301	0.247	1.07
0.1445	0.194	0.169	0.50
0.1385	0.144	0.115	0.58
0.1315	0.086	0.069	0.33
0.1275	0.053	0.041	0.24
0.1245	0.029	0.020	0.17
0.1225	0.0124	0.008	0.08
0.1215	0.004	0.002	0.03
0.121	0		
0.121			
0.121			

Tabla 2.32 Condiciones de operación y datos de la corrida 4

Condiciones de Operación		Peso de charolas con columpio Wchar (g)	Peso inicial del material húmedo Wh (g)	Peso del material Al final del secado Ws s (g)
Velocidad del aire (m/seg)	Presión del vapor (kPa)			
2.0	345	1348.0	230.5	121.0

Tabla 2.33 Tabla de datos experimentales Corrida 4.

Tiempo t (minutos)	Tiempo t (horas)	Peso total Wtot (g)	Peso del Material húmedo Wh ( Wtot - Wchar ) (g)	Temperatura de salida °C		Temperatura de entrada °C	
				Tbs	Tbh	Tbs	Tbh
0	0	1578.5	230.5	49	24		
5	0.083	1567	219	55	25	65	27
10	0.166	1551	203	57	26	65	* 29
15	0.250	1535	187	57	26	65	28
20	0.333	1521	173	58	26	65	29
25	0.416	1508	160	59	26	65	29
30	0.500	1499	151	59	26	65	29
35	0.583	1490	142	59	26	65	29
40	0.666	1483.5	135.5	59	26		
45	0.750	1479	131	59	26		
50	0.833	1475	127	59	26		
55	0.916	1472	124	59	26		
60	1.000	1471	123	60	26		
65	1.083	1470	122	60	26		
70	1.166	1469	121	60	26		
75	1.250	1469	121	60	26		
80	1.333	1469	121	60	26		

Tabla 2.34 Tabla de resultados Corrida 4

Peso del Material húmedo $W_h$  (kg)	Humedad $X$ ( $W_h - W_{ss} / W_{ss}$ )  (kg H <sub>2</sub> O/ kg S S)	Humedad Promedio $X_{prom}$ ( $X_1 + X_2$ )/2  (kg H <sub>2</sub> O/ kg S S)	Velocidad de secado $R$  (kg H <sub>2</sub> O/ h m <sup>2</sup> )
0.2305	0.904	0.856	0.95
0.219	0.809	0.743	1.32
0.203	0.677	0.611	1.32
0.187	0.545	0.487	1.16
0.173	0.429	0.375	1.07
0.160	0.322	0.285	0.74
0.151	0.248	0.210	0.75
0.142	0.173	0.146	0.53
0.1355	0.120	0.101	0.38
0.131	0.082	0.066	0.32
0.127	0.050	0.037	0.26
0.124	0.024	0.020	0.08
0.123	0.016	0.012	0.08
0.122	0.008	0.004	0.08
0.121	0		
0.121			
0.121			

Tabla 2.35 Condiciones de operación y datos de la corrida 5

Condiciones de Operación		Peso de charolas con columpio Wchar (g)	Peso inicial del material húmedo Wh (g)	Peso del material Después del secado Wss (g)
Velocidad del aire (m/seg)	Presión del vapor (kPa)			
2.0	414	1348.0	247	120

Tabla 2.36 Tabla de datos experimentales Corrida 5

Tiempo t (minutos)	Tiempo t (horas)	Peso total Wtot (g)	Peso del Material húmedo Wh (Wtot - Wchar) (g)	Temperatura de salida °C		Temperatura de entrada °C	
				Tbs	Tbh	Tbs	Tbh
0	0	1595	247	52	24	65	27
5	0.083	1576	228	62	26	69	28
10	0.166	1556	208	63	26	75	* 30
15	0.250	1534	186	63	26	75	30
20	0.333	1516	168	64	26	75	30
25	0.416	1502	154	65	26	75	30
30	0.500	1491	143	65	27	75	29
35	0.583	1482	134	66	27	75	30
40	0.666	1476	128	66	27	75	30
45	0.750	1472	124	66	27	76	28
50	0.833	1469	121	66	27	76	28
55	0.916	1468	120	66	27		
60	1.000	1468	120	66	27		
65	1.083	1468	120	66	27		

Tabla 2.37 Tabla de resultados Corrida 5

Peso del Material húmedo Wh  (kg)	Humedad X (Wh - Wss /Ws s)  (kg H <sub>2</sub> O/ kg S S)	Humedad Promedio X <sub>prom</sub> (X <sub>1</sub> + X <sub>2</sub> ) / 2  (kg H <sub>2</sub> O/ kg S S)	Velocidad de secado R  (kg H <sub>2</sub> O/ h m <sup>2</sup> )
0.247	1.058	0.979	1.57
0.228	0.900	0.816	1.66
0.208	0.733	0.641	1.82
0.186	0.550	0.475	1.49
0.168	0.400	0.341	1.16
0.154	0.283	0.237	0.91
0.143	0.191	0.153	0.74
0.134	0.116	0.091	0.49
0.128	0.066	0.049	0.32
0.124	0.033	0.020	0.24
0.121	0.008	0.008	0.07
0.120	0		
0.120			
0.120			

### Serie 3.

Tabla 2.38 Condiciones a las que se operó en la serie 3

Velocidad de aire = 2.8 m/seg	Area del material expuesta al secado (A) = 0.1444 m <sup>2</sup>	Corrida	Presión del vapor
		1	138 kPa
		2	207 kPa
		3	276 kPa
		4	345 kPa
5	414 kPa		

Tabla 2.39 Condiciones de operación y datos de la corrida 1.

Condiciones de Operación		Peso de Charolas con columpio Wchar (g)	Peso inicial del material húmedo Wh (g)	Peso del material al final del secado Ws (g)
Velocidad del aire (m/seg)	Presión del vapor (kPa)			
2.8	138	1348.0	282.0	126.5

Tabla 2.40 Tabla de datos experimentales Corrida 1

Tiempo t (minutos)	Tiempo t (horas)	Peso total Wtot (g)	Peso del Material húmedo Wh (Wtot - Wchar) (g)	Temperatura de salida °C		Temperatura de entrada °C	
				Tbs	Tbh	Tbs	Tbh
0	0	1630	282	40	22		
5	0.083	1618	270	52	24	54	28
10	0.166	1599.5	251	52	24	56	* 30
15	0.250	1582	234	52	24	56	29
20	0.333	1567	219	53	25	56	30
25	0.416	1557	209	53	25	56	30
30	0.500	1543	195	53	25	57	30
35	0.583	1531	183	53	25		
40	0.666	1518	170	53	25		
45	0.750	1510	162	54	25		
50	0.833	1501	153	54	25		
55	0.916	1495	147	54	25		
60	1.000	1488	140	54	25		
65	1.083	1483	135	54	25		
70	1.166	1480	132	54	25		
75	1.250	1476.5	128.5	53	25		
80	1.333	1475	127	53	25		
85	1.416	1474.8	126.8	53	25		
90	1.500	1474.5	126.5	53	25		
95	1.583	1471.5	126.5	53	25		

Tabla 2.41 Tabla de resultados Corrida 1

Peso del Material húmedo W <sub>h</sub>  (kg)	Humedad X (W <sub>h</sub> - W <sub>ss</sub> / W <sub>s.s</sub> )  (kg H <sub>2</sub> O/ kg S S)	Humedad Promedio X <sub>prom</sub> (X <sub>1</sub> + X <sub>2</sub> ) / 2  (kg H <sub>2</sub> O/ kg S S)	Velocidad de secado R  ( kg H <sub>2</sub> O/ h m <sup>2</sup> )
0.282	1.22	1.175	0.94
0.270	1.13	1.055	1.57
0.251	0.98	0.915	1.35
0.234	0.85	0.79	1.25
0.219	0.73	0.69	0.834
0.209	0.65	0.595	1.15
0.195	0.54	0.49	1.04
0.183	0.44	0.39	1.04
0.170	0.34	0.31	0.62
0.162	0.28	0.245	0.73
0.153	0.21	0.185	0.52
0.147	0.16	0.13	0.62
0.140	0.10	0.08	0.41
0.135	0.06	0.05	0.20
0.132	0.04	0.025	0.31
0.1285	0.01	0.007	0.06
0.127	0.004	0.003	0.02
0.1268	0.002	0.001	0.02
0.1265	0		
0.1265			

Tabla 2.42 Condiciones de operación y datos de la corrida 2

Condiciones de Operación		Peso de charolas con columpio Wchar (g)	Peso inicial del material húmedo Wh (g)	Peso de material al final del secado Ws s (g)
Velocidad del aire (m/seg)	Presión del vapor (kPa)			
2.8	207	1348.0	292.5	124.0

Tabla 2.43 Tabla de datos experimentales Corrida 2

Tiempo t (minutos)	Tiempo t (horas)	Peso total Wtot (g)	Peso del Material húmedo Wh (Wtot - Wchar) (g)	Temperatura de salida °C		Temperatura de entrada °C	
				Tbs	Tbh	Tbs	Tbh
0	0	1640.5	292.5	44	22		
5	0.083	1625.5	277.5	55	24	52	29
10	0.166	1607.5	259.5	56	25	58	* 31
15	0.250	1585.5	237.5	57	25	58	32
20	0.333	1558.5	210.5	57	25	58	30
25	0.416	1540.5	192.5	58	26	58	32
30	0.500	1523.5	175.5	58	26	58	32
35	0.583	1510.5	162.5	58	26	58	32
40	0.666	1505.5	157.5	58	26	58	32
45	0.750	1495.5	147.5	58	26	58	32
50	0.833	1487.5	139.5	58	26		
55	0.916	1480.5	132.5	59	26		
60	1.000	1477.5	129.5	59	26		
65	1.083	1472	124	59	26		
70	1.166	1472	124	58	26		
75	1.250	1472	124	58	26		

Tabla 2.44 Tabla de resultados Corrida 2

Peso del Material húmedo W <sub>h</sub>  (kg)	Humedad X (W <sub>h</sub> - W <sub>ss</sub> / W <sub>s s</sub> )  (kg H <sub>2</sub> O/ kg S S)	Humedad Promedio X <sub>prom</sub> (X <sub>1</sub> + X <sub>2</sub> ) / 2  (kg H <sub>2</sub> O/ kg S.S)	Velocidad de secado R  ( kg H <sub>2</sub> O/ h m <sup>2</sup> )
0.2925	1.36	1.30	1.23
0.2775	1.24	1.17	1.44
0.2595	1.10	1.00	2.05
0.2375	0.90	0.80	2.05
0.2105	0.70	0.62	1.54
0.1925	0.55	0.48	1.44
0.1755	0.41	0.36	1.02
0.1625	0.31	0.29	0.41
0.1575	0.27	0.23	0.82
0.1475	0.19	0.15	0.72
0.1395	0.12	0.09	0.61
0.1325	0.06	0.05	0.20
0.1295	0.04	0.02	0.41
0.124	0		
0.124			
0.124			

Tabla 2.45 condiciones de operación y datos de la corrida 3

Condiciones de Operación		Peso de charolas con columpio Wchar  (g)	Peso inicial del material húmedo Wh  (g)	Peso del material al final del secado Ws s  (g)
Velocidad del aire (m/seg)	Presión del vapor (kPa)			
2.8	276	1348.0	267.5	121.5

Tabla 2.46 Tabla de datos experimentales. Corrida 3

Tiempo t (minutos)	Tiempo t (horas)	Peso total Wtot (g)	Peso del Material húmedo Wh (Wtot - Wchar) (g)	Temperatura de salida °C		Temperatura de entrada °C	
				Tbs	Tbh	Tbs	Tbh
0	0	1615.5	267.5	49	22		
5	0.083	1600.5	252.5	57	25	59	32
10	0.166	1580.5	232.5	58	25	60	* 32
15	0.250	1559.5	211.5	57	26	60	33
20	0.333	1544.5	196.5	58	26	60	32
25	0.416	1527.5	179.5	59	26	60	32
30	0.500	1508.5	160.5	59	26	60	32
35	0.583	1500.5	152.5	59	26	60	32
40	0.666	1491.5	143.5	60	26	60	32
45	0.750	1484.5	136.5	60	26		
50	0.833	1477.5	129.5	60	26		
55	0.916	1472.5	124.5	60	26		
60	1.000	1469.5	121.5	60	26		
65	1.083	1469.5	121.5	60	26		
70	1.166	1469.5	121.5	60	26		
75	1.250	1469.5	121.5	61	26		
80	1.333	1469.5	121.5	61	26		

Tabla 2.47 Tabla de resultados Corrida 3

Peso del Material húmedo Wh  (kg)	Humedad X (Wh - Wss /Ws s)  (Kg H <sub>2</sub> O/Kg S S)	Humedad Promedio X <sub>prom</sub> (X <sub>1</sub> +X <sub>2</sub> ) / 2  (kg H <sub>2</sub> O/ kg S.S)	Velocidad de secado R  (kg H <sub>2</sub> O/ h m <sup>2</sup> )
0.2675	1.20	1.135	1.31
0.2525	1.07	0.990	1.61
0.2325	0.91	0.825	1.71
0.2115	0.74	0.675	1.30
0.1965	0.61	0.540	1.41
0.1795	0.47	0.395	1.51
0.1605	0.32	0.285	0.70
0.1525	0.25	0.215	0.70
0.1435	0.18	0.150	0.60
0.1365	0.12	0.090	0.60
0.1295	0.06	0.040	0.40
0.1245	0.02	0.010	0.20
0.1215	0	0	
0.1215			

Tabla 2.48 Condiciones de operación y datos de la corrida 4

Condiciones de Operación		Peso de charolas con columpio Wchar  (g)	Peso inicial del materia húmedo Wh  (g)	Peso del material al final del secado Ws s  (g)
Velocidad del aire (m/seg)	Presión del vapor (kPa)			
2.8	345	1 348.0	235.0	121.0

Tabla 2.49 Tabla de datos experimentales Corrida 4

Tiempo t (minutos)	Tiempo t (horas)	Peso total Wtot (g)	Peso del Material húmedo Wh (Wtot - Wchar) (g)	Temperatura de salida °C		Temperatura de entrada °C	
				Tbs	Tbh	Tbs	Tbh
0	0	1583.5	235.5	50	22	62	26
5	0.083	1568.5	220.5	58	25	65 *	30
10	0.166	1551.5	203.5	59	26	65	30
15	0.250	1533.5	185.5	60	26	65	30
20	0.333	1519.5	171.5	60	26	65	29
25	0.416	1507.5	158.5	61	26	65	30
30	0.500	1498.5	150.5	61	26	65	30
35	0.583	1488.5	140.5	62	26		
40	0.666	1482.5	134.5	62	26		
45	0.750	1477.5	129.5	62	26		
50	0.833	1473.5	125.5	62	26		
55	0.916	1471.5	123.5	62	26		
60	1.000	1469.5	121.5	63	26		
65	1.083	1469	121	63	26		
70	1.166	1469	121	63	26		
75	1.250	1469	121	63	26		

Tabla 2.50 Tabla de resultados Corrida 4

Peso del Material húmedo Wh  (kg)	Humedad X (Wh - Wss / Ws s)  (kg H <sub>2</sub> O/ kg S.S)	Humedad Promedio $X_{prom}$ (X <sub>1</sub> + X <sub>2</sub> ) / 2  (kg H <sub>2</sub> O/ kg S.S)	Velocidad de secado R  (kg H <sub>2</sub> O/ h m <sup>2</sup> )
0.2355	0.946	0.884	1.24
0.2205	0.822	0.720	2.05
0.2035	0.618	0.575	0.85
0.1855	0.533	0.475	1.16
0.1715	0.417	0.367	0.99
0.1585	0.318	0.280	0.75
0.1505	0.243	0.202	0.82
0.1405	0.161	0.136	0.50
0.1345	0.111	0.090	0.41
0.1295	0.070	0.053	0.33
0.1255	0.037	0.028	0.17
0.1235	0.020	0.012	0.15
0.1215	0.004	0.002	0.04
0.121	0		
0.121			
0.121			

Tabla 2.51. Condiciones de operación y datos de la corrida 5.

Condiciones de Operación		Peso de charolas con columpio Wchar (g)	Peso inicial del material húmedo Wh (g)	Peso del material al final del secado Ws.s (g)
Velocidad del aire (m/seg)	Presión del vapor (kPa)			
2.8	414	1348.0	239.5	121.0

Tabla 2.52. Tabla de datos experimentales. Corrida 5

Tiempo t (minutos)	Tiempo t (horas)	Peso total Wtot (g)	Peso del Material húmedo Wh (Wtot - Wchar) (g)	Temperatura de salida °C		Temperatura de entrada °C	
				Tbs	Tbh	Tbs	Tbh
0	0	1587.5	239.5	55	24	63	26
5	0.083	1565.5	217.5	63	27	68	* 29
10	0.166	1547.5	199.5	63	27	68	29
15	0.250	1530.5	182.5	63	27	68	29
20	0.333	1515.5	167.5	63	27	68	29
25	0.416	1503.5	155.5	64	27	68	29
30	0.500	1494.5	146.5	65	27	68	29
35	0.583	1486.5	138.5	65	27		
40	0.666	1479.5	131.5	65	27		
45	0.750	1475.5	127.5	65	27		
50	0.833	1472.5	124.5	65	27		
55	0.916	1470.5	122.5	66	27		
60	1.000	1469	121	66	27		
65	1.083	1469	121	66	27		
70	1.166	1469	121	66	27		

Tabla 2.53 Tabla de resultados Corrida 5

Peso del Material húmedo Wh  (kg)	Humedad X (Wh - Wss /Ws s)  (kg H <sub>2</sub> O/kg S.S)	Humedad Promedio $X_{prom}$ (X <sub>1</sub> + X <sub>2</sub> ) / 2  (kg H <sub>2</sub> O/ kg S S)	Velocidad de secado R  (kg H <sub>2</sub> O/ h m <sup>2</sup> )
0.2395	0.979	0.888	1.83
0.2175	0.797	0.722	1.49
0.1995	0.648	0.578	1.40
0.1825	0.508	0.446	1.24
0.1675	0.384	0.334	0.99
0.1555	0.285	0.247	0.75
0.1465	0.210	0.177	0.66
0.1385	0.144	0.115	0.58
0.1315	0.086	0.069	0.33
0.1275	0.053	0.040	0.25
0.1245	0.028	0.020	0.15
0.1225	0.012	0.006	0.12
0.121	0		
0.121			
0.121			

## APENDICE C

Las curvas obtenidas en este trabajo presentan la forma típica, para ello se graficaron los resultados de  $R$  vs  $t$  y  $R$  vs  $X_{prom}$ . Con esto se obtiene una secuencia de puntos que hay que agrupar para dejar de manera definida las etapas del secado. Para presentar la manera en que estas se ajustaron se presenta un ejemplo con la corrida 1 de la serie 1 y la tabla que se utilizó para este caso es la 2.9, presentada en el capítulo 2.

Tabla 2.9 Resultados de la corrida 1, serie 1.

Tiempo $t$ (minutos)	Velocidad de Secado $R$ ( $\text{kg H}_2\text{O} / \text{h m}^2$ )	Humedad promedio $X_{prom}$ ( $\text{kg H}_2\text{O} / \text{kg s.s}$ )
0	0,49	1,025
5	0,99	0,95
10	1,24	0,837
15	1,37	0,706
20	1,28	0,572
25	1,16	0,449
30	0,82	0,349
35	0,86	0,264
40	0,58	0,191
45	0,49	0,137
50	0,32	0,095
55	0,24	0,066
60	0,2	0,043
65	0,16	0,024
70	0,07	0,012
75	0,07	0,004
80		

Para ajustar las curvas de secado a la forma típica se marcan los puntos como en la figura A.1. De manera visual se agrupan los puntos marcados tratando de dar forma a la curva como lo muestra la figura A.2. El ajuste se hizo mediante regresiones lineales<sup>(19)</sup>, tratando de abarcar los puntos para que dentro de un grupo nos indicara el mejor coeficiente de correlación como se observa en la figura A.3. En la figura A.4 se muestran las curvas de secado experimentales  $R$  vs  $t$  y  $R$  vs  $X_{prom}$ , que resultan ser semejantes a las de la bibliografía<sup>(9),(10),(11),(12),(13),(14),(15)</sup>.

Figura C.1 Secuencia de puntos experimentales.

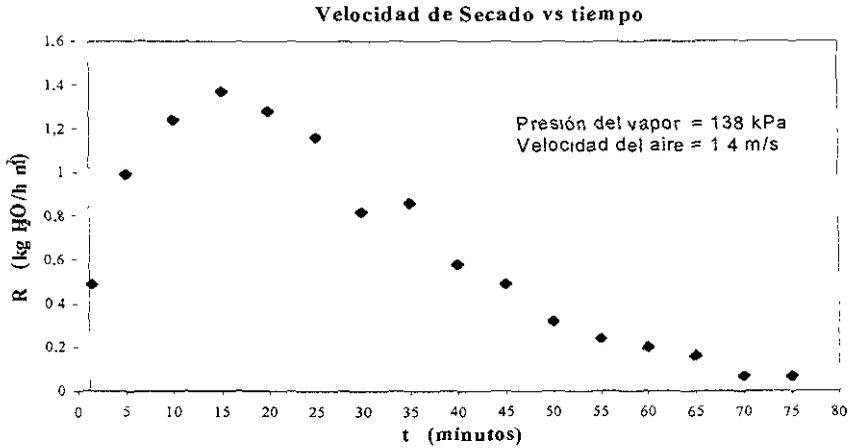


Fig. 2.9 Velocidad de secado en función del tiempo Corrida 1

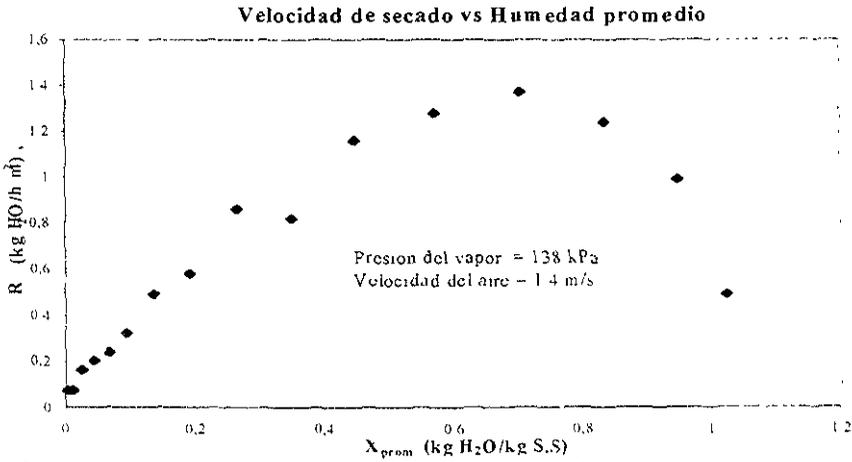


Fig. 2.10 Velocidad de secado en función de la humedad promedio, corrida 1

**Figura C.2 Agrupación de puntos para identificar los periodos de secado.**

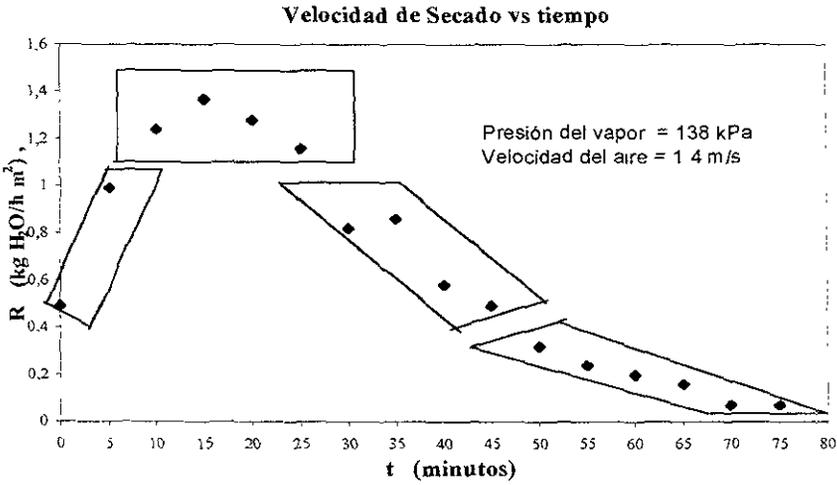


Fig. 2,9 Velocidad de secado en función del tiempo, corrida 1

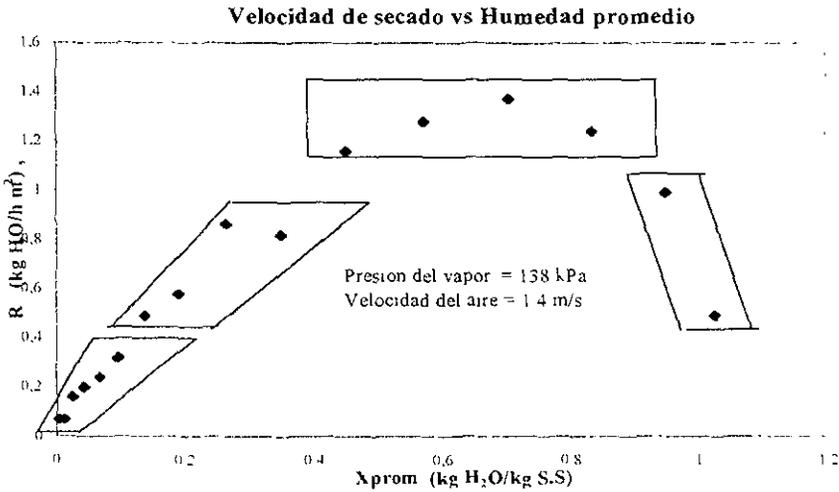


Fig. 2.10 Velocidad de secado en función de la humedad promedio - corrida 1

**Figura C.3 Ajuste de la gráfica o periodos de secado mediante regresiones lineales.**

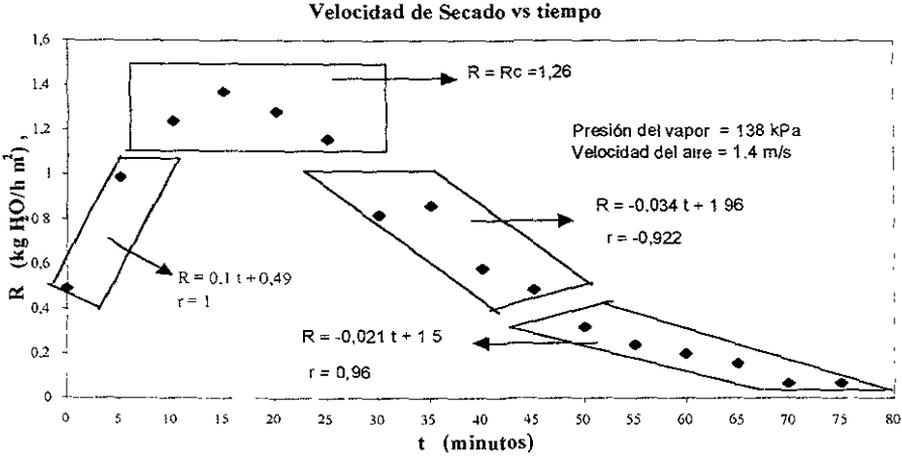


Fig. 2.9 Velocidad de secado en función del tiempo Corrida 1

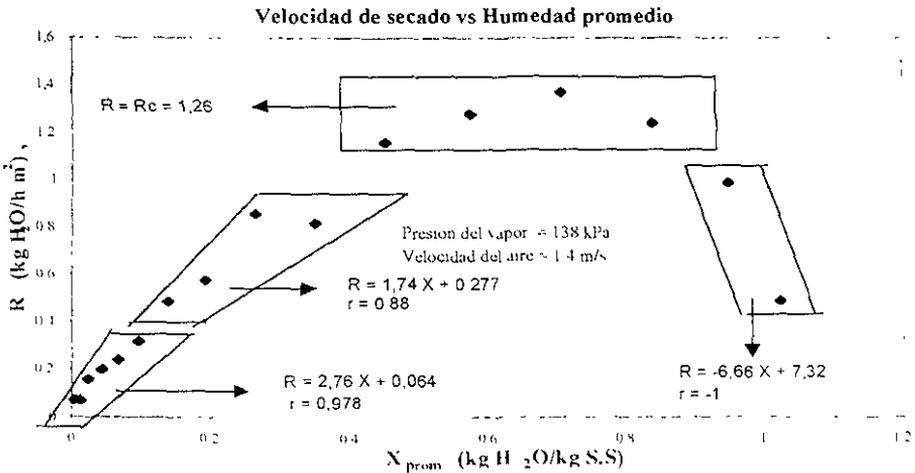


Fig. 2.10 Velocidad de secado en función de la humedad promedio, Corrida 1

Figura C.4 Presentación final de las curvas típicas de secado.

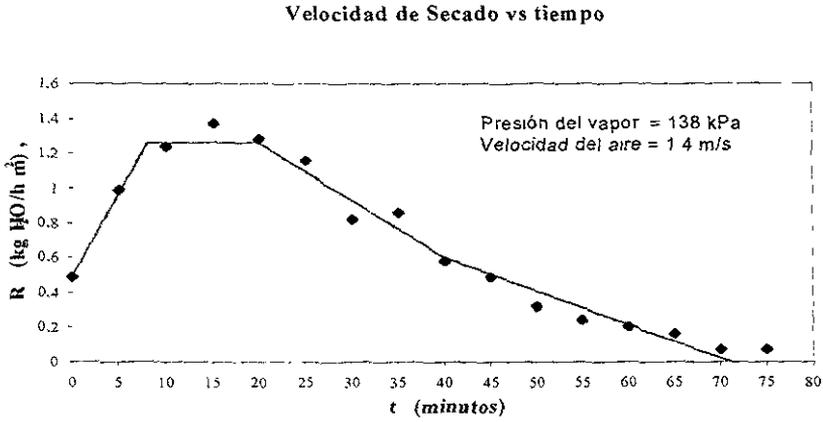


Fig. 2.9 Velocidad de secado en función del tiempo Corrida 1

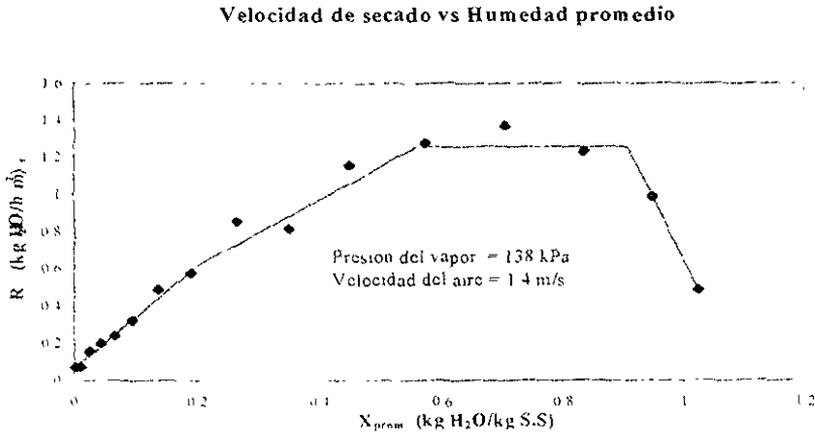


Fig. 2.10 Velocidad de secado en función de la humedad promedio, corrida 1

## APENDICE D

### ecuación del gas ideal.

este apéndice sólo se muestra una memoria de cálculo para obtener la densidad del aire izando la ecuación (1.59).

$$\rho = \frac{(P)(P.M)}{(R)(T)}$$

donde:  $\rho$  = densidad ( kg/m<sup>3</sup> )  
P = presión atmosférica del lugar de trabajo = 585 mmHg = 0.77 atm.  
P.M = peso molecular del aire = 29 g/mol  
R = constante del gas ideal = 0.082 L atm/mol °K  
T = temperatura del aire de secado (°K)

Para T = 69 °C ( Dato tomado de la tabla 3.2 , de la temperatura promedio (T<sub>prom</sub>) para la serie 1 ).  
T = 69 °C = 342.15 °K

substituyendo valores

$$\rho = \frac{(0.77 \text{ atm}) (29 \text{ g/mol})}{(0.082 \text{ L atm/mol } ^\circ\text{K})(342.15 \text{ } ^\circ\text{K})} = 0.796 \text{ g/L} = 0.796 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{69^\circ\text{C}} = 0.796 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{61^\circ\text{C}} = 0.815 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{59^\circ\text{C}} = 0.82 \text{ kg/m}^3$$

De ésta manera es como son obtenidos los valores de densidad de la tabla 2.4 y 3.2 . Los valores de densidad son utilizados para estimar los valores de velocidad del aire (v) y flujos máxicos (G)

## APENDICE E

**Memoria de cálculo para obtener velocidades de aire en el secador.**

para  $\Delta P = 4.0 \text{ mmH}_2\text{O}$

$$\text{mmH}_2\text{O} \cdot \frac{1 \text{ mH}_2\text{O}}{1000 \text{ mmH}_2\text{O}} \cdot \frac{1 \text{ atm}}{10 \text{ mH}_2\text{O}} \cdot \frac{1.033 \text{ kg/cm}^2}{1 \text{ atm}} \cdot \frac{10000 \text{ cm}^2}{1 \text{ m}^2} = 4.132 \text{ kg/m}^2$$

Utilizando la ecuación (2.7)

$$v_1 = \sqrt{\frac{2(\Delta P)(g_c)}{\rho((A_1/A_2)^2 - 1)}} \quad (2.7)$$

donde:  $v$  = velocidad del aire en el secador

$\Delta P$  = diferencia de presión

$g_c$  = constante gravitacional =  $9.8 \text{ kg}_m \text{ m/kg}_f \text{ s}^2$

$\rho$  = densidad

$A_1$  = área transversal del secador de la sección cuadrada

$A_2$  = área transversal del secador de la sección circular

(ver pag 27 y fig 2.2 y 2.4)

Sustituyendo valores

$$v = \sqrt{\frac{2(4.132 \text{ kg}_f/\text{m}^2)(9.8 \text{ kg}_m \text{ m/kg}_f \text{ s}^2)}{0.796 \text{ kg}/\text{m}^3 ((0.19\text{m}^2/0.051\text{m}^2)^2 - 1)}} = 2.81 \text{ m/s}$$

$$v = 2.81 \text{ m/s}$$

Velocidad que se mantuvo constante durante la serie 3 de pruebas de secado