



T
621.36
B 826



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

**“Estudio y Análisis de las Camaras Tradicio-
nales de Secado de Arroz en Cáscara”**

PROYECTO DE GRADO

**Previa a la Obtención del Título de:
INGENIERIA MECANICA**

Presentada por:

Patricia del Rocio Bravo Sarmiento

1990

A G R A D E C I M I E N T O

Al Dr. ALFREDO BARRIGA, Director del Proyecto de Grado, por su ayuda y aliento a seguir adelante en la culminación de este trabajo.

A los miembros del Centro de Investigaciones Experimentales en Tecnología Energética (CETE), por su aporte significativo en la realización de este proyecto.

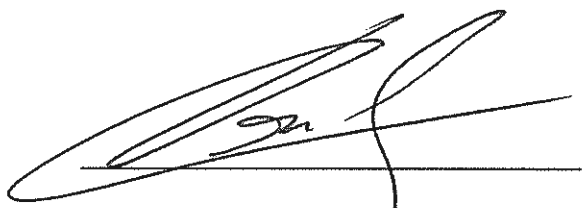
A los compañeros y amigos que con su ayuda y apoyo hicieron posible el cumplimiento de este proyecto de grado.

A la ESPOL por la formación brindada.


DEDICATORIA

- A MIS PADRES

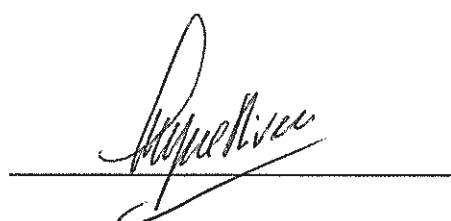
- A MIS HERMANAS



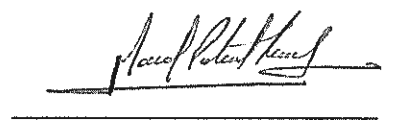
ING. NELSON CEVALLOS B.
DECANO DE LA FACULTAD DE
INGENIERIA MECANICA



Dr. ALFREDO BARRIGA
DIRECTOR DEL PROYECTO
DE GRADO



ING. JORGE DUQUE RIVERA
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



ING. MARIO PATIÑO A.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en este PROYECTO DE GRADO, me corresponden exclusivamente y, el patrimonio intelectual del mismo, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Tópico de Graduación de la ESPOL).

Patricia Bravo S.

PATRICIA BRAVO SARMIENTO



BIBLIOTECA

RESUMEN

Este trabajo se ha centrado en estudiar el comportamiento del grano de arroz durante el proceso de secado y la influencia que tienen los distintos parámetros como: temperatura del aire, velocidad del aire, altura de la camada de arroz y humedad del aire de secado.

Se efectuaron seis pruebas experimentales utilizando un secador por lotes de 20 cm x 18.6 cm de sección transversal, alturas de camada de arroz de 10, 15 y 20 cms y flujos de aire que fluctúan entre 0.6303 y 0.3124 metros cúbicos/min tratando de simular lo mejor posible un modelo grande.

Se tomaron datos de flujo de aire; pérdida de peso de la muestra; presión estática de la camada de arroz; temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo del ambiente; temperatura de entrada del aire de secado; temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo a la salida del aire; y temperaturas del aire en distintas alturas de la camada de arroz.

Utilizando éstos datos se construyeron las curvas de humedad vs. tiempo, velocidad de secado vs. humedad promedio, factor de utilización de calor vs. tiempo y altura de camada de arroz vs. humedad relativa del aire de secado que permiten

observar el comportamiento de éstos durante el proceso de secado.

Se desarrolló un modelo teórico asumiendo que el aire que pasa a través de la camada de grano forma canales que van desde el fondo a la superficie y se trató al arroz en cáscara como una pared plana cuyo ancho será del tamaño promedio de un arroz. Esto nos permitió encontrar los coeficientes de transferencia de calor y transferencia de masa, y la difusividad del agua dentro del grano de arroz.

I N D I C E G E N E R A L

	PAGS.
RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VIII
INDICE DE FIGURAS	XI
INDICE DE TABLAS	XIII
NOMENCLATURA	XIV
INTRODUCCION	16

CAPITULO I

EL ARROZ

1.1 GENERALIDADES	17
1.2 PROPIEDADES DEL GRANO DE ARROZ	19
1.3 LIMITES DE HUMEDAD DEL ARROZ	20
1.4 TIPOS DE HUMEDAD DEL ARROZ	22
1.5 IMPORTANCIA DEL SECADO DE ARROZ	23
1.6 COMPORTAMIENTO DEL GRANO DE ARROZ DURANTE EL SECADO	24
1.7 METODOS UTILIZADOS EN EL SECADO DE ARROZ	
1.7.1 Secado natural	26
1.7.2 Secado artificial	27

CAPITULO II

TEORIA DEL SECADO

2.1 DEFINICION DE SECADO	30
--------------------------------	----

	PAGS.
2.2 METODOS GENERALES DE SECADO	31
2.3 DEFINICIONES IMPORTANTES	32
2.4 PERIODOS DE SECADO	
2.4.1 Curvas de secado	36
2.4.2 Período de secado a velocidad constante ...	38
2.4.3 Período de secado a velocidad decreciente	40
2.4.3.1 Movimiento de la humedad dentro del sólido	41
2.5 EFECTO DE LAS VARIABLES DEL PROCESO	44
 CAPITULO III	
PRUEBAS EXPERIMENTALES	
3.1 DESCRIPCION DE LA PRUEBA	48
3.2 EQUIPO UTILIZADO	51
3.3 SELECCION DE LOS PARAMETROS DE SECADO	52
3.4 CURVAS EXPERIMENTALES	
3.4.1 Variación de la humedad y velocidad de secado	53
3.4.2 Factor de utilización del calor	55
3.4.3 Captación del agua en el tiempo	55
3.5 ANALISIS DE LAS CURVAS	57
 CAPITULO IV	
DESARROLLO TEORICO	
4.1 ANALISIS DEL SISTEMA	63



PAGS. BIBLIOTECA

4.2 PROCESOS INVOLUCRADOS EN EL SECADO DE ARROZ EN	
CASCARA	65
4.3 CALCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR	
Y MASA	67
4.4 DETERMINACION DEL MECANISMO QUE CONTROLA EL	
MOVIMIENTO DE LA HUMEDAD DENTRO DEL GRANO	72
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76
APENDICES	79
BIBLIOGRAFIA	136

I N D I C E D E F I G U R A S

N°.	PAGS.
1.1 PARTES CONSTITUYENTES DEL GRANO DE ARROZ	18
1.2 ESQUEMA DEL PROCESO DE SECADO DEL GRANO HUMEDO	25
1.3 SECADO POR LOTES	29
2.1 TIPOS DE HUMEDAD	35
2.2 CURVA DE TIEMPO DE SECADO	37
2.3 CURVA DE RAPIDEZ DE SECADO	37
2.4 GRAFICA UTILIZADA PARA DETERMINAR EL MOVIMIENTO POR DIFUSION O POR CAPILARIDAD	43
2.5 EFECTO DE LA ALTURA DEL LECHO	47
3.1 ESQUEMA DEL SECADOR	49
3.2 CARTA PSICROMETRICA	56
4.1 ESQUEMA DEL SISTEMA	64
4.2 ESQUEMA DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA EN EL PERIODO DE VELOCIDAD DE SECADO CONSTANTE ...	66
4.3 ESQUEMA DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA EN EL PERIODO DE VELOCIDAD DE SECADO DECRECIENTE	68
4.4 CAMBIO DE HUMEDAD NO REALIZADO vs. TIEMPO	74

APENDICE

B.1	GRAFICOS DE LOS RESULTADOS DE LA PRUEBA #1 112
B.2	GRAFICOS DE LOS RESULTADOS DE LA PRUEBA #2 116
B.3	GRAFICOS DE LOS RESULTADOS DE LA PRUEBA #3 120
B.4	GRAFICOS DE LOS RESULTADOS DE LA PRUEBA #4 124
B.5	GRAFICOS DE LOS RESULTADOS DE LA PRUEBA #5 128
B.6	GRAFICOS DE LOS RESULTADOS DE LA PRUEBA #6 132

INDICE DE TABLAS

Nº.	PAGS.
-----	-------

APENDICE

A.1	DATOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES	81
A.2	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES	93

N O M E N C L A T U R A

A:	Area
b.h:	Base húmeda
b.s:	Base seca
Cp:	Calor específico del aire
D _L :	Difusividad del agua dentro del arroz
D _v :	Difusividad del agua en el aire
D _h :	Diámetro hidráulico
g:	Gramos
G:	Flujo de aire
h:	Horas
h:	Coeficiente de transferencia de calor
h:	Altura de la cama de arroz
HR:	Humedad relativa
HUF:	Factor de utilización de calor
k:	Conductividad térmica
k _a :	Coeficiente de transferencia de masa
Kg:	Kilogramos
Kga:	Kilogramos de agua
Kgs:	Kilogramos de sólido seco
m:	Metros
mm:	Milímetro
min:	Minuto
N:	Flujo de masa
P _s :	Peso seco

P_x :	Peso
Pr :	Número de Prandl
q :	Flujo de calor
R :	Constante universal de los gases
R_c :	Velocidad de secado
Re :	Número de Reynolds
seg :	Segundos
Sc :	Número de Schmidt
T :	Temperatura
t :	Tiempo
v :	Velocidad
V :	Volumen
x :	Mitad del espesor de la pared de arroz
X :	Humedad
X_c :	Humedad crítica
X_i :	Humedad inicial
X^* :	Humedad de equilibrio
ϵ :	Porosidad
τ :	Intervalo de tiempo
$^\circ$:	Grados de temperatura
ν :	Viscosidad cinemática
π :	3.1416
ρ :	Densidad

I N T R O D U C C I O N

Nuestro país, por ser productor de arroz, siempre ha tenido la necesidad de utilizar métodos para el secado del arroz en cáscara, esto es necesario para la conservación ulterior del grano, sea esto para descascarillarlos y blanquearlos o para destinarlos a la siembra. El secado tiene como objetivo situar a los granos en estado de equilibrio con el medio ambiente; desde hace muchos años atrás el único sistema que se utilizaba para secar el arroz en cáscara era el tradicional de "secado al sol" , pero en la actualidad se utilizan mucho los métodos artificiales de secado.

El método de secado artificial más usado en nuestro medio es el por lotes, o sea aquel en el que el sistema de secado es de cama fija. Por ese motivo este estudio y análisis se va a centrar en este tipo de cámaras de secado.

El objetivo de este estudio es el de llegar a un conocimiento profundo del proceso del secado de arroz, mediante la cuantificación de los períodos de secado, el calculo de la difusividad del agua durante el secado, la determinación de los coeficientes de transferencia de calor y masa y el seguimiento de la capacidad de captación de agua de el aire.

C A P I T U L O I

EL ARROZ

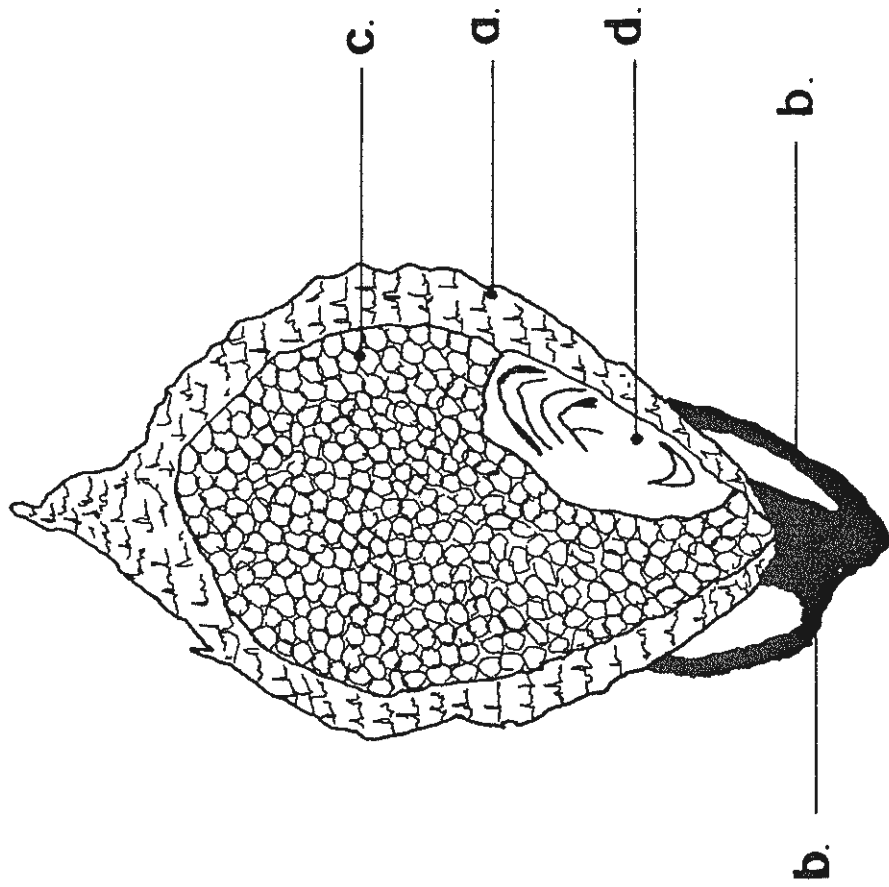
1.1 GENERALIDADES

El grano de arroz recién cosechado está cubierto por una capa no comestible para el ser humano, denominada cáscara la cual es dura e impermiable, protege al grano contra la humedad, los insectos y los organismos que causan pudrición. Es también una barrera contra el calor excesivo, los roedores, pájaros y otros animales.

Las partes que constituyen el grano de arroz entero (fig. 1.1) son: cascarilla, pericardio, germen y mesocarpio.

Los granos de las distintas plantas, no están compuestos de material neutro ni muerto, por el contrario, estos están compuestos por un material que tiene vida, cuya característica principal es su metabolismo.

El metabolismo es el conjunto de procesos físicos y químicos dentro de un organismo, mediante los cuales se produce, mantiene y destruye el protoplasma, y del cual se obtiene la energía requerida para el funcionamiento



- a.- Cáscara a corteza.
- b.- Las dos glumas exteriores.
- c.- Capa delgada formada por el pericarpio.
- d.- Germen o embrión.

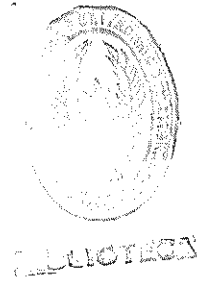


Fig. 1.1 PARTES CONSTITUYENTES DEL GRANO DE ARROZ.(2)

de dicho organismo. Eso significa que al igual que sucede con los animales en los granos existe respiración. Mediante la respiración, se absorbe oxígeno de la atmósfera y se descomponen los hidratos de carbono contenidos en el grano, originando calor. Si la intensidad de respiración es muy grande los granos absorberán humedad y la temperatura aumentará. Por lo tanto se deben establecer condiciones en las cuales los granos puedan respirar lo menos posible, entonces para almacenarlo el grano deberá contener una humedad que no debe exceder de ciertos límites.

1.2 PROPIEDADES DEL GRANO DE ARROZ

Existen 3 propiedades de los granos y de las semillas que determinan en gran parte su comportamiento:

a) Conductividad térmica.- Es muy baja y puede compararse con la del suelo o maderas blandas. El calor se transmite con mucha lentitud. Cualquier elevación anormal de temperatura puede ocasionar serios daños a los granos.

b) Capacidad de absorción del agua.- El agua retenida en los granos se encuentra como:

- agua libre: retenida en los espacios intergranulares, la cual posee propiedades específicas.
- agua absorbida: asociada con materia absorbente, existe una interrelación entre las moléculas de agua y la sustancia.
- agua combinada: es la unida químicamente.

Entre más pequeño sea el contenido de agua de los granos, ésta se encuentra más fuertemente retenida por las fuerzas intermoleculares (Ref.13).

c) Naturaleza porosa.- Los granos tienen una estructura porosa y por eso existe el fenómeno de difusión del aire a través de la masa y ésta es muy lenta y por sí sola no es capaz de eliminar el exceso de humedad o temperatura de la masa del grano.

1.3 LIMITES DE HUMEDAD DEL ARROZ

Al madurar la planta la humedad del grano disminuye gradualmente; cuando está entre 20 y 25 por ciento el grano ha alcanzado su maduración y deja de recibir sustento de la planta. A este nivel de humedad, los granos todavía están firmemente unidos a la planta y es el punto más adecuado para lograr un rendimiento y calidad máximos en la cosecha con mínimas pérdidas.

Hasta entonces los granos no se han desprendido y los daños por viento, clima adverso, humedad alta, ataque de animales, etc., han sido mínimos.

No obstante el arroz en cáscara no puede almacenarse con más de 14% de humedad. Si se almacena con la humedad inicial de cosecha(22%) comienza a fermentarse, se calienta a niveles indeseados, se torna amarillo, se raja y adquiere mal olor; además de esto se estimula el ataque de bacterias e insectos y más tarde, el rendimiento y la calidad del arroz beneficiado bajan mucho.

Si se cosecha con el nivel ideal de humedad y luego el grano en cáscara se seca adecuadamente, las pérdidas se reducen y se mantiene la calidad. Dejando que el grano se seque en la planta hasta que la humedad permita el almacenamiento seguro(14%) hay las pérdidas por desprendimiento del grano, además de que la acción del sol y la lluvia hace que los granos se vuelvan amarillos y se quiebren en la cáscara con la consecuente pérdida de cantidad y calidad.

Para aprovechar lo mejor de ambos procesos se recomienda cosechar el grano con 20 o 25 % de humedad y luego secarlo gradualmente hasta el nivel seguro de almacenamiento y de procesamiento que es de 14%. Es

importante gradualmente porque los granos se resquebrajan al perder bruscamente su humedad.



1.4 TIPOS DE HUMEDAD DEL ARROZ

BIBLIOTECA

El arroz está compuesto de material higroscópico. Higroscópico es aquel que tiene la tendencia de adquirir humedad por absorción. Esto sucede, cuando la presión del vapor de agua que contiene la atmósfera que lo rodea, es mayor que la presión del vapor de agua que ejerce la humedad que contiene el grano durante el proceso de respiración.

Existe dos tipos de humedades en el arroz:

La externa que es la que existe en la superficie del grano y que puede eliminarse fácilmente y la interna que es la que existe en el interior del grano y su movimiento hacia la superficie del grano hasta su evaporación, suele ser un proceso más delicado y lento.

Cuando el grano tiene un alto contenido de humedad, el movimiento de la humedad interna hacia la superficie, es bastante rápido, pero a medida que se va secando el grano, dicho movimiento va siendo cada vez más lento.

1.5 IMPORTANCIA DEL SECADO DE ARROZ

No sólo el arroz, sino gran parte de los productos del campo contienen un exceso de humedad en el momento de la cosecha. El secado del grano disminuye los riesgos que resultan de la cosecha y del almacenamiento de los productos.

La extracción de humedad de un producto se conoce como secado o deshidratación. Se entiende por deshidratación la extracción de agua hasta contenidos muy bajos de humedad. Por secado, la extracción de agua hasta un contenido de humedad que esté en equilibrio con la humedad del aire.

El secado de los granos facilita la planificación de las operaciones en una granja, pues elimina las pérdidas entre la madurez del producto en el campo y su almacenamiento.

El secado de granos permite al agricultor obtener mayores ganancias. Se tiene entre otras las siguientes razones:

1. Permite que la cosecha se realice más rápidamente reduciendo la pérdida de los productos en el campo. Permite además, que el suelo se trabaje más durante

- un periodo de tiempo. La cosecha temprana (a un alto contenido de humedad) minimiza los daños en los campos y las pérdidas por rompimiento de los granos.
2. Permite planificar la época de la cosecha para hacer una mejor utilización de la mano de obra disponible.
 3. Los productos se pueden almacenar, durante un periodo largo de tiempo sin deterioros.
 4. El agricultor puede recibir un precio más alto por su producto.
 5. La viabilidad de las semillas se conserva durante periodos largos.
 6. Permite al agricultor vender un producto de mejor calidad que tiene un mejor valor.

1.6 COMPORTAMIENTO DEL GRANO DE ARROZ DURANTE EL SECADO

Durante el proceso de secado, el aire caliente y seco calienta el grano y provoca la evaporación y la salida del agua del grano, encontrándose el aire de salida frío y húmedo. En el grano de arroz se diferencian tres zonas, como se muestra en la figura 1.2: la interna húmeda, la de difusión del agua y la de evaporación, que se encuentra en la superficie del grano.

El agua se mueve desde la parte interna a la externa del albúmen, produciéndose una contracción, aunque ésta es mayor en la parte externa que en la interna.

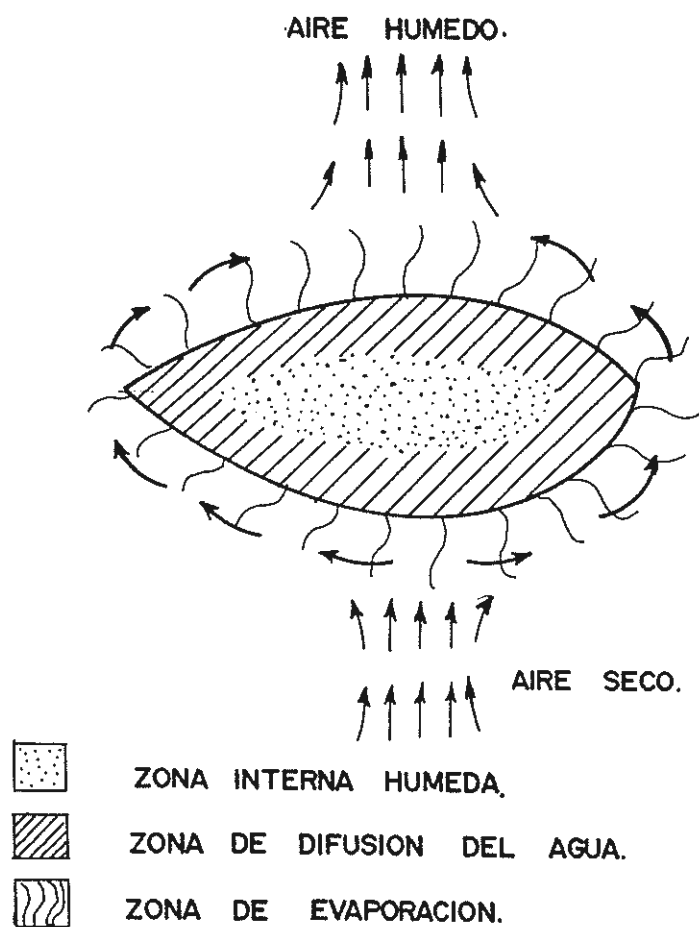


Fig. 1.2. ESQUEMA DEL PROCESO DE SECADO DEL GRANO HUMEDO.

El secado rápido del grano del arroz, ya sea bajo condiciones naturales o artificiales, crea dentro del grano ciertas tensiones que tienden a destruir su estructura. Eso se debe a la naturaleza sumamente dura del grano de arroz. La humedad no puede moverse desde la sección central del grano hacia el exterior con tanta rapidez como se desprende de la superficie.

Cuando la rapidez de transferencia alcanza cierto punto, aparecen pequeñas fracturas dentro del grano, tales fracturas ocurren perpendicularmente al eje longitudinal del grano (Ref.3).

1.7 METODOS UTILIZADOS PARA EL SECADO DE ARROZ

1.7.1 SECADO NATURAL

Desde hace muchos años atrás el único sistema que se utilizaba para secar el arroz en cáscara era el tradicional de "secado al sol" y todavía en la actualidad se lo usa mucho para presecar. Este sistema consiste en extender sobre el suelo el arroz en cáscara, en una capa relativamente fina (3-5 cm) expuesta a los rayos solares y a la acción del movimiento natural del aire ambiente, luego la capa se "labra" con el objeto de aumentar la superficie de secado y este paso se repite con



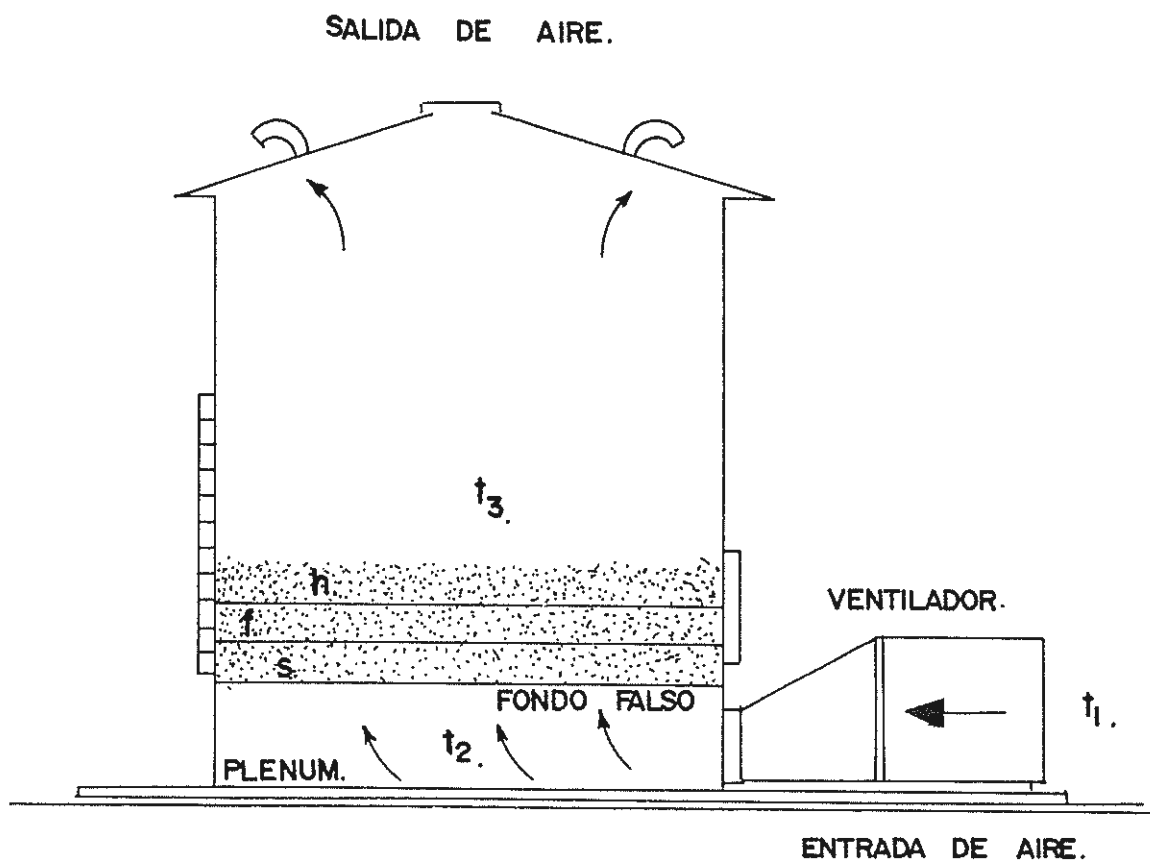
frecuencia con el fin de lograr una mayor uniformidad de secado. El tiempo de secado depende de las condiciones del arroz, como humedad, maduración, limpieza, etc. y del medio ambiente como intensidad solar, temperatura, humedad y velocidad del aire. Normalmente oscila desde algunas horas hasta dos días, cuando las condiciones ambientales son buenas y según el grado de humedad del arroz (Ref.4).

Los inconvenientes de este sistema son: necesidad de gran superficie de terreno por volumen de arroz secado, dependencia de las condiciones climáticas, excesivo tiempo y gran cantidad de mano de obra.

1.7.2 SECADO ARTIFICIAL

Debido a las desventajas del secado natural, en la actualidad se está utilizando el secado artificial mediante el empleo de instalaciones mecánicas que, en un principio sólo se usaban cuando las condiciones climáticas eran desfavorables para el secado al sol. Pero, actualmente, el secado mecánico se lo usa normalmente en cualquier día, con el objeto de utilizar menor mano de obra, y de aumentar el ritmo de producción.

Existen varios métodos artificiales de secado de arroz, siendo los más utilizados el por lotes (figura 1.3) y el continuo.



h: Capa húmeda.
 f: Frente de secado.
 s: Capa seca.

Fig.1.3. SECADO POR LOTES. (10)

C A P I T U L O I I

TEORIA DEL SECADO

2.1 DEFINICION DE SECADO

El secado constituye uno de los métodos que permite separar un líquido de un sólido.

Es difícil formular una definición de secado que la diferencie estrictamente de la evaporación. El término secado, en general, significa usualmente la eliminación de relativamente pequeñas cantidades de agua de un sólido o de un material casi sólido y el término evaporación se refiere a la eliminación de cantidades relativamente grandes de agua de un material. En el proceso secado la mayor atención se presta al producto sólido. En la mayor parte de los casos, el secado implica la eliminación de agua a temperaturas menores de su punto de ebullición, mientras que la evaporación significa la eliminación de agua como vapor en su punto de ebullición. En el secado el agua se elimina normalmente por circulación de aire u otros gases sobre el material a secar con objeto de que transporte el vapor de agua.

En otros términos el secado constituye una operación unitaria que consiste en secar una muestra húmeda por medio de una corriente gaseosa; en consecuencia, en cualquier proceso de secado se debe tener en cuenta los mecanismos de transmisión de calor y transporte de materia (Ref.6).

2.2 METODOS GENERALES DE SECADO

Los métodos y procesos de secado pueden ser clasificados de muchas diferentes maneras. Los procesos de secado pueden clasificarse en:

- Por lotes, 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.
- Continuo, donde tanto el material que se va a secar, como el gas pasan continuamente a través del secador.

Los procesos de secado también pueden ser categorizados de acuerdo a las condiciones físicas usadas para suministrar el calor y remover el vapor de agua:

- 1) En la primera categoría, el calor es suministrado por contacto directo con el aire calentado a presión

atmosférica, y el vapor de agua formado es removido por el aire.

- 2) En el secado al vacío, la evaporación del agua se produce más rápidamente a bajas presiones y el calor es suministrado indirectamente por contacto con una pared metálica o por radiación.
- 3) En el secado por congelamiento, el agua es sublimada desde el material congelado.

2.3 DEFINICIONES IMPORTANTES

Para entender mejor el proceso de secado, es necesario conocer ciertas definiciones:

$$= \frac{V_{H_2O}}{V_{SOLIDA} + V_{H_2O}}$$

HUMEDAD.— Se denomina así al peso del agua que acompaña a la unidad de peso de sólido seco, puede ser expresada sobre base húmeda o seca. Es más aconsejable expresarlo sobre base seca porque es constante durante el secado.

HUMEDAD DE EQUILIBRIO (X^*).— Es el límite al cual se puede llevar el contenido de humedad de una sustancia por contacto con aire de temperatura y humedad determinada.



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. El contenido de humedad de equilibrio se utiliza para determinar si un producto gana o pierde humedad a unas condiciones dadas de temperatura y humedad relativa.

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.

Se dice que un producto se encuentra en equilibrio con su ambiente, si la tasa de pérdida de humedad desde el producto a los alrededores, es igual a la tasa de ganancia de humedad del producto desde los alrededores.

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.

Se puede expresar por medio de curvas de equilibrio, siendo una de las más conocidas la de Herderson-Thompson (Ref.12) :

$$1-HR = \exp (-a_1 (T + a_2)X^{a_3})$$

Donde:

HR = humedad relativa, decimal

X* = humedad de equilibrio (base seca), %

T = temperatura del aire, °C

a₁, a₂, a₃ = constantes del producto

HUMEDAD LIBRE.— Se denomina humedad libre de un sólido, con respecto al aire en condiciones determinadas, a la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad de equilibrio con el aire en las condiciones dadas. Por consiguiente, es la humedad que puede perder el sólido después de un contacto suficientemente prolongado con aire en condiciones dadas y constantes, y depende tanto de la humedad del sólido como de la humedad relativa del aire. Sólo puede evaporarse la humedad libre.

HUMEDAD LIGADA.— Es el valor de la humedad de equilibrio del sólido en contacto con aire saturado; o bien la humedad mínima del sólido necesaria para que este deje de comportarse como higroscópico. En otras palabras 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.

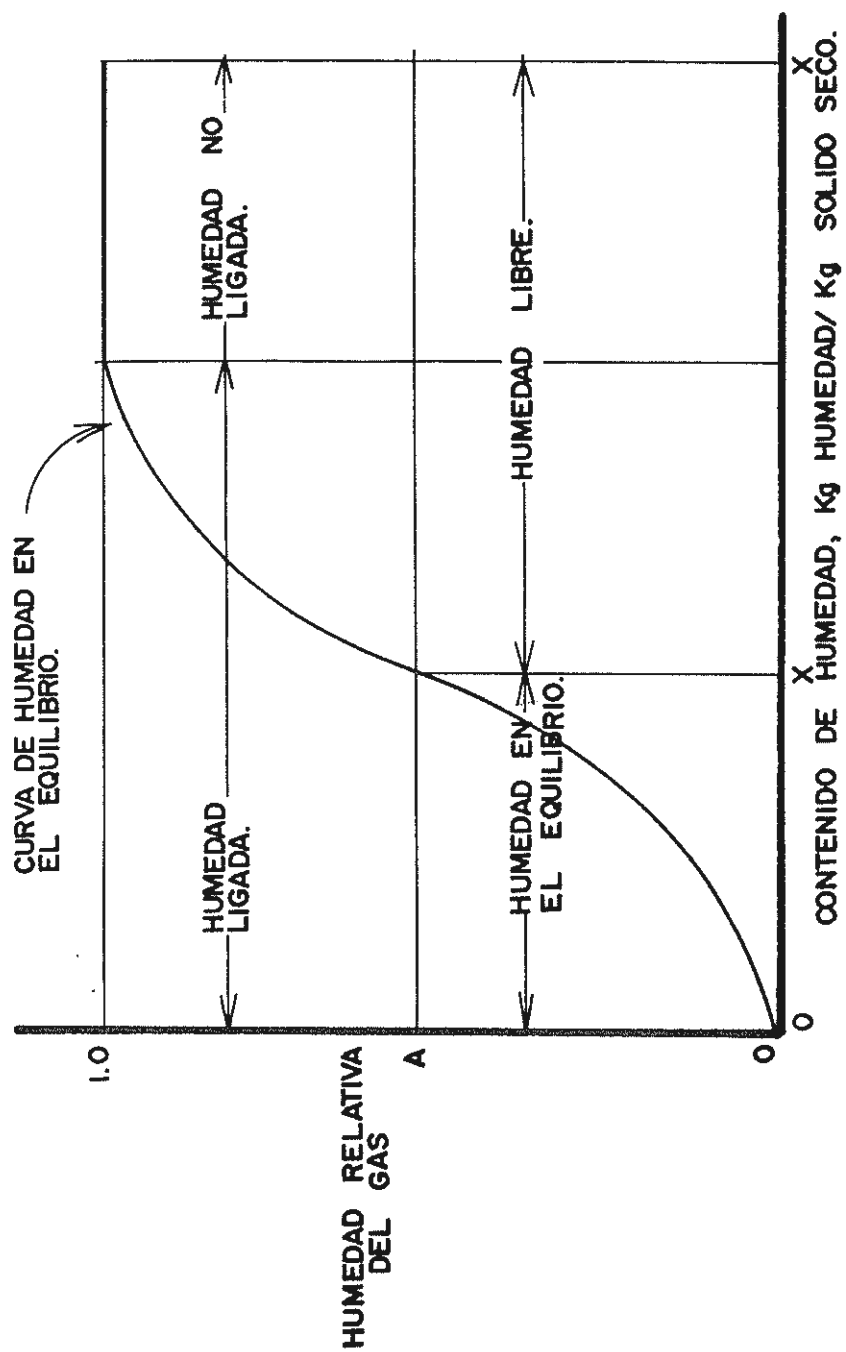


Fig. 2.1 TIPOS DE HUMEDAD. (14)

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 no ligada se comportará como húmedo. En otras palabras se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual a la del líquido puro a la misma temperatura.

Estos tipos de humedad se muestran en forma gráfica en la figura 2.1, para un sólido con un contenido de humedad X , expuesto a un gas de humedad relativa A .

2.4 PERIODOS DE SECADO

2.4.1 CURVAS DE SECADO

En las experiencias de secado, al representar la humedad del sólido frente al tiempo, operando en condiciones constantes de secado, se obtienen curvas del tipo indicado en la figura 2.2, en la que puede observarse que al principio la humedad del sólido disminuye linealmente con el tiempo de secado o lo que es lo mismo durante este período la velocidad de secado ($-dX/dt$) permanece constante. Se efectúa el secado a esta velocidad constante hasta que la humedad del sólido alcanza

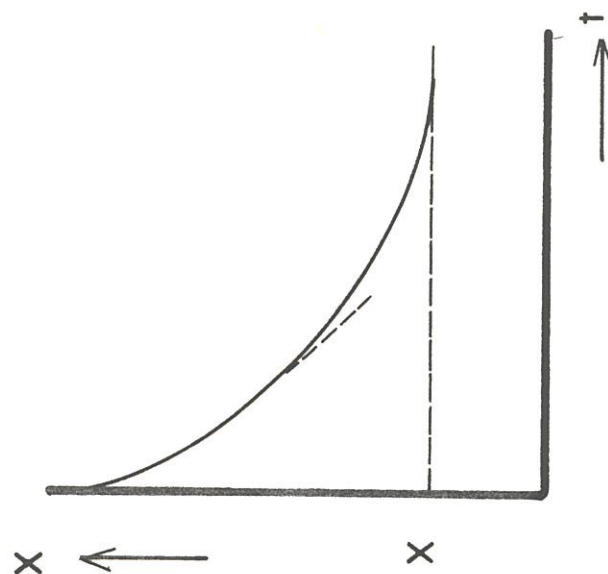


Fig. 2.2 CURVA DE TIEMPO DE SECADO. ⁽¹¹⁾

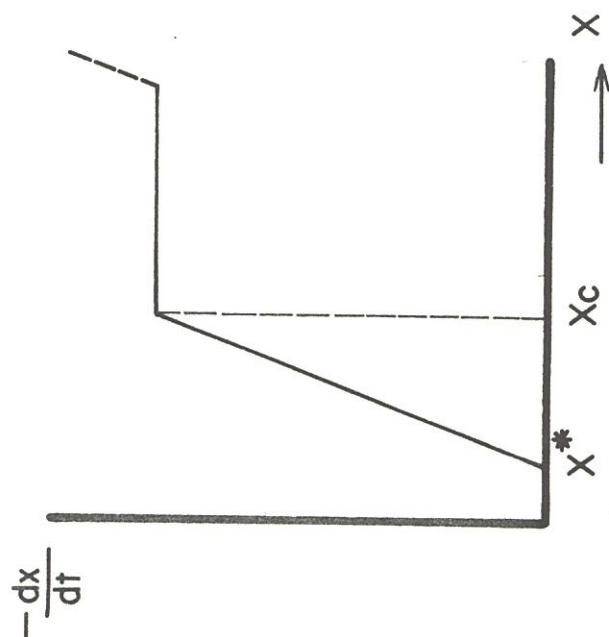


Fig. 2.3 CURVA DE RAPIDEZ DE SECADO. ⁽¹¹⁾



un valor crítico, a partir del cual la velocidad de secado disminuye, hasta que el sólido alcance la humedad de equilibrio. A partir de los datos de la figura 2.2, se pueden obtener los datos de velocidad de secado: $(-dX/dt)$ frente a la humedad, tal como se indica en la figura 2.3. Aquí se puede notar dos tramos diferentes: uno que corresponde a un periodo de velocidad constante y otro a velocidad decreciente.

2.4.2 PERIODO DE SECADO A VELOCIDAD CONSTANTE

Se caracteriza porque la velocidad de secado es independiente de la humedad del sólido, puesto que éste está bien húmedo y contiene una película continua de agua sobre toda la superficie expuesta al aire secante. Esta velocidad de evaporación bajo cualquier condición del aire, es independiente del sólido y es esencialmente la misma que la velocidad de evaporación en una superficie libre de un líquido bajo las mismas condiciones. Sin embargo, la mayor rugosidad de la superficie del sólido puede proporcionar velocidades más elevadas de evaporación que las obtenidas en la superficie libre de un líquido.

El proceso se reduce a una transferencia de masa desde la superficie del sólido a la corriente de aire y de la transferencia de calor del aire al sólido, suponiendo que la radiación y conducción a la superficie mojada son despreciables. Este período se dice que está en estado estable, y por lo tanto la transferencia de masa se balancea con la transferencia de calor.

Entre los factores que afectan a la velocidad de secado constante tenemos: temperatura y humedad del aire, además las variaciones en la velocidad del aire también afectan a la velocidad de secado durante el período de velocidad de secado constante.

Este período finaliza cuando el agua no llega a la superficie tan rápidamente como se efectúa la evaporación desde ella, es decir el cuerpo alcanza la denominada "humedad crítica" (X_c) a partir de cuyo momento se inicia el período de tasa decreciente. Aquel contenido de humedad crítico depende de las condiciones del aire secante, espesor del lecho sólido, de las propiedades del material y del tipo de secado utilizado.

2.4.3 PERIODO DE SECADO A VELOCIDAD DECRECIENTE

Se caracteriza porque la velocidad de secado dependen más de la distribución de humedad en el interior mismo que de la corriente de aire secante que actúa sobre la superficie del producto. La resistencia a la transferencia de masa entre la superficie y el aire que rodea, es ahora despreciable con respecto a la resistencia interior al transporte de humedad, la misma que depende de las fuerzas capilares y de las fuerzas de difusión. Entonces, las propiedades de la materia que debe secarse son las que básicamente deciden el comportamiento del proceso de secado durante esta fase.

Aunque la cantidad de humedad eliminada en este período puede ser pequeña, el tiempo necesario para este período es con frecuencia muy grande. Como consecuencia de ello, el período de disminución de la velocidad tiene un efecto importante sobre el tiempo total de secado.



2.4.3.1 MOVIMIENTO DE LA HUMEDAD DENTRO DEL SOLIDO

Cuando ocurre la evaporación superficial, debe haber movimiento de la humedad desde el interior del sólido hasta la superficie. La naturaleza del movimiento modifica el secado durante el período decreciente de la rapidez. Este movimiento interno del líquido que puede ser por difusión del líquido o por movimiento capilar.

La difusión de la humedad líquida puede derivarse de los gradientes de concentración entre el interior del sólido, donde es alta y la superficie, donde es baja.

El movimiento capilar sucede en sólidos granulares o porosos, la humedad no ligada se mueve a través de intersticios de los sólidos mediante un mecanismo que interviene la tensión superficial. Los capilares se extienden desde pequeños recipientes de la humedad en el sólido hasta la superficie que se está secando.

Para determinar cual de los dos mecanismos prevalece, se usan los datos experimentales del contenido de humedad. El cambio de humedad no realizado, definido como la razón de humedad libre presente en el sólido después del secado por t horas a el contenido total de humedad libre presente en el comienzo del período de velocidad de secado decreciente, X/X_c , es graficado versus el tiempo en papel semilog (fig.2.4).

La pendiente de la curva es igual a $-R_c/x_1 \sqrt{X_c}$, si R_c es igual al calculado de los datos experimentales del período constante, entonces el movimiento de humedad es por capilaridad. Pero si no coinciden los dos valores de velocidad de secado, entonces el movimiento de humedad es por difusión y la pendiente es igual a $-\pi^2 D_L / 4x_1^2$. De esta manera de obtiene el coeficiente de difusión del agua dentro del sólido (Ref.6).

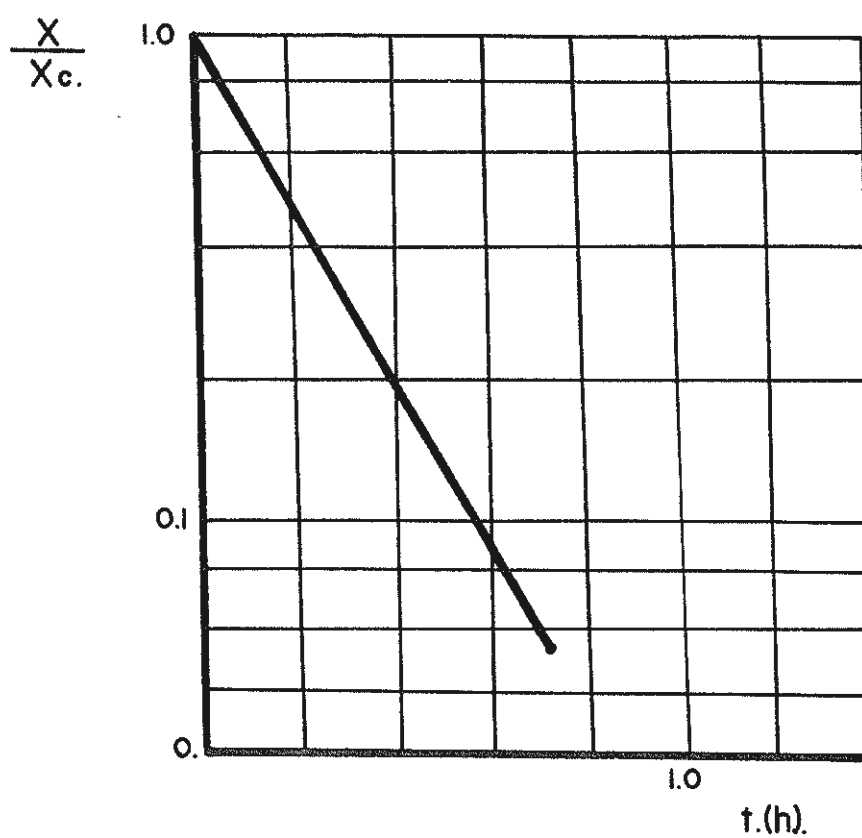



Fig: 2.4 GRAFICA UTILIZADA PARA DE-
TERMINAR EL MOVIMIENTO -
POR DIFUSION O CAPILARI -
DAD DEL GRANO. (6)

2.5 EFECTO DE LAS VARIABLES DEL PROCESO

El proceso de secado depende de varios factores, los cuales están íntimamente ligados entre sí, entre ellos:

HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE DE SECADO.— Cuanto más baja esté la humedad relativa tanto más capacidad tiene el aire de absorber humedad de la cosecha. Esto equivale a secar con más rapidez. La humedad relativa varía según la temperatura. Un pequeño aumento de la temperatura aminora considerablemente la humedad relativa y de ésta manera aumenta la capacidad higroscópica del aire. Como una guía aproximada: 1°C de aumento de la temperatura proporciona una reducción del 4% de HR.

VELOCIDAD DEL FLUJO DE AIRE.— El efecto de la velocidad del aire que atraviesa la camada es muy importante cuando la convección está presente. En el secado por lotes, el flujo de aire tendrá que ser lo suficiente para atravesar la masa de granos y acarrear la humedad fuera de ella. Para obtener mayor beneficio del aire de secar la humedad relativa del aire al salir de la cosecha debe encontrarse lo más cercana posible al punto de saturación, para obtener esta condición o se varía la profundidad de la cosecha o la velocidad del flujo del aire. Si la velocidad es muy alta atravesará la



masa de grano, pero el aire no saldrá saturado y por lo tanto se pierde eficiencia.

TEMPERATURA DEL AIRE.- La temperatura del aire debe ser mantenida bajo un cierto valor máximo dependiendo del uso del grano, debiendo estar entre 40 y 50 °C. El efecto de la temperatura está asociada con el tiempo de exposición. Una temperatura alta debe ser usada por corto tiempo. Durante el secado, el grano se mantiene a una temperatura menor que el aire usado para secar. Excesivas velocidades de secado o altas temperaturas pueden causar daños físicos y químicos al grano. De hecho no es la temperatura en sí misma la que provoca que el grano se agriete, cuando se emplean flujos de aire excesivamente calientes, sino el contenido de humedad excesivamente bajo que el aire llega a tener normalmente a tales condiciones. Si el aire tiene un contenido de humedad de alrededor del 35% no se producen daños en el arroz, con temperaturas de este orden (Ref.4).

ALTURA DEL LECHO DEL SOLIDO.- El lecho debe ser de tal manera que ofrezca poca resistencia al paso del aire, para que el flujo de éste sea parejo y voluminoso. Hasta donde se pueda el espesor de la capa de sólido debe ser igual en toda la superficie y se debe tomar la precaución de evitar áreas de alta resistencia al flujo

de aire. El flujo de aire atraviesa la parte inferior y se desplaza a la parte superior de la camada haciendo que el secado vaya progresando en forma vertical. Al inicio del secado se establece una zona de intercambio de la humedad de la semilla con el aire, conocida como frente de secado, aquí la captación del agua por el aire es mayor y a medida que el aire sube va disminuyendo su capacidad de captación de agua, saliendo de esta manera saturado. El arroz en cáscara se seca más rápidamente cerca del fondo de la capa de grano por donde el aire de secado ingresa, que en la parte superior por donde el aire de secado sale. A mayor temperatura de secado mayor será el gradiente de humedad entre el tope y el fondo de la masa de grano. Esta es una de las básicas limitaciones del tipo de secado por lotes. A medida que avanza el secado, este aire va saliendo menos húmedo, que este efecto de la altura del lecho se ilustra en la figura 2.5.

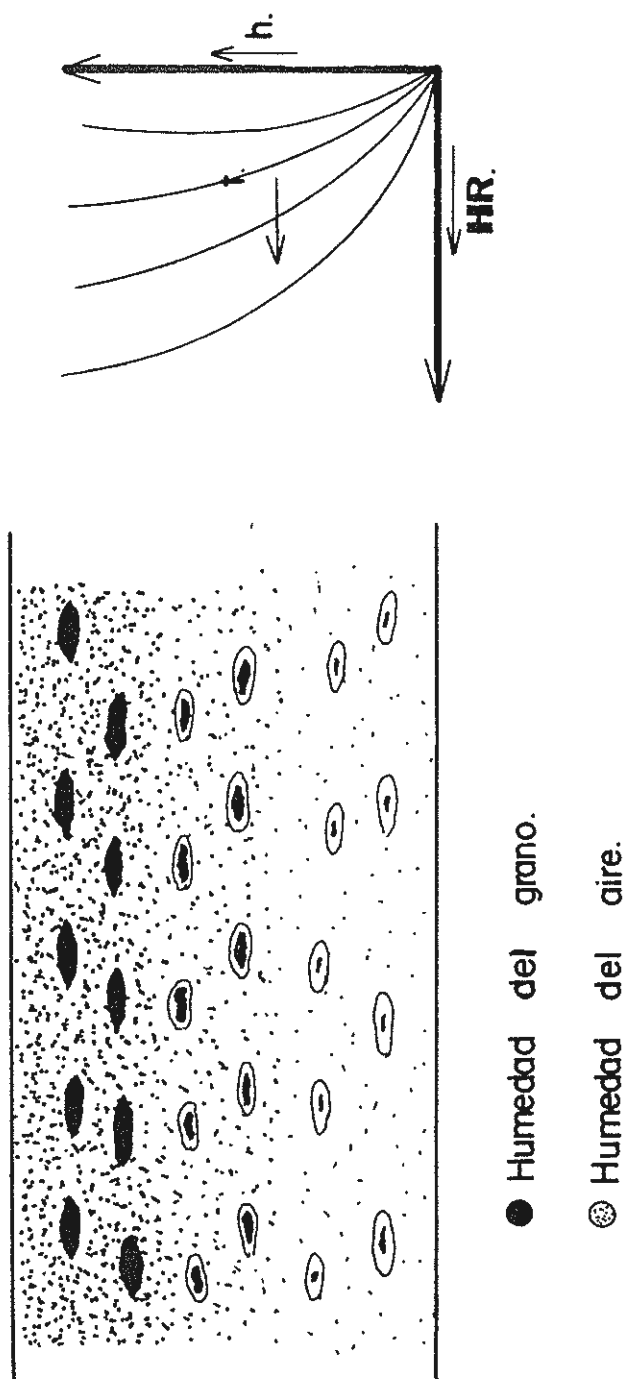


Fig. 2.5 EFECTO DE LA ALTURA DEL LECHO.

C A P I T U L O I I I

PRUEBAS EXPERIMENTALES

3.1 DESCRIPCION DE LA PRUEBA

El secador utilizado es de tipo estacionario, el aire ingresa de abajo hacia arriba, éste consta de un recipiente de plywood de 20 cm x 18.6 cm y una altura de 25 cm, aquí es donde se coloca el arroz en cáscara que se va a secar, el piso de este recipiente es de tela metálica, lo que permite el libre paso del flujo de aire. El flujo de aire lo proporciona un ventilador y la fuente de calor un foco de 150 W. El ventilador va conectado al recipiente por medio de una tubería de 2.26 cm de diámetro con una válvula que nos permite regular el flujo y es aquí donde utilizando un tubo de Pitot se mide el flujo de aire enviado.

Dentro del recipiente se colocaron cinco termocuplas tipo j para medir la temperatura del aire a lo largo de la camada de arroz, a una distancia de: 0, 4, 7.5, 11.5, 15.5 cm, también se colocó otra termocupla a la entrada del aire. Todas estas termocuplas van conectadas a un selector y al termómetro digital. En la figura 3.1 se

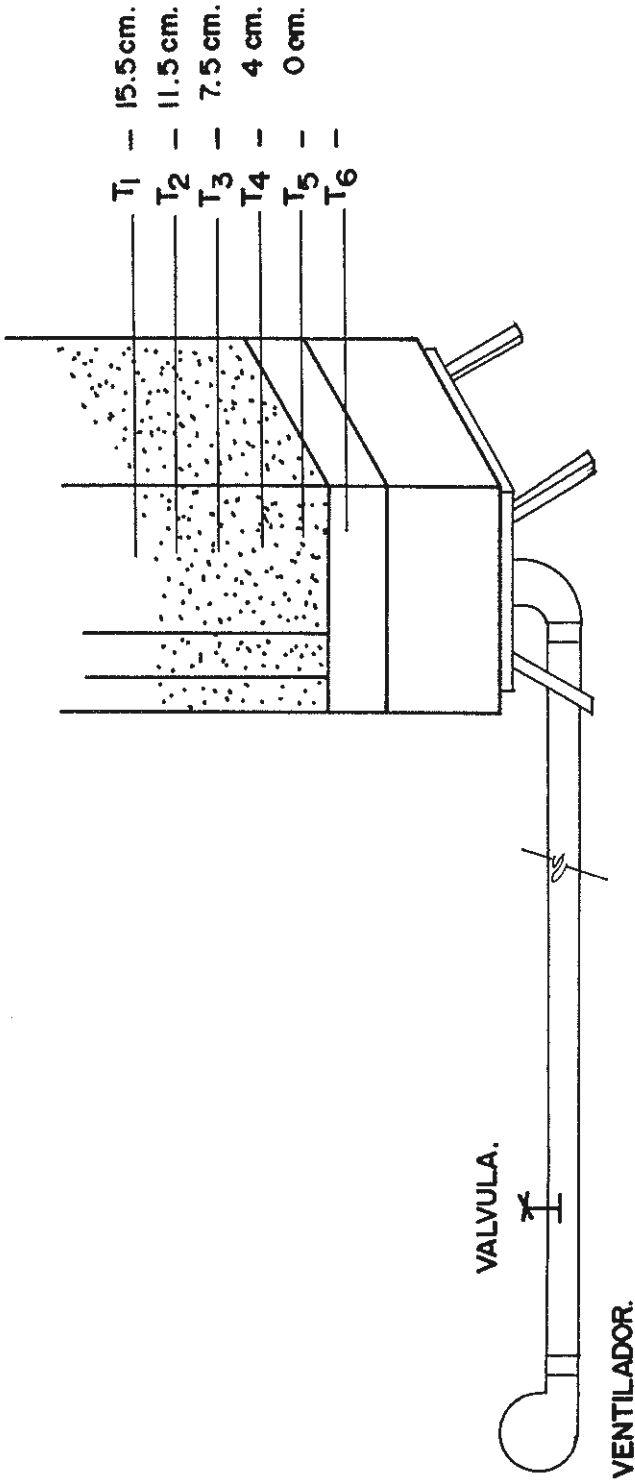


Fig. 3.1 ESQUEMA DEL SECADOR.

aprecia la nomenclatura usada para cada una de las temperaturas.

Se tomaron datos de temperaturas y humedades del ambiente y del aire a la salida del secador cada cierto tiempo utilizando un psicrómetro.

La variación de la humedad con el tiempo se la midió por medio de la pérdida de peso de una muestra. Para obtener la muestra se hizo dos recipientes de tela metálica 8cm x 8cm, el que contenía la muestra iba por dentro y se lo podía retirar para poder pesarla. La pérdida de peso de la muestra se tomó cada 5 o 10 minutos, utilizando una balanza mecánica y una balanza electrónica.

Las humedades iniciales del grano se midió utilizando un higrómetro, luego de haber comprobado su calibración en el horno.

La presión estática de la cama de arroz se la midió con un manómetro referido al ambiente, colocándolo a la entrada de la cama de arroz.

Se va a tratar de bajar la humedad del arroz en cáscara a un 13%, que es el límite para una buena conservación del grano y para el pilado del mismo (Ref.9).

3.2 EQUIPO UTILIZADO

- Psicrómetro. Vista Scientific Corporation
escala: 0 - 100°F
mínima división: 1°F
- Higrómetro. Higropant H.H.65 S
escala: 0 -170 (<7 a 35.6%)
- Selector de termocuplas. Omega Engineering Inc.
capacidad: 12
- Termómetro digital. Fluke
escala: °C y °F
mínima división: 1°C - 1°F
- Termocuplas tipo j
- Ventilador. Ferconsa
tipo B-30
3600 RPM
- Balanza mecánica.
escala: 0 - 2000 g.
mínima división: 0.1 g.
- Balanza electrónica. Yamato Labtop Balance LW-2200
escala: 0 - 2000g.
mínima división: 0.1 g.
- Manómetro
- Tubo de Pitot



BIBLIOTECA

3.3 SELECCION DE LOS PARAMETROS DE SECADO

Para seleccionar los parámetros que se van a utilizar en la prueba, se tomó como base experimentos ya realizados. Para poder comparar este experimento con una prueba a gran escala se escogieron los valores de caudal, altura de camada, temperatura del aire y dirección del aire lo más parecido a lo real, además se siguieron las siguientes recomendaciones dadas:

Para una cama de arroz de 3.6 m x 1.8 m, con una altura de arroz en cáscara 6 pulgadas se necesita un flujo de aire 15 cfm/cu ft y si es una altura de arroz en cáscara de 12 pulgadas se necesita un flujo de aire de 35cfm/cu ft. Además se recomienda no tener presiones estáticas por encima de 90 mm de agua y secar a una temperatura de 43°C (Ref.1,9,10).

Con estos valores calculamos los flujos de aire para nuestras dimensiones de cama:

$$v = Q/A$$

$$v = 5.40 \text{ m/min}$$

$$Q = 0.20 \text{ m}^3/\text{min}$$

Haciendo un ajuste de las necesidades y el equipo existente se decidió hacer con una misma abertura de la

válvula tres pruebas con 10, 15 y 20 cm de altura de camada de arroz en cáscara, el flujo no es exactamente el mismo, pero por dificultades en su medición se lo mantuvo así. Se usó el máximo flujo dado por el ventilador y de ahí se varió a flujos menores.

3.4 CURVAS EXPERIMENTALES

3.4.1 VARIACION DE HUMEDAD Y VELOCIDAD DE SECADO

A partir de la tabla de datos de las pruebas experimentales (Apéndice A.1) se realizan los gráficos de humedad vs. tiempo y velocidad de secado vs. humedad promedio. Se calcula la variación de humedad en base a la pérdida de peso de la siguiente manera:

$$\text{Base húmeda:} \quad X = (P_x - P_s) * 100 / P_x$$

$$\text{Base seca:} \quad X = (P_x - P_s) * 100 / P_s$$

Donde:

X = Humedad (%)

P_x = Peso de la muestra (g)

P_s = Peso de la muestra seca (g)

La velocidad de secado se calcula así:

$$R_c = (P_i - P_x) / t$$

Donde:

R_c = velocidad de secado (g/h)

P_i = peso inicial de la muestra (g)

P_x = peso de la muestra (g)

t = intervalo de tiempo (h)

La tabla de resultados se muestran en el Apéndice A.2 y los gráficos en el Apéndice B, para cada una de las pruebas.

Además se calculó la humedad de equilibrio con la siguiente expresión:

$$1 - HR = \exp (-a_1 (T + a_2) X^{*a_3})$$

Donde:

HR = humedad relativa, decimal

X^* = humedad de equilibrio (base seca), %

T = temperatura del aire, °C

a_1 = 0.0000192

a_2 = 51.161

a_3 = 2.4451

Los resultados se presentan en el Apéndice A.2

3.4.2 FACTOR DE UTILIZACION DEL CALOR

El factor de utilizacion del calor es una expresi3n que nos indica cuan eficiente la cama de grano utiliza el aire de secado (Ref.9).

$$HUF = \frac{t_e - t_s}{t_e - t_a} * 100$$

HUF = factor de utilizaci3n del calor (%)

t_a = temperatura ambiente (°C)

t_e = temperatura del aire a la entrada de la cama de arroz (°C)

t_s = temperatura del aire a la salida de la cama de arroz (°C)

Las temperaturas usadas son de las tablas de datos del Ap3ndice A.1, los resultados se presentan en el Ap3ndice A.2 y las gr3ficas de HUF vs. tiempo de secado se encuentran en el el Ap3ndice B.

3.4.3 CAPTACION DE AGUA EN EL TIEMPO

Esta gr3fica nos enseña como va captando el aire el agua a lo largo de la cama de arroz para distintos tiempos.



BIBLIOTECA

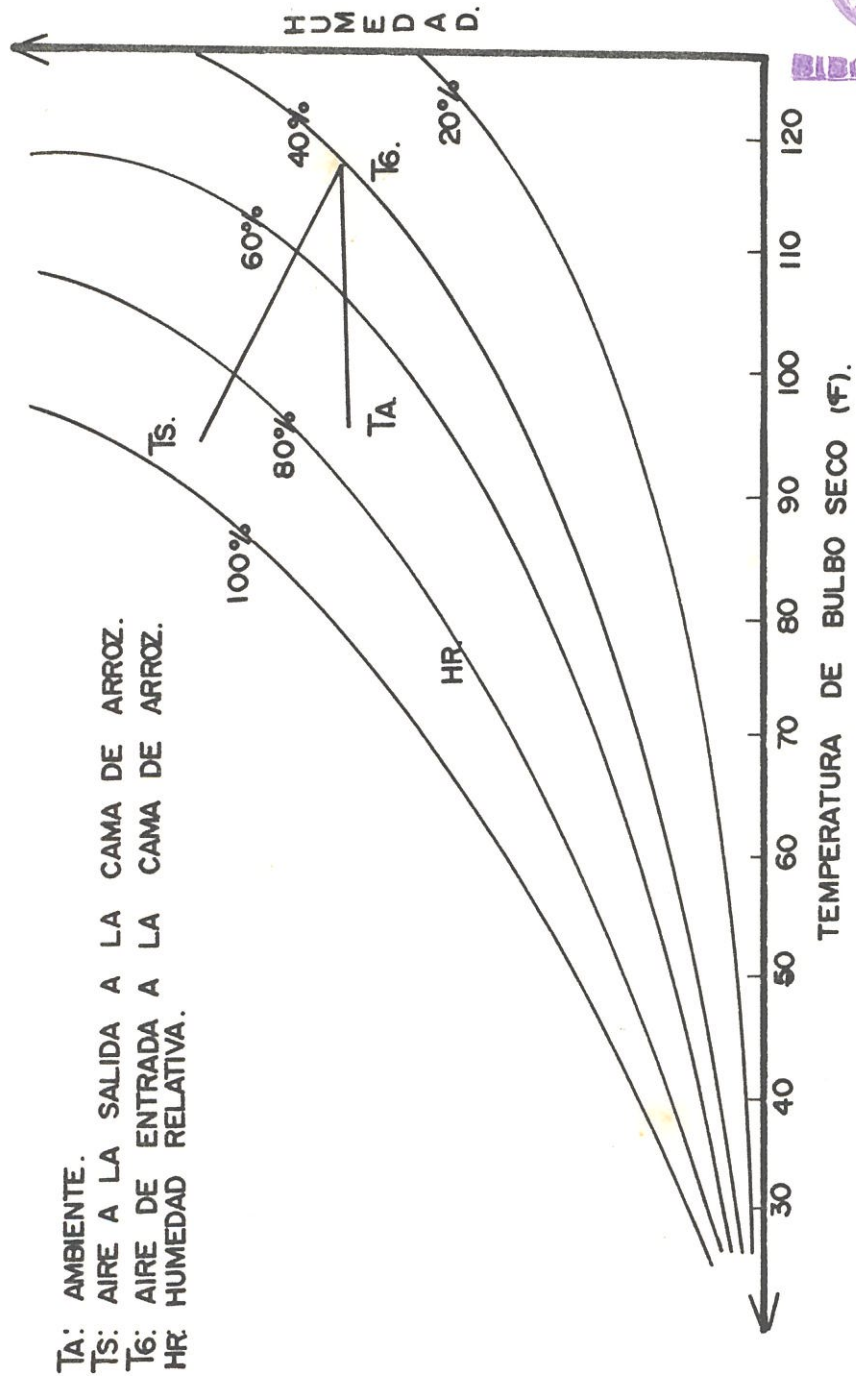


Fig. 3.2. CARTA PSICROMETRICA.

Se utiliza los datos del Apéndice A.1 de humedad relativa del ambiente y las temperaturas dentro de la cama. Con la ayuda de la carta psicrométrica, las temperaturas del aire dentro de la cama y la temperatura ambiente, se encuentra las humedades relativas del aire dentro de la cama y se grafica altura de la cama de arroz vs. humedad relativa.

Para calcular la humedad relativa del aire de secado en las distintas zonas de la cama, se asume el secado como un proceso adiabático y por lo tanto a entalpía constante. De esta manera se ubica en la carta psicrométrica las condiciones ambientales y se sigue el calentamiento a la misma razón de humedad hasta que llega a la temperatura de entrada del aire y sobre la línea de entalpía se mueve para encontrar las diferentes humedades relativas, como se ilustra en la figura 3.2.

Los resultados se adjuntan en el Apéndice A.2 y los gráficos en el Apéndice B.

3.5 ANALISIS DE LAS CURVAS

De los gráficos del Apéndice B, observamos en las curvas de humedad vs. tiempo un comportamiento similar en todas

las pruebas; con una primera zona en que la humedad decrece muy rápidamente, casi linealmente seguida por una segunda zona en que la humedad disminuye lentamente en el tiempo, tendiendo de manera asintótica a su límite, la humedad de equilibrio del grano con el aire de secado.

Así en la prueba 1, la primera zona se encuentra entre el 24% y 22% de humedad y la segunda entre el 22% y 13% de humedad; en la prueba 2, la primera zona se encuentra entre el 25% y 23% de humedad y la segunda zona entre el 23% y 13% de humedad; en la prueba 3, la primera zona se encuentre entre el 24% y 22% y la segunda entre los 22% y 15%; en la prueba 4, la primera zona se encuentra entre el 25% y 23% de humedad y la segunda zona entre los 23% y 15% de humedad; en la prueba 5, no se aprecia la primera zona, sólo la segunda que se encuentra entre el 25% y 13% de humedad; y en la prueba 6, la primera zona se encuentra entre el 26% y 24% y la segunda entre el 24% y 13% de humedad.

En las pruebas 1, 2, 5 y 6 el grano llegó a la humedad requerida (13%), pero en el caso de las pruebas 3 y 4 se alcanzó una humedad no menor de un 15% aproximadamente; esto se debe a que la humedad de equilibrio del grano con el aire es muy alta y por lo

tanto el equilibrio se lo encuentra mucho antes de que llegue a la humedad requerida.

En las gráficas de velocidad de secado vs. humedad promedio, se aprecia una zona pequeña en la cual hay gran variación en la velocidad de secado, definiéndose ésta como zona de estabilización de la vaporización, que se confunde con el período de secado a velocidad constante por ser éste de muy corta duración.

En la prueba 1 y 4 se alcanza a diferenciar claramente la zona de velocidad constante, entre los valores de 24% y 22% de humedad y entre 25% y 23% de humedad respectivamente.

En las pruebas 2, 3 y 6 se nota ambas zonas; para la prueba 2, la zona de velocidad constante está comprendida entre 23% y 24% de humedad y la de vaporización de 24% en adelante; para la prueba 3, la zona de velocidad constante está entre 22% y 23% y la de vaporización de 23% en adelante; para la prueba 6, la zona de velocidad constante está entre 24% y 25% de humedad y la de vaporización de 25% en adelante.

En la prueba 5 se diferencia claramente la zona de vaporización que se localiza del 23% en adelante,

mientras que la zona de velocidad constante no puede ser diferenciada.

De las gráficas de altura de camada vs. humedad relativa del aire de secado, se puede apreciar la influencia de la altura de camada, de la velocidad del aire de secado y la capacidad del aire para captar agua.

Al observar las curvas se deduce que si la camada es de mayor altura como en las pruebas 2 (20cm), 5 (15cm) y 6 (20 cm), el aire se satura dentro de ella durante un período más largo de tiempo; así por ejemplo, en la prueba 2 hasta los 70 min. de secado, el aire se satura dentro de la camada. Mientras en las pruebas 1, 3 y 4 (10cm) el aire se satura dentro de la camada de arroz sólo en los primeros minutos y por tanto siendo menor el factor de utilización de calor en éstas pruebas.

Analizando éstas se aprecian 3 zonas claramente definidas; la primera localizada en los primeros minutos del secado, en donde el aire retira mayor humedad en la parte inferior de la camada, llegando a las capas superiores con poca capacidad de captación de agua; la segunda que más bien es una recta de pendiente constante, donde se retira iguales tasas de humedad a lo largo de la camada y luego encontramos la tercera zona donde las curvas de frente de secado presentan un

cambio en su curvatura, debido a que se retira menos humedad de las capas inferiores y más humedad de las capas superiores, con una clara tendencia a equilibrar la humedad del grano entre las capas de la camada.

Es así que la última curva del frente de secado debe presentar una pequeña diferencia entre la humedad del aire a la entrada de la camada y a la salida de la misma. Esto se da para las pruebas 1,4 y 5, lo que significa que el aire no retira humedad en ninguna parte de la camada, por lo que se puede predecir que el secado ha sido homogéneo. Por el contrario en las pruebas 2,3 y 6 ésta diferencia no es pequeña por tanto el secado no ha sido homogéneo.

El efecto de la velocidad del aire de secado es fácilmente apreciable comparando las pruebas 1 y 3, en las cuales se mantiene la altura de camada constante (10cm) y se varía el flujo de aire de 0.63 metros cúbicos/min en la primera prueba a 0.31 metros cúbicos/min en la tercera prueba; así en la prueba 1 la última curva del frente de secado muestra una pequeña diferencia entre las humedades inicial y final del aire de secado, por el contrario en la prueba 3 ésta diferencia es significativa. Además el tiempo de secado en la primera prueba es menor, con un secado homogéneo;

por el contrario en la tercera prueba el tiempo es mayor y el secado no es homogéneo.

Con las gráficas de factor de utilización de calor vs. tiempo, se observa que se aprovecha mejor el calor en las pruebas que tienen una altura de cama mayor, como son las pruebas 2, 5 y 6 que tienen una altura de 20, 15 y 20 cms respectivamente; en cambio que las de altura de 10 cm, como en las pruebas 1 y 4, se aprovecha mucho menos el calor, compensándose con el tiempo de secado que es mucho mayor. La prueba 3 a pesar de tener una altura de 10 cm se nota un buen factor de utilización de calor, debido a que el flujo usado es muy pequeño y por lo tanto el aire se mantiene dentro de la camada de arroz por más tiempo, utilizando de mejor manera el calor a cambio de mayor tiempo para secar.

CAPITULO IV

DESARROLLO TEORICO



BIBLIOTECA

4.1 ANALISIS DEL SISTEMA

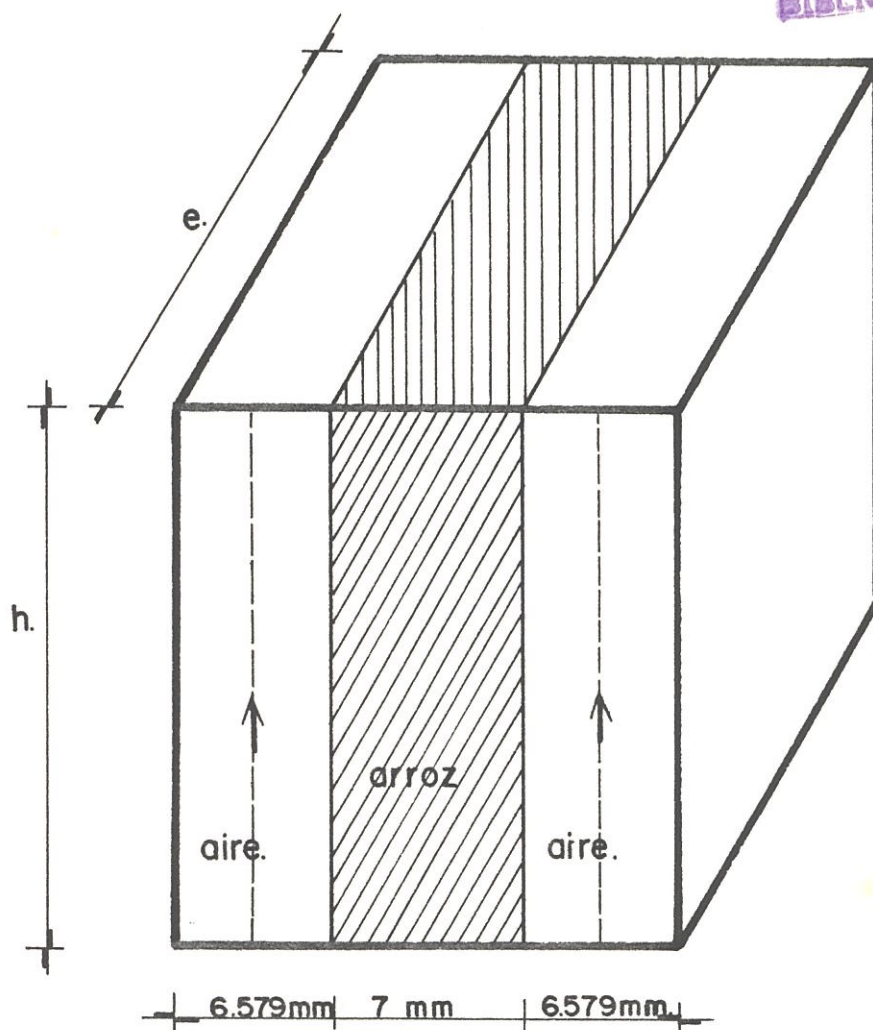
Se analizará el sistema asumiendo que el aire que pasa a través de la cama de grano, forma canales que van desde el fondo hasta la superficie, como se indica en la figura 4.1. El ancho de los canales está determinado por la llamada porosidad, que es el porcentaje de espacios vacíos dentro de la camada de arroz en cáscara.

Se tratará al arroz en cáscara como si se comportará como una pared plana y su ancho será del tamaño promedio de un arroz, que se supone de 7 mm. Siendo la porosidad del arroz en cáscara a granel de 0.4845, el ancho del canal será:

$$7\text{mm} * 0.4845 / 0.5255 = 6.579 \text{ mm}$$

0.5255

Entonces los canales tendrán un tamaño de 6.579 mm x 200 mm.



h. ALTURA DE LA CAMA DE ARROZ.
e. ANCHO DE LA CAMA DE ARROZ.

Fig. 4.I. ESQUEMA DEL SISTEMA.

4.2 PROCESOS INVOLUCRADOS EN EL SECADO DE ARROZ EN CÁSCARA

En el secado del arroz en cáscara se involucran dos procesos el de transferencia de calor y el de transferencia de masa.

Durante el secado el aire que pasa a través del arroz tiene dos funciones la de entregar calor al arroz para retirar la humedad y la de servir como vehículo para transportar el agua evaporada fuera de la masa de semillas.

En el periodo de velocidad constante la transferencia de calor (q) del aire al arroz se produce por convección y la transferencia de masa (N) del agua del arroz al aire es también por convección, como en esta etapa la razón del movimiento de la humedad es suficiente para mantener la superficie mojada, entonces este período está en estado estable y la transferencia de calor se balancea con la transferencia de masa como se ilustra en la figura 4.2.

En el periodo de velocidad de secado decreciente la razón del movimiento de humedad dentro del grano no es suficiente para mantener mojada la superficie. Por lo tanto aparte de los procesos de transferencia de calor por convección (q_c) que se transmite desde el aire a la

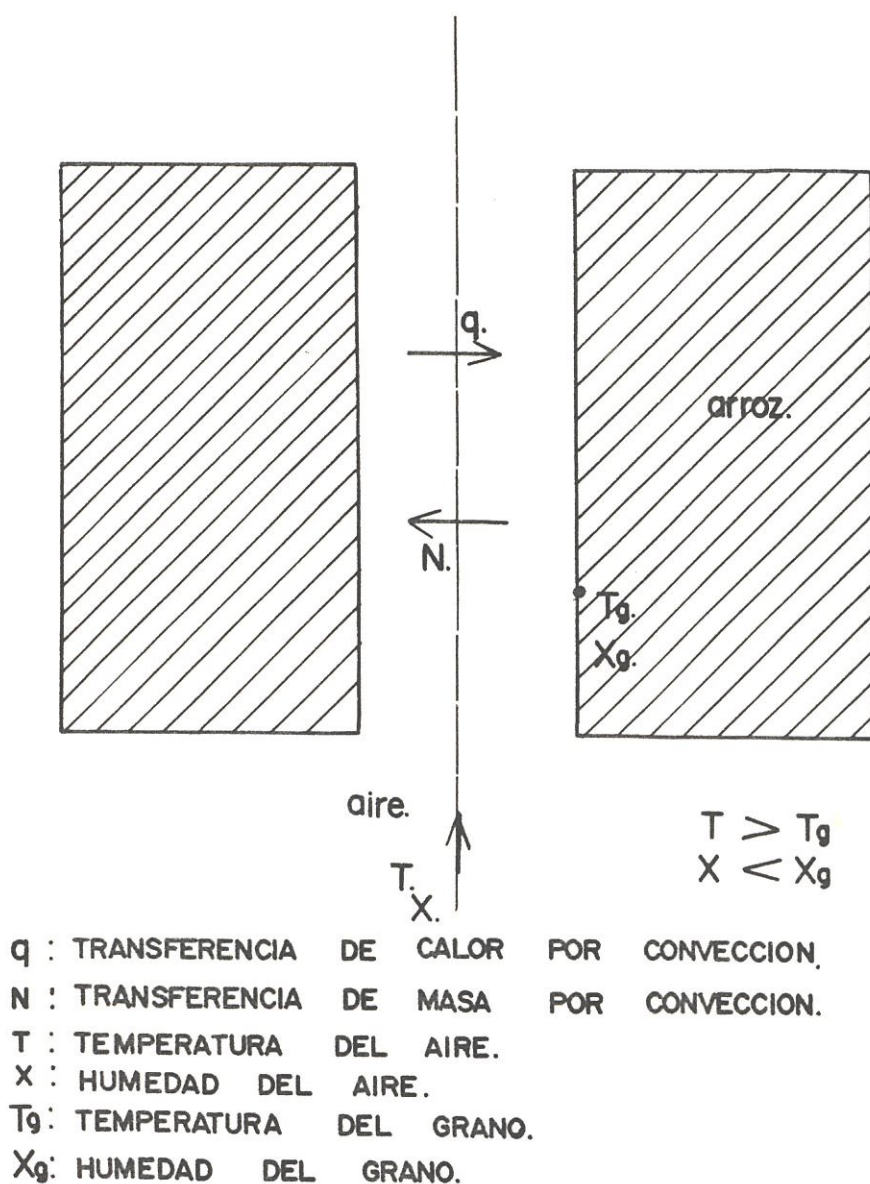


Fig. 4.2 ESQUEMA DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA EN EL PERIODO DE VELOCIDAD DE SECADO CONSTANTE.

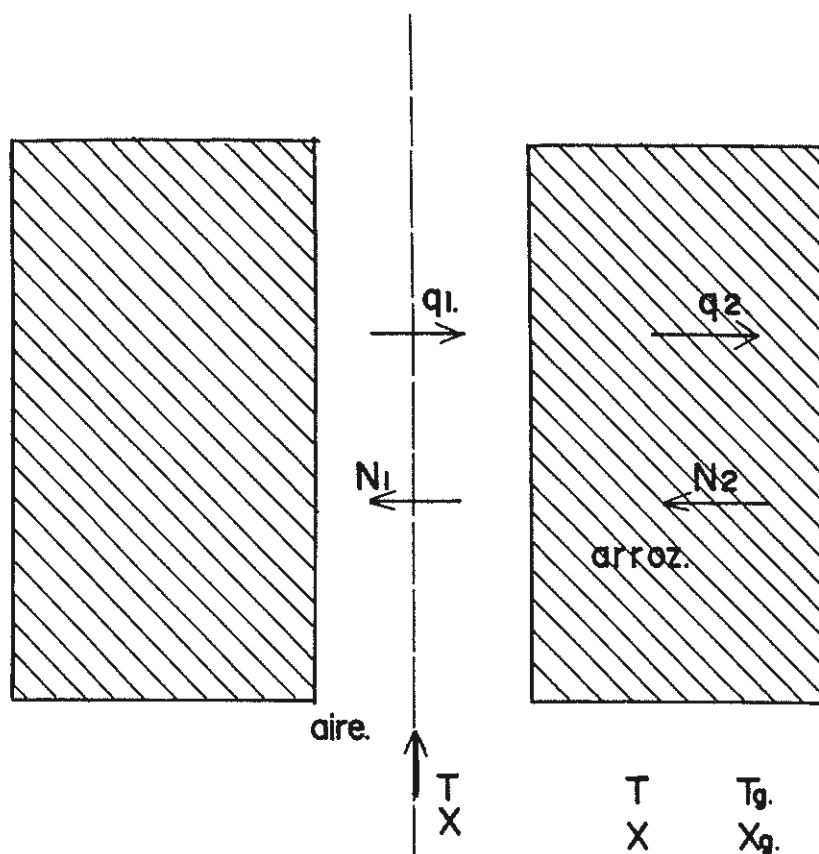
superficie seca del sólido y la transferencia de masa por convección (N_1) desde la superficie del grano al aire, se presenta una transferencia de masa por difusión del líquido (N_2) y una transferencia de calor por conducción dentro del grano (q_2) como se ilustra en la figura 4.3.

Pero en realidad hay movimiento del líquido y del vapor dentro del grano. El movimiento del líquido puede ser por capilaridad o por difusión del líquido. El movimiento del vapor puede ser debido a la diferencia de concentración de humedad, o sea por difusión del vapor y también por la diferencia de temperatura (conducción del calor dentro del sólido) o sea una difusión térmica.

Se presentan esta serie de mecanismos de transferencia de masa debido a la característica porosa capilar del grano de arroz.

4.3 CALCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA

Se va a encontrar el coeficiente de transferencia de calor dentro de los canales por donde circula el aire, usando la temperatura media de la cama de arroz para la prueba #6 que es de 40 °C, utilizando dichos datos por ser los más representativos.



- q_1 : TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCION.
 q_2 : TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCION.
 N_1 : TRANSFERENCIA DE MASA POR CONVECCION.
 N_2 : TRANSFERENCIA DE MASA POR DIFUSION DE LIQUIDO.
 T : TEMPERATURA DEL AIRE.
 X : HUMEDAD DEL AIRE.
 T_g : TEMPERATURA DEL GRANO.
 X_g : HUMEDAD DEL GRANO.

Fig. 4.3. ESQUEMA DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA EN EL PERIODO DE SECADO — DE VELOCIDAD DECRECIENTE.

Se encuentran las propiedades del aire a esta temperatura (Ref.7):

$$= 16.89 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}$$

$$\mu = 184.6 * 10^{-7} \text{ N-seg/m}^2$$

$$\rho = 1.1614 \text{ Kg/m}^3$$

$$C_p = 1.007 \text{ KJ/Kg-}^\circ\text{K}$$

$$k = 26.3 * 10^{-3} \text{ W/m-}^\circ\text{K}$$

$$\alpha = 22.5 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}$$

$$Pr = 0.707$$

$$R = 0.04548 \text{ m}^3\text{-atm/kg-mol } ^\circ\text{C}$$

Para saber que cantidad de flujo circula por cada canal, se obtiene el número de canales:

$$\frac{18.6 \text{ cm}}{(6.579 + 7) * 10^{-1} \text{ cm}} = 13.697 \approx 14$$

Si se tiene un flujo total de aire de $0.6080 \text{ m}^3/\text{min}$, el flujo que circula por cada canal será:

$$G = 0.04343 \text{ m}^3/\text{min}$$

Cada canal tiene un área transversal de:

$$A = 20\text{cm} * 0.6579\text{cm} = 13.16 \text{ cm}^2$$

Entonces la velocidad dentro de cada canal será:

$$v = G/A$$

$$v = 33 \text{ m/min}$$

Para saber que tipo de flujo es se calcula el número de Reynolds, tomando el diámetro hidráulico (Ref.7):

$$D_h = 4 A_c/P$$

$$D_h = \frac{4 * (0.2 * 6.579 * 10^{-3})}{2 * 0.2 + 2(6.579 * 10^{-3})}$$

$$D_h = 0.0127 \text{ m}$$

$$Re = v D_h/$$

$$Re = 440$$

Siendo el flujo laminar se utiliza la siguiente relación (Ref.7):

$$h*D_h/k = 4.36$$

De aquí que el coeficiente convectivo h es:

$$h = 9 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{K}$$

Se puede calcular el coeficiente de transferencia de masa utilizando la analogía con la transferencia de calor. Siendo el número de Schmidt (Ref.14):

$$Sc = \nu / D_v$$

Donde:

D_v = coeficiente de difusividad del agua en el aire (a 298°K es $0.26 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{seg}$)
 ν = viscosidad cinemática (m^2/seg)

Entonces reemplazando los valores encontramos:

$$Sc = 0.611$$

Como difiere con el número de Prandlt, no se puede utilizar la analogía de Reynolds y entonces se utiliza la analogía de Colburn (Ref.8):

$$j_H = j_M$$

o sea

$$h/V [C_p] (C_p \mu / k)^{0.67} = (k_a RT/V) (\mu / [D_v])^{0.67}$$

De modo que:

$$k_a = (h/C_p [RT]) [(C_p \mu / k) (\mu / [D_v])]^{0.67}$$

$$k_a = 4.16 \text{ Kg-mol/h-m}^2\text{-atm}$$

4.4 DETERMINACION DEL MECANISMO QUE CONTROLA EL MOVIMIENTO DE LA HUMEDAD DENTRO DEL GRANO

Se deduce que la masa que se transporta es líquida, debido a que como la conductividad térmica del arroz es muy baja, no hay la suficiente energía para evaporar el agua dentro del grano y por lo tanto los mecanismos que controlan el movimiento de humedad dentro del grano, pueden ser: por capilaridad o difusión del líquido. Se determinará cual de los dos mecanismos prevalece en el transporte de humedad dentro del sólido.

También en este caso se utilizará los datos de la prueba #6, ya que en esta se puede notar un pequeño tramo de velocidad de secado constante, el cual es un dato que se necesita en esta determinación.

De la gráfica de humedad vs. tiempo, se obtiene la velocidad de secado constante:

$$R_c = (P_s/A) * (X_i - X_c)/t$$

Donde se utiliza las humedades base seca, el peso del arroz seco y el área de secado del muestreador. Siendo las dimensiones del muestreador de 8cm x 8cm x 20cm, se utiliza el volumen de secado que se lo calcula de la siguiente manera (Ref.6):



BIBLIOTECA

$$V = 8\text{cm} * 8\text{cm} * 20\text{cm} = 0.00128 \text{ m}^3$$

$$V_s = V / (1 - \epsilon)$$

Donde, ϵ es la porosidad de la cama de arroz en cáscara.

$$V_s = 0.00248 \text{ m}^3$$

$$A = V_s / h$$

$$A = 0.00248 \text{ m}^3 / 0.2 \text{ m}^2$$

$$A = 0.012 \text{ m}^2$$

De aquí que la velocidad de secado experimental es:

$$R_c = \frac{0.213 \text{ Kgs}}{0.012 \text{ m}^2} * \frac{(0.346 - 0.316) \text{ Kga/Kgs}}{50 \text{ min}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}}$$

$$R_c = 0.619 \text{ Kga/m}^2\text{-h}$$

Se realiza una curva de X/X_c vs. tiempo en escala semilogarítmica (figura 4.4), de donde obtenemos su pendiente :

$$\text{pendiente} = 1.688 * 10^{-5} / \text{seg}$$

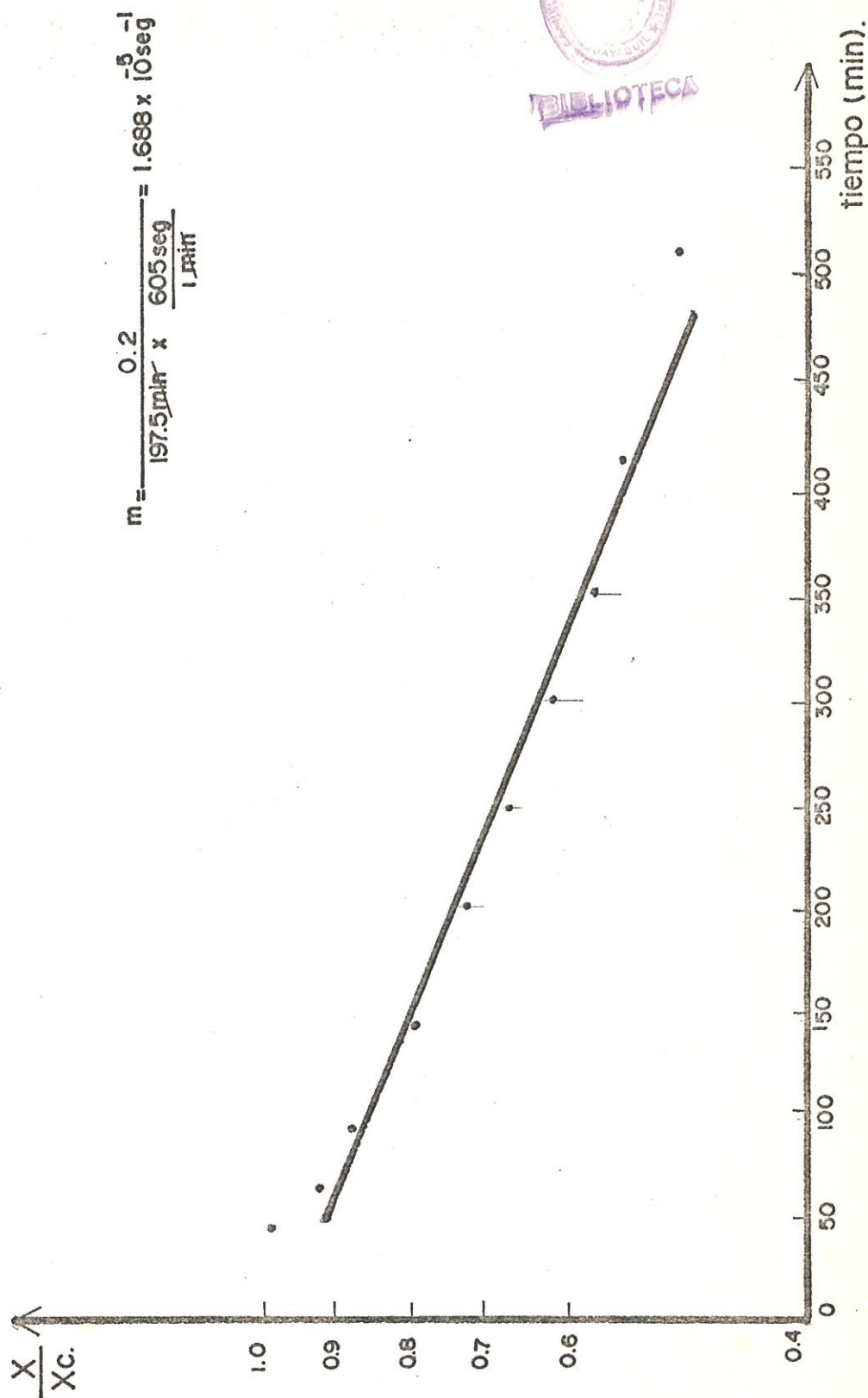


Fig. 4.4 CAMBIO DE HUMEDAD NO REALIZADO VS TIEMPO.



Esta pendiente va a ser igual a:

$$\text{pendiente} = -R_c/x \int X_c$$

Despejando R_c , se obtiene su valor:

$$R_c = 0.0391 \text{ kga/m}^2\text{-h}$$

Como la velocidad de secado calculada es diferente de la velocidad de secado experimental, entonces el movimiento del agua dentro del sólido es por difusión y la pendiente de la curva será igual a:

$$\text{pendiente} = \pi^2 D_L / 4x^2$$

De aquí se obtiene el coeficiente de difusión D_L :

$$D_L = 2.39 * 10^{-11} \text{ m}^2/\text{h}$$



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el proceso de secado es muy importante las condiciones ambientales como son la temperatura y la humedad relativa del aire, pues determinan que varíen notablemente los parámetros de secado como humedad final deseada, tiempo y velocidad de secado. Pero es también muy importante el mecanismo del movimiento interno de la humedad. .

Así se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- La humedad alcanzada durante el proceso de secado difiere aproximadamente en un 2% de la humedad de equilibrio del arroz con el aire de secado. Así en las pruebas 1,2,5 y 6 la humedad alcanzada es de 13% y la humedad de equilibrio del grano con el aire de secado es aproximadamente 11%; y en las pruebas 3 y 4 la humedad alcanzada es de 15% y la humedad de equilibrio del grano con el aire de secado es aproximadamente 13%. Generalmente esta humedad alcanzada es la humedad requerida.
- Cuando la humedad alcanzada durante el proceso de secado no llega a la humedad requerida es necesario bajar el valor de la humedad de equilibrio del arroz con el aire de secado. Lo cual se logra usando ráfagas intermitentes

de aire de secado, a mayor temperatura que la usada durante el proceso.

- En el secado de arroz predomina el período de velocidad decreciente de secado.
- El período de velocidad de secado constante es de muy corta duración pudiendo ésta no presentarse.
- Si la última curva del frente de secado tiene una diferencia pequeña entre la humedad inicial y final del aire de secado, se puede decir que el proceso de secado ha sido homogéneo entre las diferentes capas de la camada de arroz.
- Se debe llegar a un compromiso entre el factor de utilización del calor, el tiempo y la homogeneidad del secado, de manera que no es válido un factor de utilización de calor alto a costa de un secado no homogéneo o viceversa.
- De lo anterior se determina que la prueba 5 logra este compromiso al obtener una diferencia del 4% entre la humedad inicial y final del aire de secado; un tiempo adecuado de secado para éste volumen de arroz (335 min) y un factor de utilización de calor que no baja del 40% en las últimas instancias del secado.

- Se encontró que el mecanismo que gobierna el transporte de masa dentro del arroz es por difusión de líquido, encontrando en este proyecto un valor del coeficiente de difusión de $2.39 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{h}$ que se encuentra cercana a los rangos de difusión dentro de sólidos de $10^{-9} - 10^{-10} \text{ m}^2/\text{h}$ (Ref. 6).
- Las velocidades de aire usadas son muy bajas para espesores de cama de 20 cm o más.
- El desarrollo teórico usado nos trajo buenos resultados, ya que la ayuda de estos se pueden encontrar los coeficientes de calor y de transferencia de masa y el coeficiente de difusión de líquido dentro del sólido.

A P E N D I C E S

A P E N D I C E A

TABLAS DE DATOS Y RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES
DE SECADO DE ARROZ EN CASCARA

APENDICE A.1
 TABLA DE DATOS
 PRUEBA #1



BIBLIOTECA

HORA DE INICIO: 11H35
 FLUJO DE AIRE: 0.6303 metros cúbicos/min

ALTURA DE LA CAMA DE ARROZ: 10 cm
 PRESION ESTATICA DE LA CAMA: 0.26 cm de agua

TIEMPO: (min)	PESO (gr)	TEMPERATURA EN LA CAMA DE ARROZ						AMBIENTE			AIRE DE SALIDA		
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	TEMP. BULBO	TEMP. BULBO	HR	TEMP. BULBO	TEMP. BULBO	HR
		°C	°C	°C	°C	°C	°C	HUMEDO	SECO	(%)	HUMEDO	SECO	(%)
		°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	(%)	°C	°C	(%)
0	134.2												
10	132.8	29	29	29	28	41	49	23.3	27.8	70	26.7	28.3	89
20	131.4	29	29	31	32	46	50				26.7	28.9	85
30	130.4	30	29	35	38	46	50				26.7	28.9	72
40	129.2	33	31	36	41	47	50						
50	127.9	35	33	38	43	48	51				27.8	35.6	56
60	127.7	37	36	40	44	48	50						
70	126.8	38	38	41	44	49	51				27.8	37.2	50
80	126.0	40	39	41	45	49	51				28.3	39.4	44
90	125.6	39	39	42	45	49	50						
100	124.2	40	40	42	45	49	50	24.4	30.6	62	28.9	40.6	42
110	124.0	41	41	43	46	50	51						
120	123.5	42	42	43	46	50	51				28.9	41.7	39
130	122.8	42	43	44	47	50	51						
140	122.7	42	43	45	47	50	51						
155	121.5	41	43	46	48	50	51				30.0	43.3	39
170	121.0	44	44	46	48	50	51	24.4	31.1	59			
185	120.3	44	45	47	48	51	52						
200	119.5	45	46	48	49	51	51						
215	119.3	45	47	48	50	51	51						
235	119.2	45	47	49	50	51	52						
265	118.2	44	48	50	51	51	51	26.1	30.6	72			
295	117.8	44	48	50	51	51	51						
325	116.9	48	49	50	51	52	52						



PRUEBA #2

BIBLIOTECA

HORA DE INICIO: 8H20
 FLUJO DE AIRE: 0.6159 metros cúbicos/min

ALTURA DE LA CAMA DE ARROZ: 20 cm
 PRESION ESTATICA DE LA CAMA: 0.62 cm de agua

TIEMPO (min)	PESO (gr)	TEMPERATURA EN LA CAMA DE ARROZ						AMBIENTE		HR (%)	AIRE DE SALIDA		HR (%)
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	TEMP. BULBO HUMEDO	TEMP. BULBO SECO		TEMP. BULBO HUMEDO	TEMP. BULBO SECO	
		°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C		°C	°C	
0	255.7							21.11	23.33	83			
10	253.1	25	27	26	26	36	45				24.44	25.56	92
15	252.5												
20	252.1	25	26	27	29	43	47				24.72	26.11	90
25	251.0												
30	250.0	26	27	31	36	44	46						
35	248.8										25	26.11	92
40	247.4	26	27	34	38	45	47						
45	247.3												
50	246.3	26	28	37	40	45	48				25.56	26.67	92
55	245.6												
60	244.6	26	29	38	41	46	48						
65	244.2												
70	243.8	27	32	39	42	46	48				25.56	27.22	88
75	243.5												
80	242.4	28	34	41	42	46	48						
85	241.9												
90	241.2	30	36	41	43	46	47						
95	240.6												
100	239.8	31	37	41	43	47	48	21.67	25.56	72	25.56	27.78	85
105	239.5												
110	238.5	33	38	43	44	47	48						
115	238.1												
120	237.3	33	38	43	44	48	48				26.11	28.89	81
125	237.0												
130	236.4	34	39	43	44	47	47						
135	236.1												
140	235.6	35	39	43	44	47	47						
145	235.1										26.11	31.67	65
150	234.5	35	40	44	45	48	47						
155	234.3												

SIGUE



PRUEBA #2

HORA DE INICIO: 8H20

FLUJO DE AIRE: 0.6159 metros cúbicos/min

ALTURA DE LA CAMA DE ARROZ: 20 cm

PRESION ESTATICA DE LA CAMA: 0.62 cm de agua

BIBLIOTECA

[illegible]



BIBLIOTECA

PRUEBA #3

HORA DE INICIO: 11H55

FLUJO DE AIRE: 0.3124 metros cúbicos/min

ALTURA DE LA CAMA DE ARROZ: 10 cm

PRESION ESTATICA DE LA CAMA: 0.08 cm de agua

TIEMPO (min)	PESO (gr)	TEMPERATURA EN LA CAMA DE ARROZ						AMBIENTE		HR (%)	AIRE DE SALIDA		HR (%)
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	TEMP. BULBO HUMEDO	TEMP. BULBO SECO		TEMP. BULBO HUMEDO	TEMP. BULBO SECO	
		°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C		°C	°C	
0	130.6												
5	129.6	27	26	25	25	27	39	23.89	26.11	84			
10	129.2										25.56	26.67	92
15	129.0	27	26	26	25	30	40						
20	128.9												
30	128.2	28	27	27	27	37	41				25.56	27.78	84
40	127.2												
50	126.7	30	28	29	31	39	42						
60	126.3												
70	125.6	29	28	27	34	39	42				26.11	26.67	96
80	125.1							23.33	27.78	70			
95	124.4	31	31	29	36	40	42						
110	124.2												
125	123.6	33	33	32	37	41	43				26.67	33.33	60
140	122.7												
155	122.3	34	35	34	39	42	43						
170	121.8												
185	121.5	35	36	36	40	42	43				27.22	35.00	56
200	121.0												
215	120.5	35	36	37	40	43	43						
230	120.4												
245	119.6	36	38	38	41	43	43				27.22	36.11	52
260	119.5												
275	119.3	36	38	38	41	43	43						
305	118.7	35	38	38	41	43	43	25.00	26.67	88			
335	118.5	35	38	39	42	43	43						
365	118.3	35	38	39	42	43	43				27.22	36.11	52
395	117.5	34	38	39	42	42	41	24.44	25.00	96			
425	117.5	35	38	39	42	43	42						
455	117.4	34	37	39	42	42	41						



BIBLIOTECA

PRUEBA #4

HORA DE INICIO: 1H45

FLUJO DE AIRE: 0.5986 metros cúbicos/min

ALTURA DE LA CAMA DE ARROZ: 10 cm

PRESION ESTATICA DE LA CAMA: 0.2 cm de agua

TIEMPO (min)	PESO (gr)	TEMPERATURA EN LA CAMA DE ARROZ						AMBIENTE		HR (%)	AIRE DE SALIDA		HR (%)
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	TEMP. BULBO HUMEDO	TEMP. BULBO SECO		TEMP. BULBO HUMEDO	TEMP. BULBO SECO	
		°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C		°C	°C	
0	133.3												
5	133.1	29	28	27	26	28	40	27.78	32.22	72	27.22	28.89	88
10	132.0												
15	131.4	29	29	27	26	33	43						
20	130.7												
25	130.5	29	29	27	27	39	43						
30	130.3												
35	129.1	29	30	27	29	41	43				27.22	30.00	82
40	128.8												
45	128.3	32	32	28	34	42	43						
50	128.0												
55	127.5	33	33	29	36	42	43						
60	126.8												
65	126.8	35	34	31	37	42	43				28.30	36.11	57
70	126.4							25.55	33.33	54			
75	125.9	37	37	34	39	43	44						
80	126.2												
85	125.2	37	38	36	40	44	44						
90	125.0												
95	124.9	38	39	36	40	44	44				27.78	37.22	50
100	124.1												
105	124.1	38	39	37	40	44	43						
110	124.1												
125	123.1	39	40	38	41	44	43						
140	122.8												
150	122.0	40	40	40	42	45	43						
165	121.8												
180	121.2	40	41	40	42	45	44				28.89	40.00	45
190	120.8												
205	120.5	40	41	41	43	45	44						
215	120.1												

-SIGUE-



PRUEBA #4

HORA DE INICIO: 1445

FLUJO DE AIRE: 0.5986 metros cúbicos/min

ALTURA DE LA CAMA DE ARROZ: 10 cm

PRESION ESTATICA DE LA CAMA: 0.2 cm de agua

[illegible]



BIBLIOTECA

PRUEBA #5

HORA DE INICIO: 8H40

ALTURA DE LA CAMA DE ARROZ: 15 cm

FLUJO DE AIRE: 0.6080 metros cúbicos/min

PRESION ESTATICA DE LA CAMA: 0.45 cm de agua

TIEMPO (min)	PESO (gr)	TEMPERATURA EN LA CAMA DE ARROZ						AMBIENTE			AIRE DE SALIDA		
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	TEMP. BULBO HUMEDO	TEMP. BULBO SECO	HR	TEMP. BULBO HUMEDO	TEMP. BULBO SECO	HR
		°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	(%)	°C	°C	(%)
0	220.50							23.33	28.89	64			
5	219.30	29	27	25	25	26	40				26.11	27.78	88
10	218.10												
15	217.30	28	27	25	26	35	43						
20	216.50												
25	215.50	28	27	26	28	40	43				26.11	28.33	84
30	214.90												
35	214.00	28	27	26	31	41	42						
40	213.40												
45	212.60	28	27	28	34	41	43				26.11	28.33	85
50	211.90												
55	211.60	29	28	30	36	41	42						
60	210.70												
65	210.10	30	28	33	37	42	43				26.11	28.89	81
70	209.50												
75	208.90	30	28	34	38	42	43						
80	208.40							23.33	29.44	60			
85	207.80	32	30	36	39	43	44						
90	207.30												
95	206.80	33	30	36	39	43	44				26.67	32.78	64
100	206.10												
105	205.70	34	31	37	39	43	43						
110	205.30												
115	204.80	35	32	37	40	43	43				26.67	34.44	56
120	204.70												
125	204.00	35	33	38	40	42	42						
130	203.60												
135	203.00	36	34	38	40	42	43				26.67	35.00	53
140	202.70							23.89	30.00	62			
145	202.30	35	33	38	40	42	43						
150	201.90												

SIGUE



PRUEBA #5

HORA DE INICIO: 8H40

ALTURA DE LA CAMA DE ARROZ: 15 cm

FLUJO DE AIRE: 0.6080 metros cúbicos/min

PRESION ESTATICA DE LA CAMA: 0.45 cm de agua

TIEMPO (min)	PESO (gr)	TEMPERATURA EN LA CAMA DE ARROZ						AMBIENTE		HR (%)	AIRE DE SALIDA		HR (%)
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	TEMP. BULBO HUMEDO	TEMP. BULBO SECO		TEMP. BULBO HUMEDO	TEMP. BULBO SECO	
		°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C		°C	°C	
155	201.60	36	34	38	40	43	43				26.67	35.56	50
160	201.00												
165	200.30	36	34	39	41	43	43						
170	200.30												
175	199.70	37	35	39	41	44	44				26.67	36.11	48
180	199.40												
185	199.00	37	35	39	41	44	44						
190	198.70												
195	198.30	38	36	40	42	44	44				27.78	37.78	48
200	198.10							24.44	31.67	56			
205	197.80	39	37	41	43	44	45						
210	197.50												
215	196.90	39	37	41	43	45	45				27.78	38.89	44
220	197.00												
225	196.70	39	38	42	43	45	46						
230	196.40												
235	196.10	39	38	42	44	46	46				27.78	39.44	42
240	195.90												
245	195.60	39	38	43	44	46	46						
250	195.30												
255	195.00	40	39	43	45	46	46				27.78	39.44	42
260	194.70												
265	194.60	41	40	44	45	46	46						
270	194.40												
275	194.10	40	40	44	45	47	46				27.78	39.44	42
280	193.80												
285	193.50	41	41	44	45	46	46						
290	193.30												
295	193.20	41	41	44	45	46	47						
300	192.80												
305	192.60	42	41	44	45	47	47				27.78	41.11	36

SIGUE



PRUEBA #6

HORA DE INICIO: 8H15

FLUJO DE AIRE: 0.5853 metros cúbicos/min

ALTURA DE LA CAMA DE ARROZ: 20 cm

PRESION ESTATICA DE LA CAMA: 0.51 cm de agua

BIBLIOTECA

TIEMPO: (min)	PESO (gr)	TEMPERATURA EN LA CAMA DE ARROZ						AMBIENTE		HR (%)	AIRE DE SALIDA		HR (%)
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	TEMP. BULBO HUMEDO	TEMP. BULBO SECO		TEMP. BULBO HUMEDO	TEMP. BULBO SECO	
		°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C		°C	°C	
0	287.5							21.11	24.44	75			
5	286.6	23	23	23	23	25	35				23.33	25.00	88
10	286.2												
15	285.4	23	23	23	23	29	37						
20	284.4												
25	283.7	23	23	24	24	34	38				23.89	25.56	88
30	283.0												
35	282.2	24	24	24	26	36	39						
40	281.6												
45	280.8	24	24	26	29	37	39	21.67	23.33	87	24.44	25.56	92
50	280.2												
55	279.5	24	24	27	31	37	39						
60	278.8												
65	278.2	24	25	29	33	38	39				24.44	25.56	92
70	277.6												
75	277.0	24	25	30	33	38	40						
80	276.4												
85	275.8	24	25	31	34	38	40				25.56	26.67	92
90	275.2												
95	274.6	25	25	31	34	38	40						
100	274.1												
105	273.5	25	26	32	34	38	40	22.78	26.67	73	25.56	27.22	88
110	272.9												
115	272.3	27	28	33	35	39	40						
120	271.8												
125	271.3	28	29	34	36	39	40				25.56	28.33	81
130	270.9												
135	270.4	28	30	34	36	39	40						
140	269.8												
145	269.3	28	30	34	36	40	41				25.56	29.44	74
150	268.9												

SIGUE



BIBLIOTECA

PRUEBA #6

HORA DE INICIO: 8H15

FLUJO DE AIRE: 0.5853 metros cúbicos/min

ALTURA DE LA CAMA DE ARROZ: 20 cm

PRESION ESTATICA DE LA CAMA: 0.51 cm de agua

TIEMPO (min)	PESO (gr)	TEMPERATURA EN LA CAMA DE ARROZ						AMBIENTE		HR (%)	AIRE DE SALIDA		HR (%)
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	TEMP. BULBO HUMEDO	TEMP. BULBO SECO		TEMP. BULBO HUMEDO	TEMP. BULBO SECO	
		°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C		°C	°C	
155	268.4	29	31	35	37	40	40						
160	268.0												
165	267.6	30	32	36	37	40	41	23.06	28.61	64	25.56	27.78	84
170	267.2												
175	266.7	31	32	36	38	41	41						
180	266.3												
185	266.0	31	33	36	38	41	41						
190	265.4												
195	265.1	32	33	37	38	41	41				25.00	31.67	60
200	264.7												
205	264.2	32	34	37	39	41	42						
210	263.9												
215	263.5	33	34	37	39	42	43						
220	263.1												
225	262.8	33	34	38	40	42	42	23.89	30.56	58	26.11	33.89	55
230	262.5												
235	262.0	34	35	38	40	42	42						
240	261.7												
245	261.2	35	36	39	40	42	42						
250	261.1												
255	260.5	35	36	39	40	43	42				26.67	35.00	53
265	259.9												
275	259.3	36	37	40	41	43	43						
285	258.8												
295	258.0	37	37	40	42	43	44				26.67	36.11	48
305	257.5												
315	257.2	37	38	40	42	43	44	24.44	31.67	56			
325	256.5												
335	255.7	38	39	42	43	44	45						
345	255.3							25.00	32.50	56	26.67	37.22	44
355	254.6	39	40	42	43	44	44						

-SIGUE-



PRUEBA #6

HORA DE INICIO: 8H15

FLUJO DE AIRE: 0.5853 metros cúbicos/min

ALTURA DE LA CAMA DE ARROZ: 20 cm

PRESION ESTATICA DE LA CAMA: 0.51 cm de agua

[illegible]

APENDICE A.2
TABLA DE RESULTADOS
PRUEBA #1



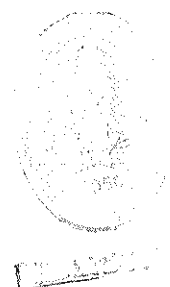
TIEMPO	HUMEDAD	HUMEDAD	VELOCIDAD	HUMEDAD
(min)	B.H (%)	B.S (%)	DE SECADO (g/h)	MEDIA (%)
0	24.30	32.10		
10	23.50	30.72	8.40	23.90
20	22.69	29.34	8.40	23.09
30	22.09	28.36	7.60	22.39
40	21.37	27.18	7.50	21.73
50	20.57	25.90	7.56	20.97
60	20.45	25.70	6.50	20.51
70	19.88	24.82	6.34	20.16
80	19.37	24.03	6.15	19.63
90	19.12	23.63	5.73	19.24
100	18.20	22.26	6.00	18.66
110	18.07	22.06	5.56	18.14
120	17.74	21.57	5.35	17.91
130	17.27	20.88	5.26	17.51
140	17.20	20.78	4.93	17.24
155	16.39	19.60	4.92	16.80
170	16.04	19.11	4.66	16.21
185	15.55	18.42	4.51	15.80
200	14.99	17.63	4.41	15.27
215	14.84	17.43	4.16	14.92
235	14.77	17.33	3.83	14.81
265	14.05	16.35	3.62	14.41
295	13.76	15.96	3.34	13.91
325	13.10	15.07	3.19	13.43

PRUEBA #2

TIEMPO (min)	HUMEDAD B.H (%)	HUMEDAD B.S (%)	VELOCIDAD DE SECADO (g/h)	HUMEDAD MEDIA (%)
0	25.00	33.33		
10	24.23	31.97	15.60	24.61
15	24.05	31.66	12.80	24.14
20	23.93	31.45	10.80	23.99
25	23.59	30.88	11.28	23.76
30	23.29	30.36	11.40	23.44
35	22.92	29.73	11.83	23.10
40	22.48	29.00	12.45	22.70
45	22.45	28.95	11.20	22.47
50	22.14	28.43	11.28	22.29
55	21.91	28.06	11.02	22.02
60	21.59	27.54	11.10	21.75
65	21.47	27.33	10.62	21.53
70	21.34	27.12	10.20	21.40
75	21.24	26.97	9.76	21.29
80	20.88	26.39	9.97	21.06
85	20.72	26.13	9.74	20.80
90	20.49	25.77	9.67	20.60
95	20.29	25.46	9.54	20.39
100	20.03	25.04	9.54	20.16
105	19.92	24.88	9.26	19.97
110	19.59	24.36	9.38	19.76
115	19.45	24.15	9.18	19.52
120	19.18	23.74	9.20	19.32
125	19.08	23.58	8.98	19.13
130	18.87	23.27	8.91	18.98
135	18.77	23.11	8.71	18.82
140	18.60	22.85	8.61	18.69
145	18.43	22.59	8.52	18.51
150	18.22	22.28	8.48	18.32
155	18.15	22.17	8.28	18.18
160	17.90	21.81	8.29	18.03

SIGUE---

PRUEBA #2



TIEMPO	HUMEDAD	HUMEDAD	VELOCIDAD	HUMEDAD
(min)	B.H (%)	B.S (%)	DE SECADO (g/h)	MEDIA (%)
165	17.80	21.65	8.15	17.85
170	17.62	21.39	8.08	17.71
175	17.58	21.34	7.89	17.60
180	17.19	20.76	8.03	17.39
185	17.19	20.76	7.82	17.19
190	17.09	20.61	7.71	17.14
195	16.87	20.29	7.69	16.98
200	16.76	20.14	7.59	16.82
210	16.44	19.67	7.49	16.60
220	16.25	19.41	7.28	16.34
230	16.00	19.04	7.15	16.12
240	15.85	18.83	6.95	15.92
250	15.70	18.63	6.77	15.78
260	15.70	18.63	6.51	15.70
275	14.95	17.58	6.59	15.33
290	14.88	17.48	6.29	14.92
310	14.42	16.85	6.12	14.65
330	14.12	16.44	5.89	14.27
360	13.77	15.97	5.55	13.94
390	13.46	15.55	5.25	13.61
420	13.18	15.18	4.97	13.32

PRUEBA #3



BIBLIOTECA

TIEMPO (min)	HUMEDAD B.H (%)	HUMEDAD B.S (%)	VELOCIDAD DE SECADO (g/h)	HUMEDAD MEDIA (%)
0	24.10	31.75		
5	23.51	30.74	12.00	23.81
10	23.27	30.33	8.40	23.39
15	23.16	30.13	6.40	23.21
20	23.10	30.03	5.10	23.13
30	22.68	29.33	4.80	22.89
40	22.07	28.32	5.10	22.37
50	21.76	27.81	4.68	21.91
60	21.51	27.41	4.30	21.64
70	21.07	26.70	4.29	21.29
80	20.76	26.20	4.13	20.92
95	20.31	25.49	3.92	20.54
110	20.19	25.29	3.49	20.25
125	19.80	24.68	3.36	19.99
140	19.21	23.78	3.39	19.50
155	18.95	23.37	3.21	19.08
170	18.61	22.87	3.11	18.78
185	18.41	22.57	2.95	18.51
200	18.07	22.06	2.88	18.24
215	17.73	21.56	2.82	17.90
230	17.67	21.46	2.66	17.70
245	17.12	20.65	2.69	17.39
260	17.05	20.55	2.56	17.08
275	16.91	20.35	2.47	16.98
305	16.49	19.74	2.34	16.70
335	16.35	19.54	2.17	16.42
365	16.20	19.34	2.02	16.28
395	15.63	18.53	1.99	15.92
425	15.63	18.53	1.85	15.63
455	15.56	18.43	1.74	15.60



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MÉXICO

PRUEBA #4

TIEMPO (min)	HUMEDAD B.H (%)	HUMEDAD B.S (%)	VELOCIDAD DE SECADO (g/h)	HUMEDAD MEDIA (%)
0	25.30	33.87		
5	25.18	33.66	2.40	25.24
10	24.56	32.56	7.80	24.87
15	24.22	31.95	7.60	24.39
20	23.81	31.25	7.80	24.01
25	23.69	31.05	6.72	23.75
30	23.58	30.85	6.00	23.63
35	22.87	29.64	7.20	23.22
40	22.69	29.34	6.75	22.78
45	22.39	28.84	6.67	22.54
50	22.20	28.54	6.36	22.29
55	21.90	28.04	6.33	22.05
60	21.47	27.33	6.50	21.68
65	21.47	27.33	6.00	21.47
70	21.22	26.93	5.91	21.34
75	20.91	26.43	5.92	21.06
80	21.09	26.73	5.33	21.00
85	20.46	25.73	5.72	20.78
90	20.34	25.53	5.53	20.40
95	20.27	25.43	5.31	20.30
100	19.76	24.62	5.52	20.02
105	19.76	24.62	5.26	19.76
110	19.76	24.62	5.02	19.76
125	19.11	23.62	4.90	19.43
140	18.91	23.32	4.50	19.01
150	18.38	22.51	4.52	18.64
165	18.24	22.31	4.18	18.31
180	17.84	21.71	4.03	18.04
190	17.57	21.31	3.95	17.70
205	17.36	21.01	3.75	17.46
215	17.09	20.61	3.68	17.22

SIGUE--

PRUEBA #4



BIBLIOTECA

TIEMPO (min)	HUMEDAD B.H (%)	HUMEDAD B.S (%)	VELOCIDAD DE SECADO (g/h)	HUMEDAD MEDIA (%)
230	16.53	19.80	3.65	16.81
240	16.46	19.70	3.53	16.49
260	16.25	19.40	3.32	16.35
270	16.04	19.10	3.27	16.14
280	15.97	19.00	3.17	16.00
290	15.75	18.70	3.12	15.86
300	15.90	18.90	2.98	15.82
315	15.75	18.70	2.88	15.82
330	15.61	18.50	2.78	15.68
345	15.32	18.10	2.73	15.47
365	15.18	17.90	2.61	15.25
380	15.11	17.79	2.53	15.14



BIBLIOTECA

PRUEBA #5

TIEMPO (min)	HUMEDAD B.H (%)	HUMEDAD B.S (%)	VELOCIDAD DE SECADO (g/h)	HUMEDAD MEDIA (%)
0	25.10	33.51		
5	24.69	32.79	14.40	24.90
10	24.28	32.06	14.40	24.49
15	24.00	31.58	12.80	24.14
20	23.72	31.09	12.00	23.86
25	23.36	30.49	12.00	23.54
30	23.15	30.12	11.20	23.26
35	22.83	29.58	11.14	22.99
40	22.61	29.22	10.65	22.72
45	22.32	28.73	10.53	22.46
50	22.06	28.31	10.32	22.19
55	21.95	28.13	9.71	22.01
60	21.62	27.58	9.80	21.79
65	21.39	27.22	9.60	21.51
70	21.17	26.85	9.43	21.28
75	20.94	26.49	9.28	21.06
80	20.75	26.19	9.07	20.85
85	20.52	25.83	8.96	20.64
90	20.33	25.52	8.80	20.43
95	20.14	25.22	8.65	20.24
100	19.87	24.80	8.64	20.00
105	19.71	24.55	8.46	19.79
110	19.56	24.31	8.29	19.63
115	19.36	24.01	8.19	19.46
120	19.32	23.95	7.90	19.34
125	19.04	23.52	7.92	19.18
130	18.89	23.28	7.80	18.96
135	18.65	22.92	7.78	18.77
140	18.52	22.74	7.63	18.59
145	18.36	22.49	7.53	18.44
150	18.20	22.25	7.44	18.28
155	18.08	22.07	7.32	18.14

SIGUE---



BIBLIOTECA

PRUEBA #5

TIEMPO (min)	HUMEDAD B.H (%)	HUMEDAD B.S (%)	VELOCIDAD DE SECADO (g/h)	HUMEDAD MEDIA (%)
160	17.84	21.71	7.31	18.02
165	17.55	21.28	7.35	17.69
170	17.55	21.28	7.13	17.55
175	17.30	20.92	7.13	17.42
180	17.18	20.74	7.03	17.24
185	17.01	20.50	6.97	17.09
190	16.88	20.31	6.88	16.95
195	16.72	20.07	6.83	16.80
200	16.63	19.95	6.72	16.68
205	16.51	19.77	6.64	16.57
210	16.38	19.59	6.57	16.44
215	16.12	19.22	6.59	16.25
220	16.17	19.29	6.41	16.15
225	16.04	19.10	6.35	16.10
230	15.91	18.92	6.29	15.98
235	15.78	18.74	6.23	15.85
240	15.70	18.62	6.15	15.74
245	15.57	18.44	6.10	15.63
250	15.44	18.26	6.05	15.50
255	15.31	18.07	6.00	15.37
260	15.18	17.89	5.95	15.24
265	15.13	17.83	5.86	15.16
270	15.05	17.71	5.80	15.09
275	14.91	17.53	5.76	14.98
280	14.78	17.35	5.72	14.85
285	14.65	17.17	5.68	14.72
290	14.56	17.05	5.63	14.61
295	14.52	16.98	5.55	14.54
300	14.34	16.74	5.54	14.43
305	14.25	16.62	5.49	14.30
310	14.16	16.50	5.44	14.21

-----SIGUE-----

PRUEBA #5



TIEMPO (min)	HUMEDAD B.H (%)	HUMEDAD B.S (%)	VELOCIDAD DE SECADO (g/h)	HUMEDAD MEDIA (%)
315	14.12	16.44	5.37	14.14
320	14.03	16.32	5.33	14.07
325	13.89	16.14	5.30	13.96
330	13.85	16.08	5.24	13.87
335	13.80	16.02	5.18	13.83
345	13.62	15.77	5.10	13.71
360	13.35	15.41	4.98	13.49
375	13.22	15.23	4.83	13.28
390	13.03	14.99	4.71	13.12

PRUEBA #6



TIEMPO	HUMEDAD	HUMEDAD	VELOCIDAD	HUMEDAD
(min)	B.H	B.S	DE SECADO	MEDIA
(%)	(%)	(%)	(g/h)	(%)
0	25.70	34.59		
5	25.47	34.17	10.80	25.58
10	25.36	33.98	7.80	25.42
15	25.15	33.61	8.40	25.26
20	24.89	33.14	9.30	25.02
25	24.71	32.81	9.12	24.80
30	24.52	32.48	9.00	24.61
35	24.31	32.11	9.09	24.41
40	24.14	31.83	8.85	24.22
45	23.93	31.45	8.93	24.04
50	23.77	31.17	8.76	23.85
55	23.57	30.85	8.73	23.67
60	23.38	30.52	8.70	23.48
65	23.22	30.24	8.58	23.30
70	23.05	29.96	8.49	23.13
75	22.88	29.68	8.40	22.97
80	22.72	29.39	8.33	22.80
85	22.55	29.11	8.26	22.63
90	22.38	28.83	8.20	22.46
95	22.21	28.55	8.15	22.30
100	22.07	28.32	8.04	22.14
105	21.90	28.04	8.00	21.98
110	21.73	27.76	7.96	21.81
115	21.55	27.48	7.93	21.64
120	21.41	27.24	7.85	21.48
125	21.26	27.01	7.78	21.34
130	21.15	26.82	7.66	21.21
135	21.00	26.59	7.60	21.08
140	20.83	26.30	7.59	20.91
145	20.68	26.07	7.53	20.75
150	20.56	25.88	7.44	20.62

SIGUE---

PRUEBA #6



BIBLIOTECA

TIEMPO (min)	HUMEDAD B.H (%)	HUMEDAD B.S (%)	VELOCIDAD DE SECADO (g/h)	HUMEDAD MEDIA (%)
155	20.41	25.65	7.39	20.49
160	20.29	25.46	7.31	20.35
165	20.18	25.28	7.24	20.24
170	20.06	25.09	7.16	20.12
175	19.91	24.85	7.13	19.98
180	19.79	24.67	7.07	19.85
185	19.70	24.53	6.97	19.74
190	19.51	24.25	6.98	19.60
195	19.42	24.10	6.89	19.47
200	19.30	23.92	6.84	19.36
205	19.15	23.68	6.82	19.22
210	19.06	23.54	6.74	19.10
215	18.93	23.36	6.70	19.00
220	18.81	23.17	6.65	18.87
225	18.72	23.03	6.59	18.76
230	18.62	22.89	6.52	18.67
235	18.47	22.65	6.51	18.55
240	18.38	22.51	6.45	18.42
245	18.22	22.28	6.44	18.30
250	18.19	22.23	6.34	18.20
255	18.00	21.95	6.35	18.09
265	17.81	21.67	6.25	17.91
275	17.62	21.39	6.15	17.72
285	17.46	21.16	6.04	17.54
295	17.21	20.78	6.00	17.33
305	17.04	20.55	5.90	17.13
315	16.95	20.41	5.77	17.00
325	16.72	20.08	5.72	16.83
335	16.46	19.70	5.70	16.59
345	16.33	19.52	5.60	16.40
355	16.10	19.19	5.56	16.21

SIGUE---

PRUEBA #6



TIEMPO (min)	HUMEDAD B.H (%)	HUMEDAD B.S (%)	VELOCIDAD DE SECADO (g/h)	HUMEDAD MEDIA (%)
365	15.93	18.96	5.49	16.02
375	15.77	18.72	5.42	15.85
390	15.57	18.44	5.31	15.67
405	15.33	18.11	5.21	15.45
420	15.10	17.78	5.13	15.22
435	14.96	17.60	5.01	15.03
465	14.76	17.32	4.76	14.86
480	14.49	16.94	4.71	14.62
495	14.32	16.71	4.63	14.40
510	14.11	16.43	4.56	14.21
525	14.04	16.33	4.46	14.07
540	13.94	16.19	4.37	13.99
555	13.83	16.05	4.28	13.88
570	13.73	15.91	4.20	13.78
585	13.66	15.82	4.11	13.69
615	13.52	15.63	3.95	13.59

HUMEDAD DE EQUILIBRIO



BIBLIOTECA

PRUEBA #	X b.s %
1	13.3
2	14.6
3	17.0
4	16.0
5	12.6
6	13.6

FACTOR DE UTILIZACION DEL CALOR

PRUEBA #1	
TIEMPO (min)	HUF (%)
10	97.6
100	48.2
170	38.7
265	37.7

PRUEBA #2	
TIEMPO (min)	HUF (%)
10	89.7
100	90.1
190	73.1
275	56.7

PRUEBA #3	
TIEMPO (min)	HUF (%)
10	95.7
70	107.6
305	42.2
395	30.6

PRUEBA #4	
TIEMPO (min)	HUF (%)
5	169.9
70	71.3
315	24.8

PRUEBA #5	
TIEMPO (min)	HUF (%)
5	110.0
80	106.0
140	61.5
200	50.4
315	38.6
375	38.5

PRUEBA #6	
TIEMPO (min)	HUF (%)
5	94.7
45	85.7
105	95.9
165	100.0
225	70.9
315	63.4
345	59.0
420	37.5
525	56.0

CAPTACION DE AGUA EN EL TIEMPO

PRUEBA #1

TIEMPO (min)	HUMEDAD RELATIVA					
	HR1 (%)	HR2 (%)	HR3 (%)	HR4 (%)	HR5 (%)	HR6 (%)
10			100	100	39	23
20			85	77	28	20
30			62	52	28	20
50			53	36	25	19
60			40	25	20	15
80			34	24	17	14
100			30	24	17	15
170			20	19	16	15
265			25	24	24	24

PRUEBA #2

TIEMPO (min)	HUMEDAD RELATIVA					
	HR1 (%)	HR2 (%)	HR3 (%)	HR4 (%)	HR5 (%)	HR6 (%)
10				100	50	25
20			98	90	32	23
40		100	62	47	27	23
70	100	71	60	45	27	23
100	76	49	36	31	24	23
120	69	48	31	29	23	23
150	58	41	29	27	23	23
190	49	34	25	25	23	23
290	45	28	25	25	23	22

PRUEBA #3

[LATER]

TIEMPO (min)	HUMEDAD RELATIVA					
	HR1 (%)	HR2 (%)	HR3 (%)	HR4 (%)	HR5 (%)	HR6 (%)
10					100	41
30				100	49	37
80			70	60	40	32
125			70	46	35	30
185			50	44	32	30
305			52	41	36	36
395			48	38	38	38

PRUEBA #4

TIEMPO (min)	HUMEDAD RELATIVA					
	HR1 (%)	HR2 (%)	HR3 (%)	HR4 (%)	HR5 (%)	HR6 (%)
5					100	51
35				100	46	40
70			80	50	35	33
95			55	48	31	31
180			48	36	31	31
315			35	33	33	33



PRUEBA #5

BIBLIOTECA

TIEMPO (min)	HUMEDAD RELATIVA					
	HR1 (%)	HR2 (%)	HR3 (%)	HR4 (%)	HR5 (%)	HR6 (%)
5					98	38
25				95	42	29
45		98	90	58	33	29
65		91	64	46	32	28
95		80	50	40	29	27
115		68	47	42	28	28
135		60	45	44	33	30
155		60	42	36	30	30
175		62	42	35	29	29
195		53	44	34	29	29
215		50	38	32	27	27
235		49	35	30	25	25
255		45	33	28	25	25
275		45	31	28	25	25
305		25	21	20	18	18
335		24	19	19	19	19



PRUEBA #6

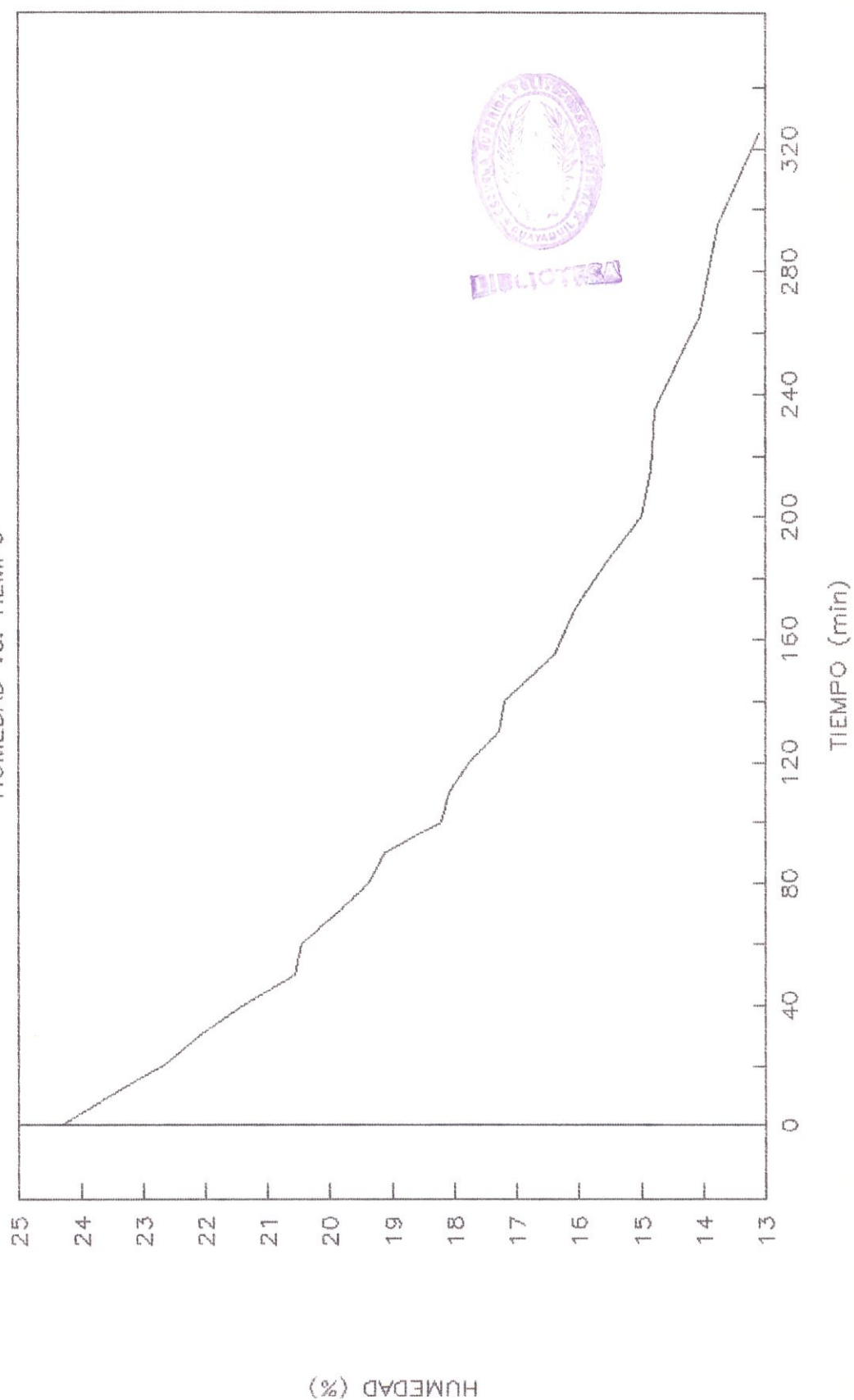
TIEMPO (min)	HUMEDAD RELATIVA					
	HR1 (%)	HR2 (%)	HR3 (%)	HR4 (%)	HR5 (%)	HR6 (%)
5					95	41
25				100	49	35
45			100	78	40	36
65		100	78	58	39	36
85		100	66	51	39	37
105	91	88	51	44	32	30
145	75	68	45	37	33	30
165	78	65	48	40	33	26
195	78	65	48	45	40	33
225	65	61	45	42	33	33
255	61	58	42	40	31	31
345	52	48	39	40	31	31
420	49	49	45	35	32	29
525	48	44	35	32	30	28

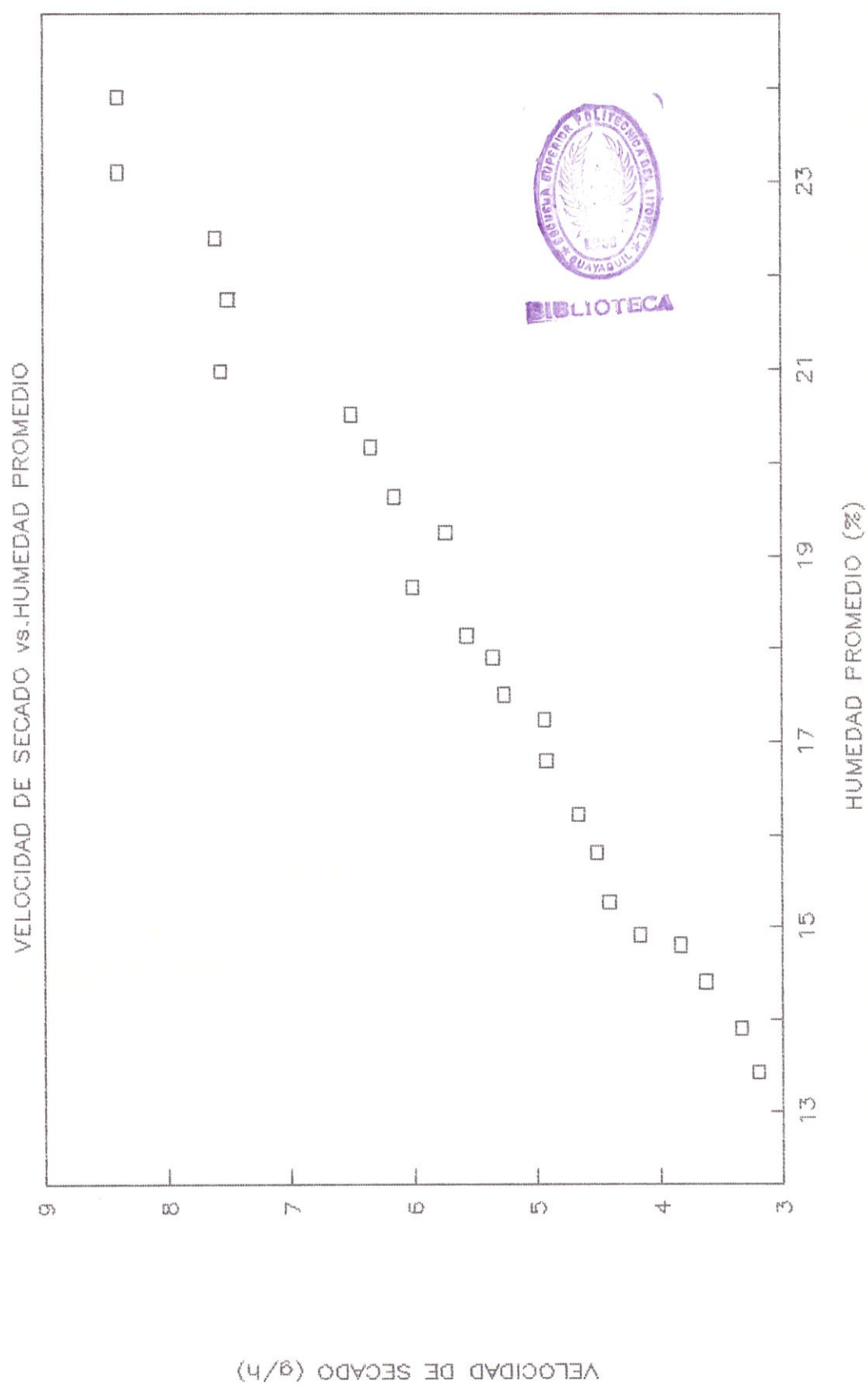
A P E N D I C E B

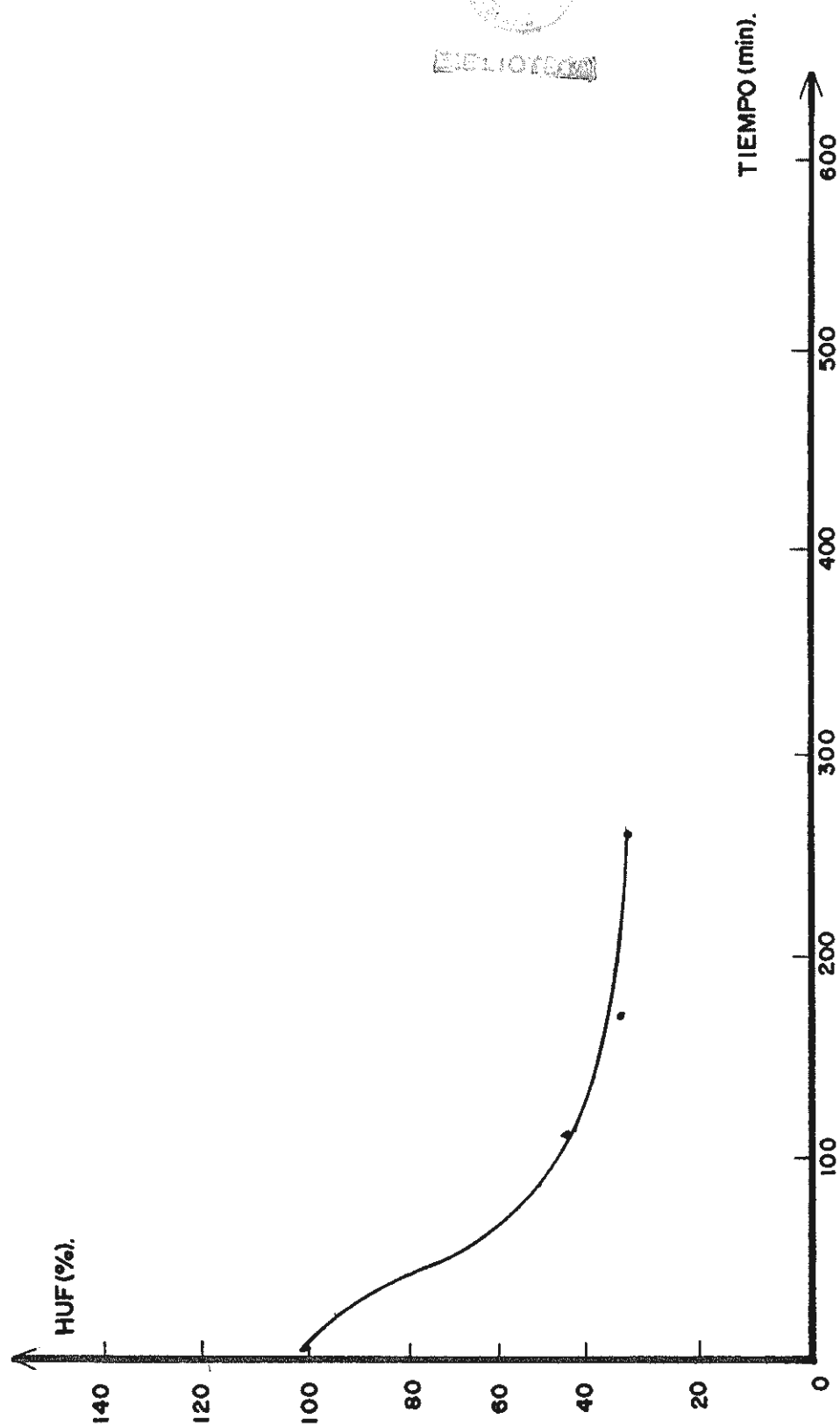
GRAFICOS DE LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

APENDICE B.1 — PRUEBA #1

HUMEDAD vs. TIEMPO





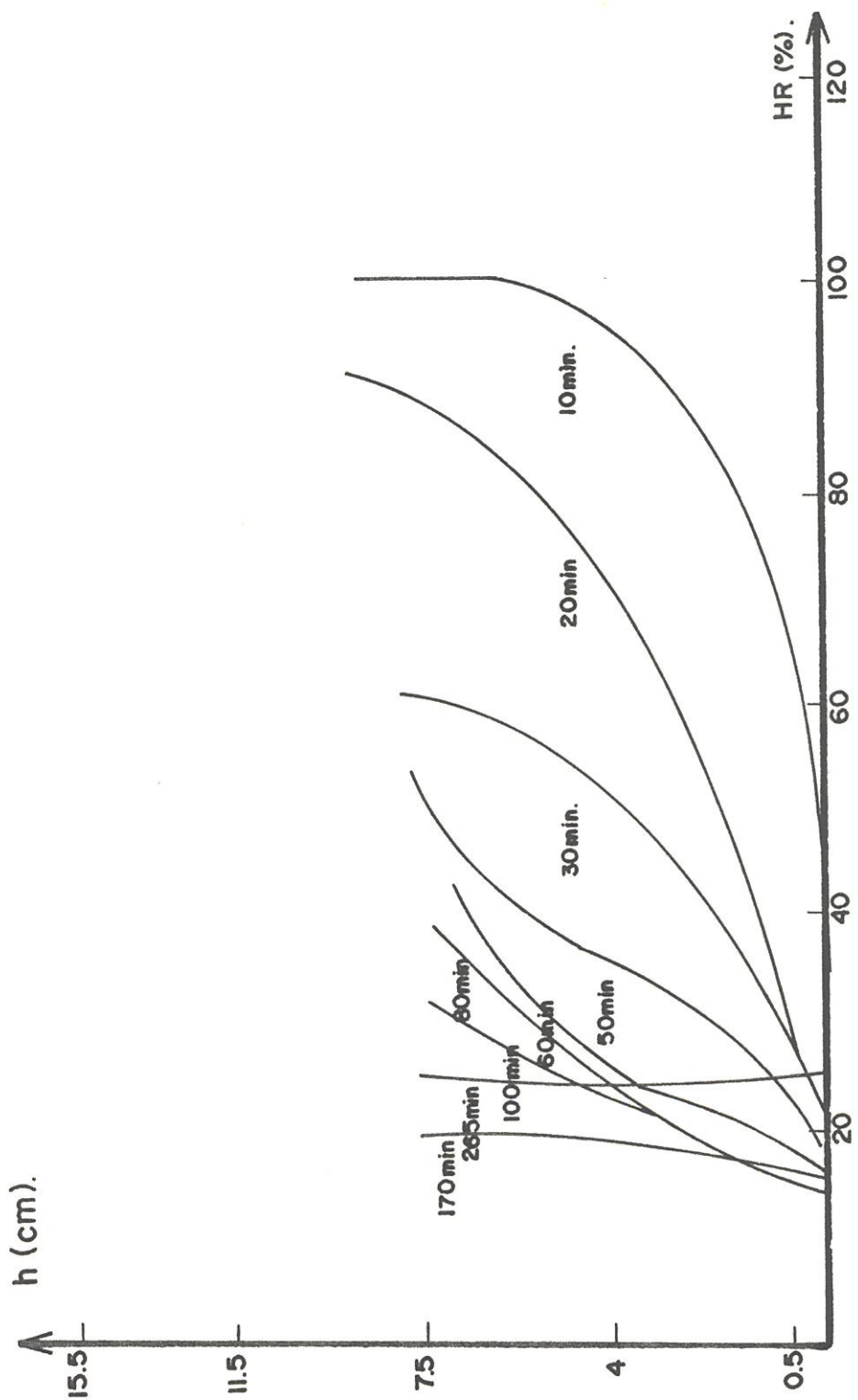


FACTOR DE UTILIZACION DE CALOR VS TIEMPO.





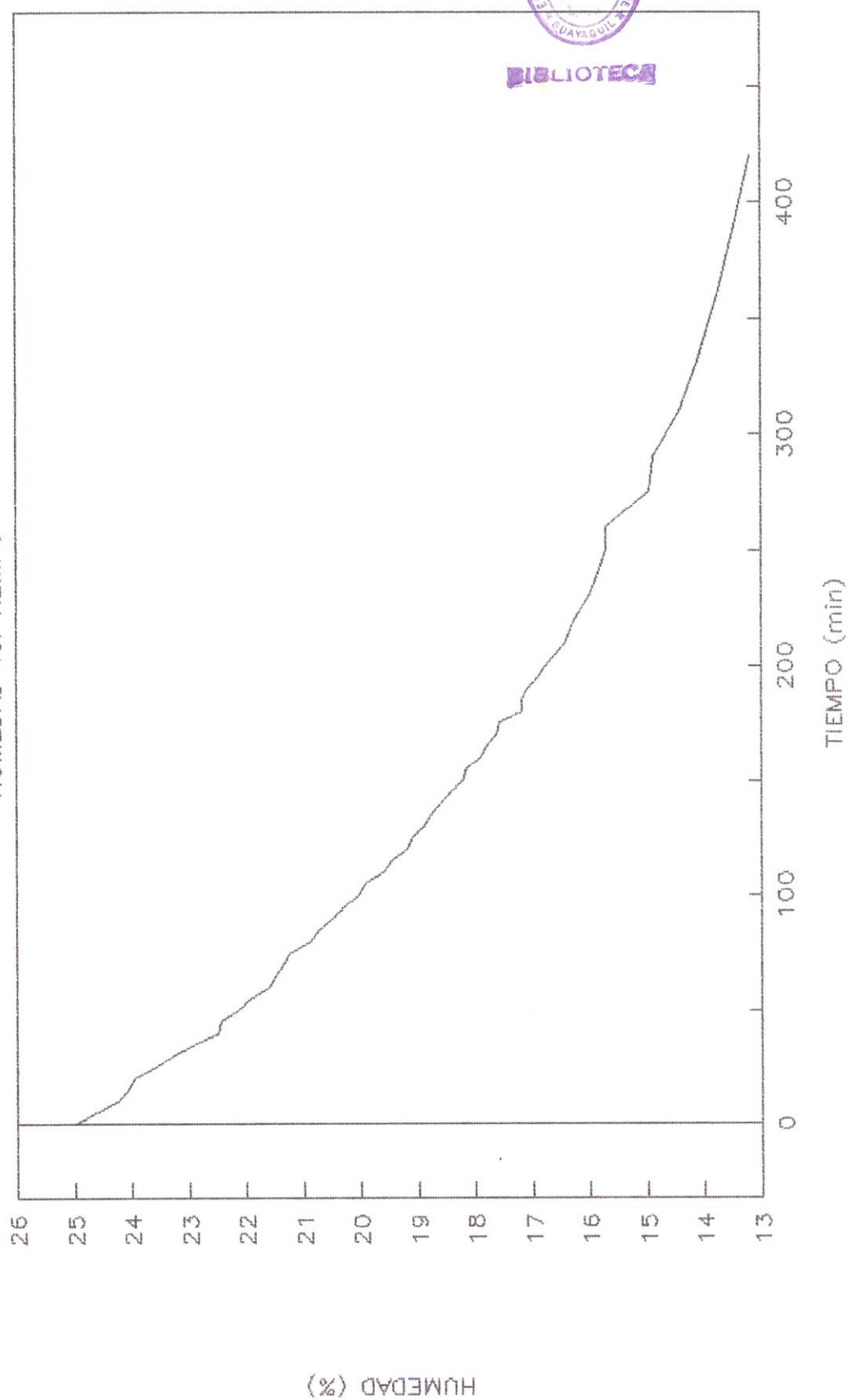
BIBLIOTECA



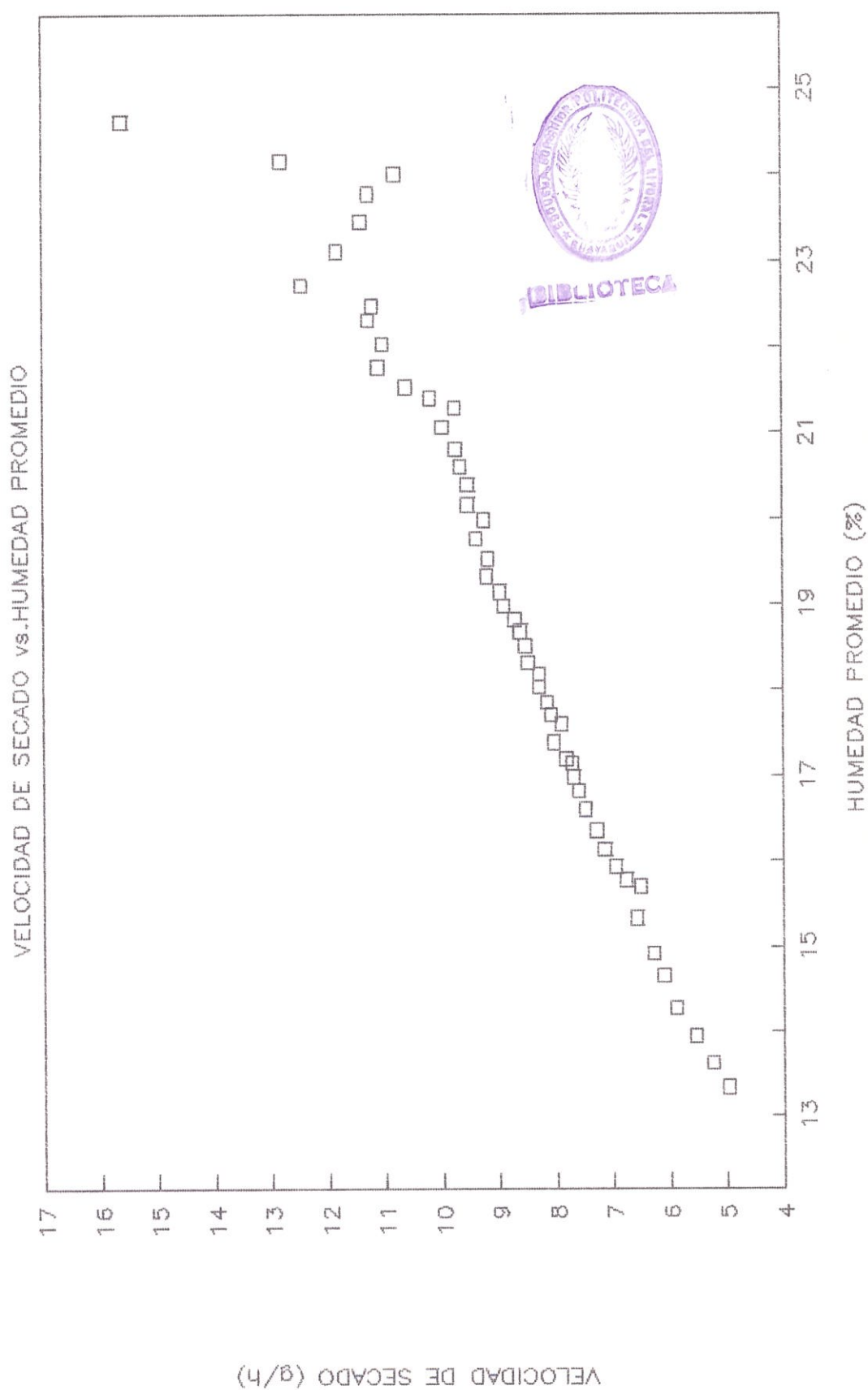
ALTURA DE CAMADA VS HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE DE SECADO.

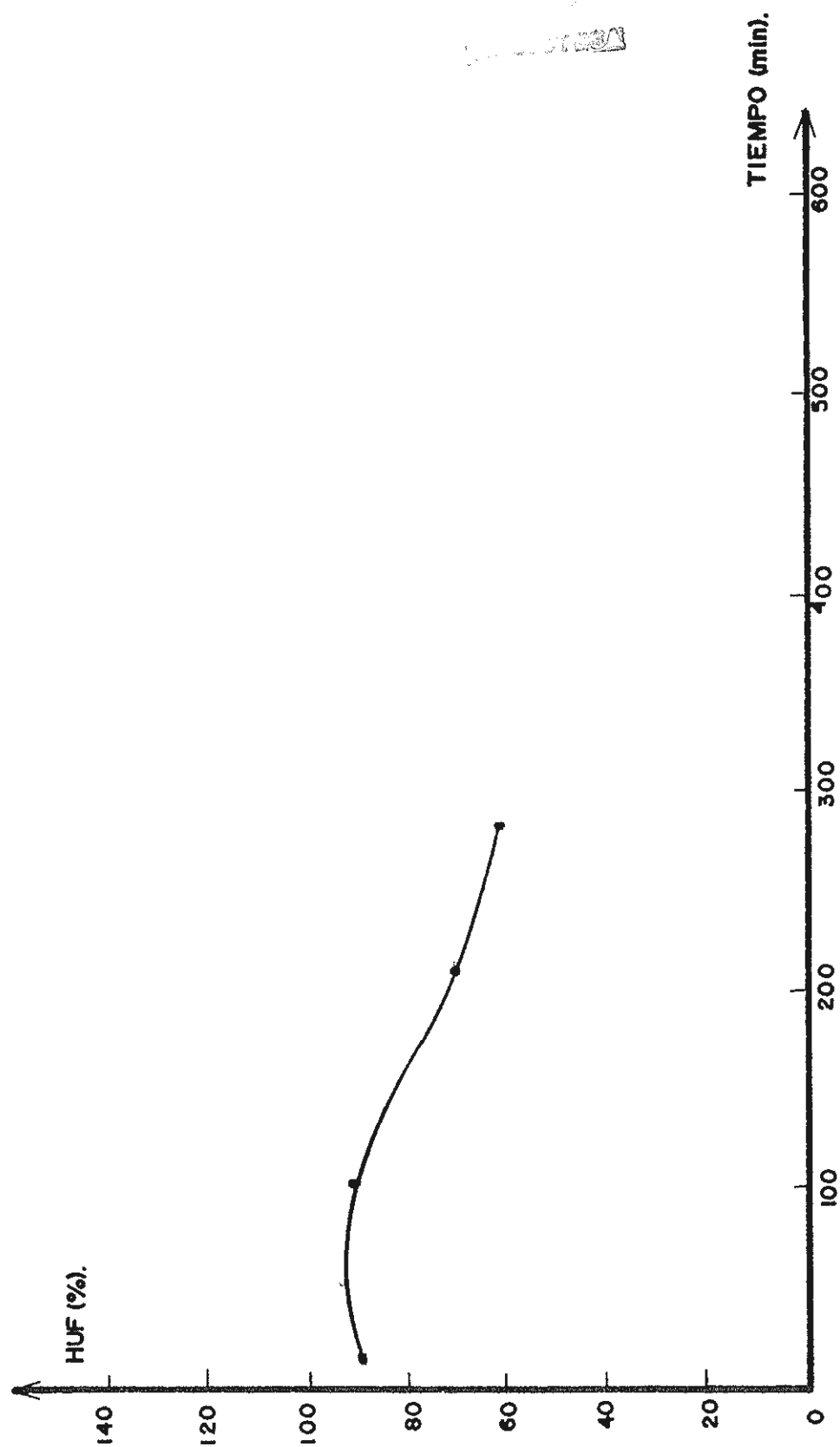
APENDICE B.2 — PRUEBA #2

HUMEDAD vs. TIEMPO



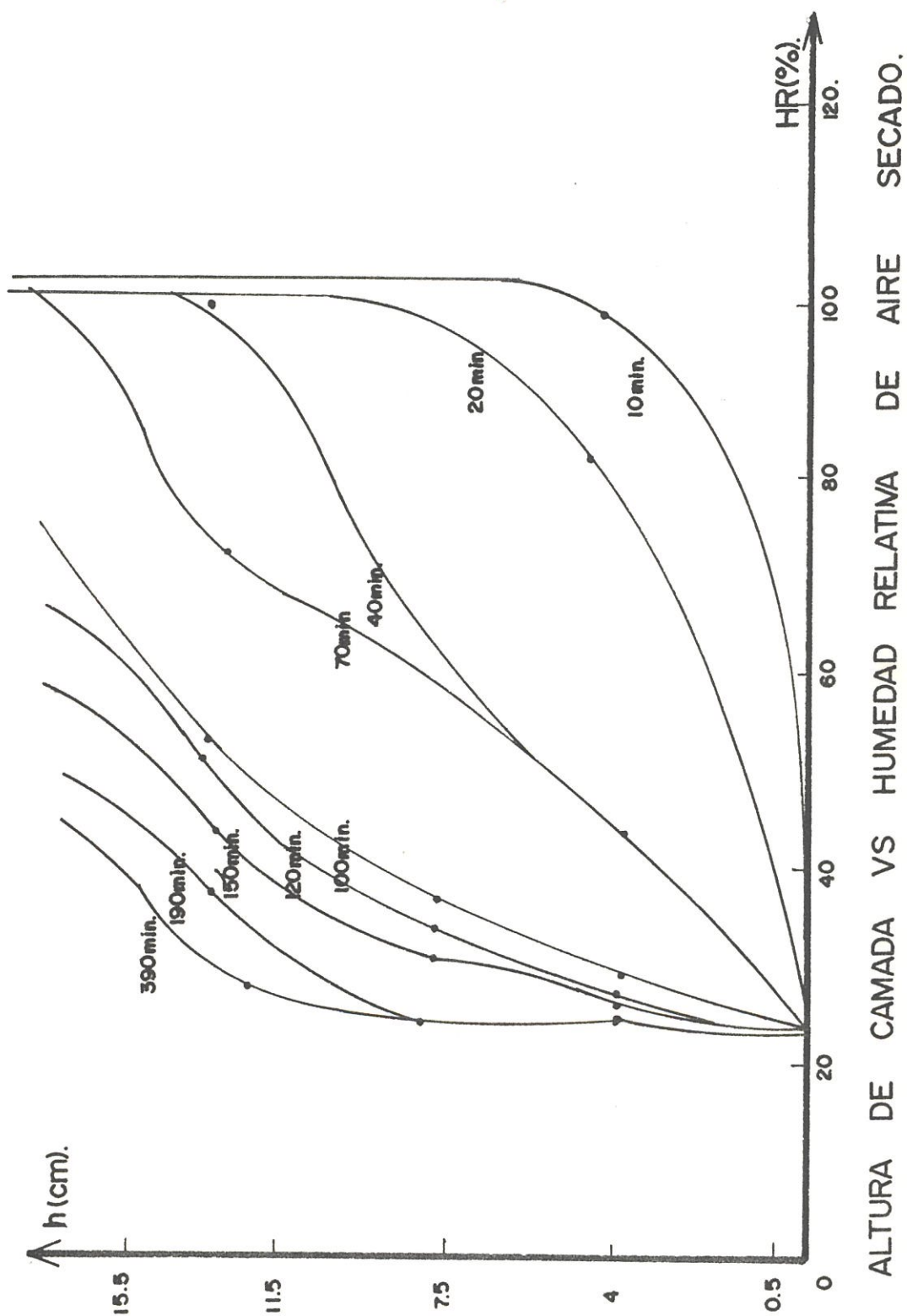
BIBLIOTECA





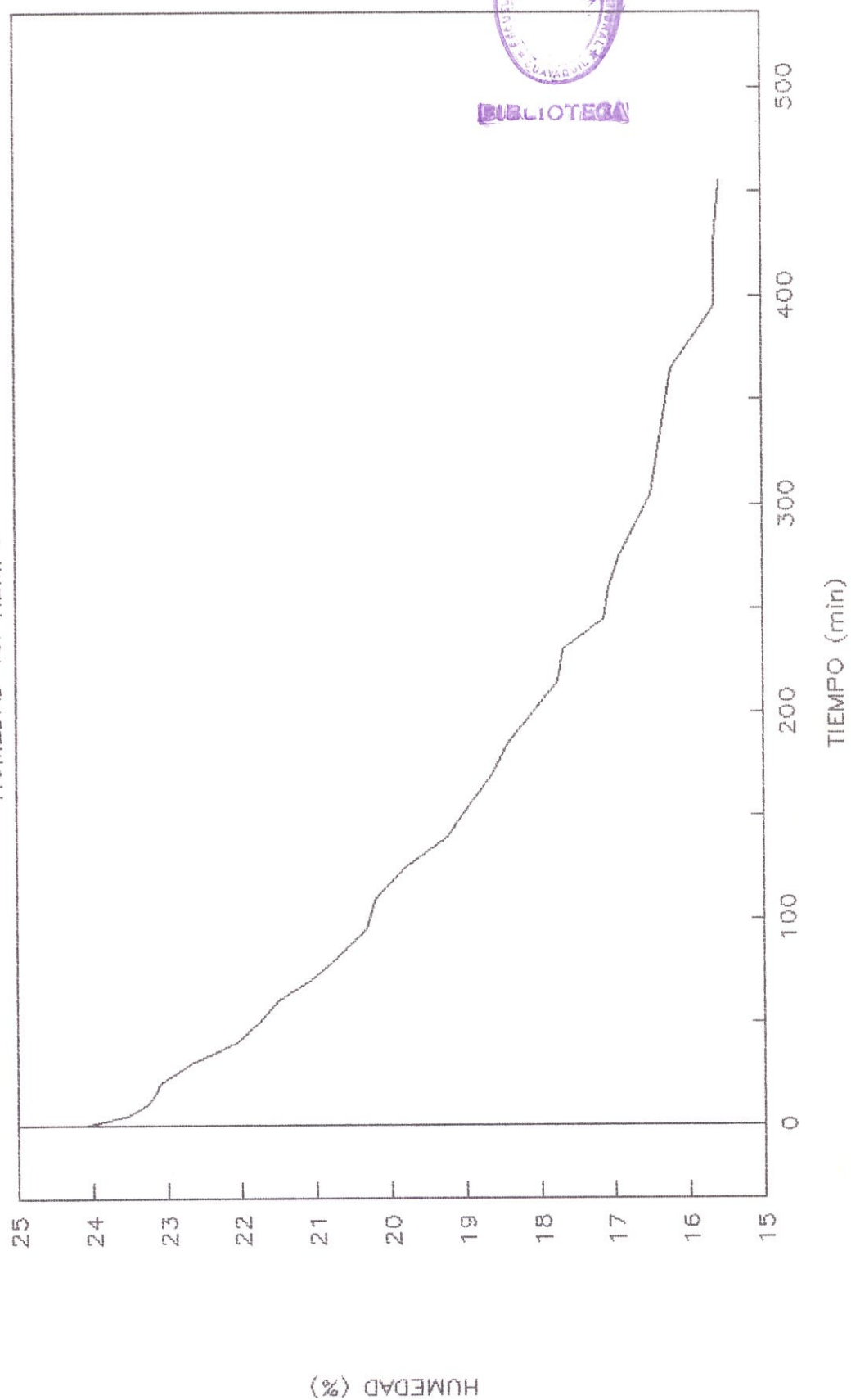
FACTOR DE UTILIZACION DE CALOR VS TIEMPO.

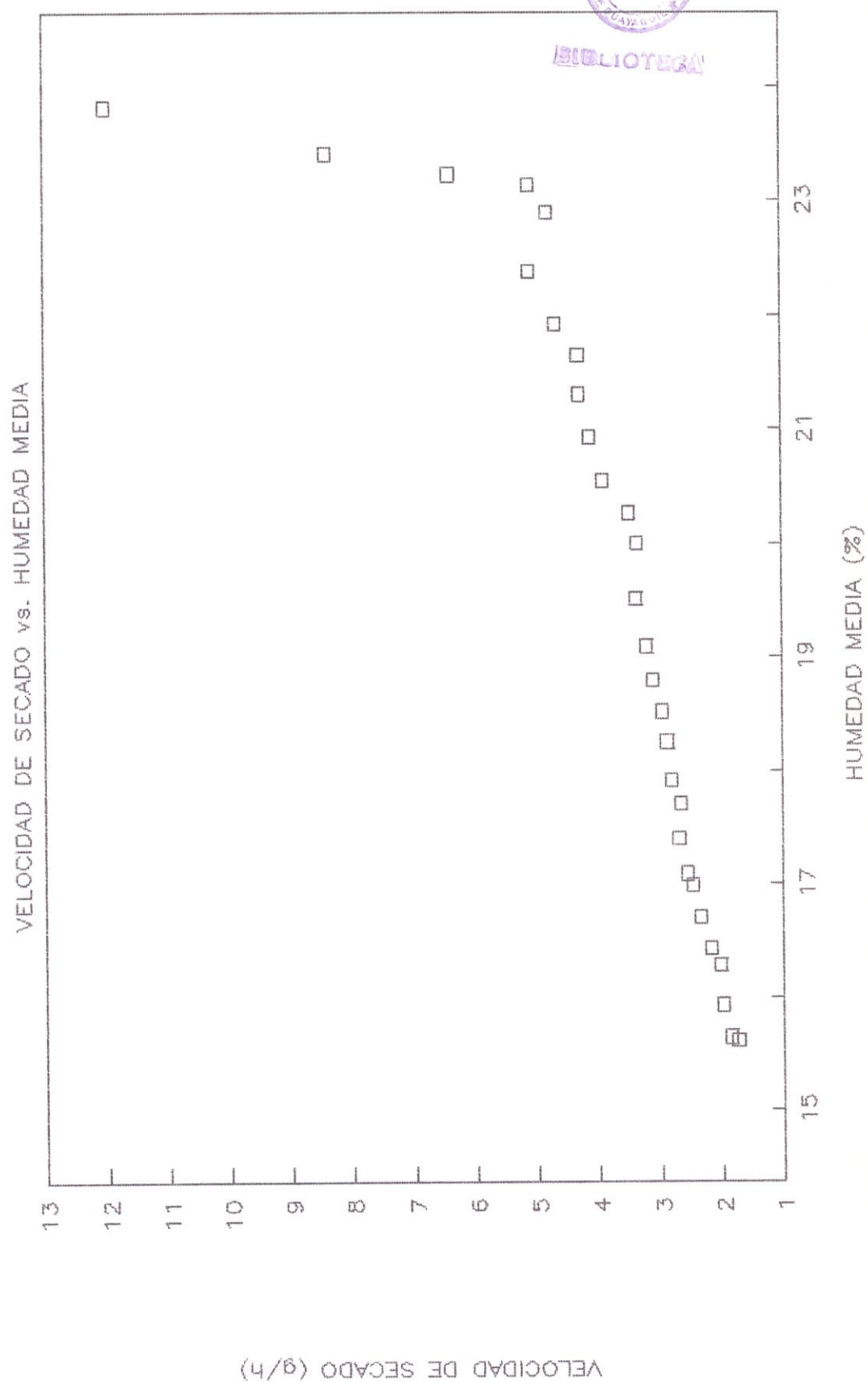


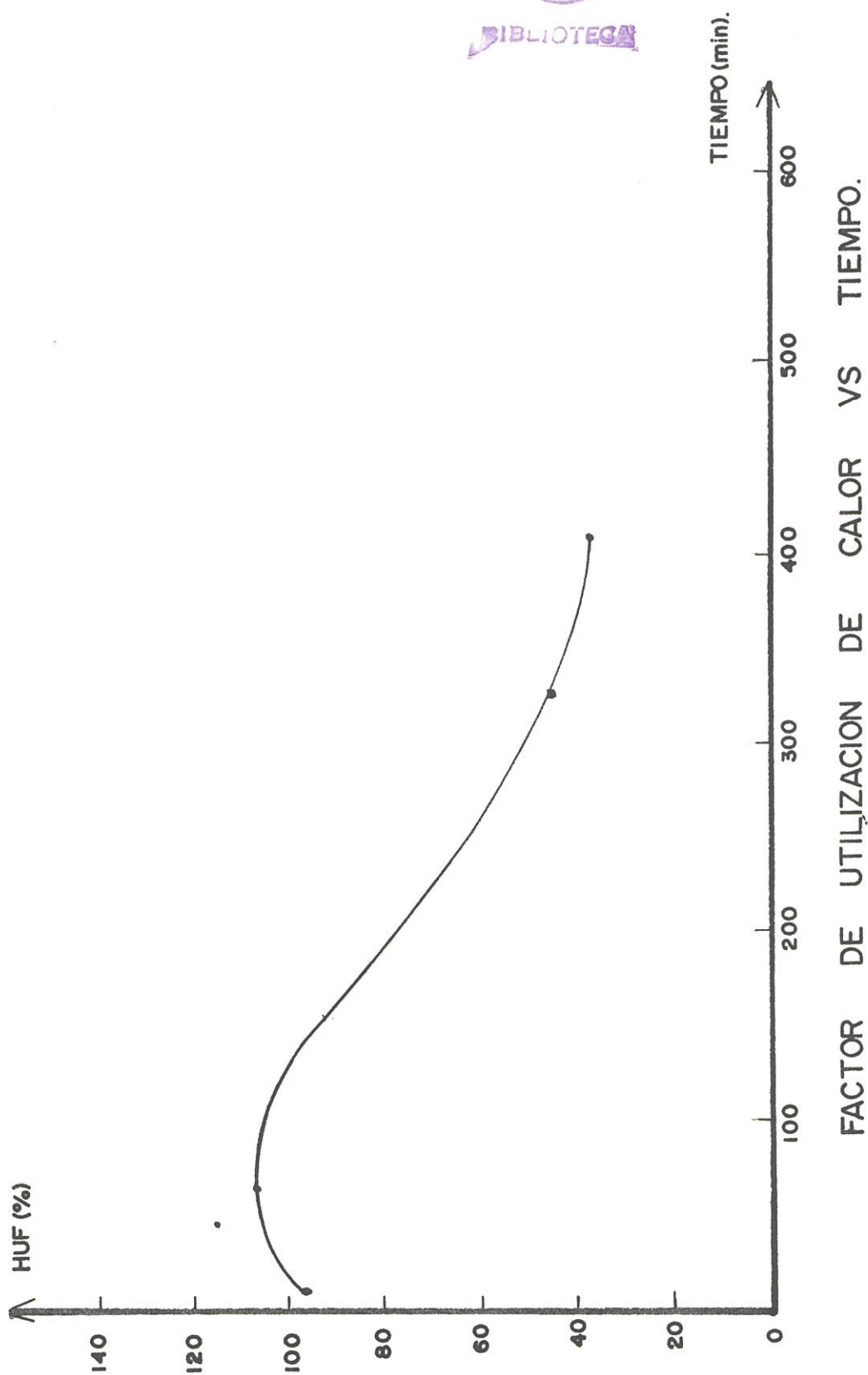


APENDICE B.3 — PRUEBA #3

HUMEDAD vs. TIEMPO

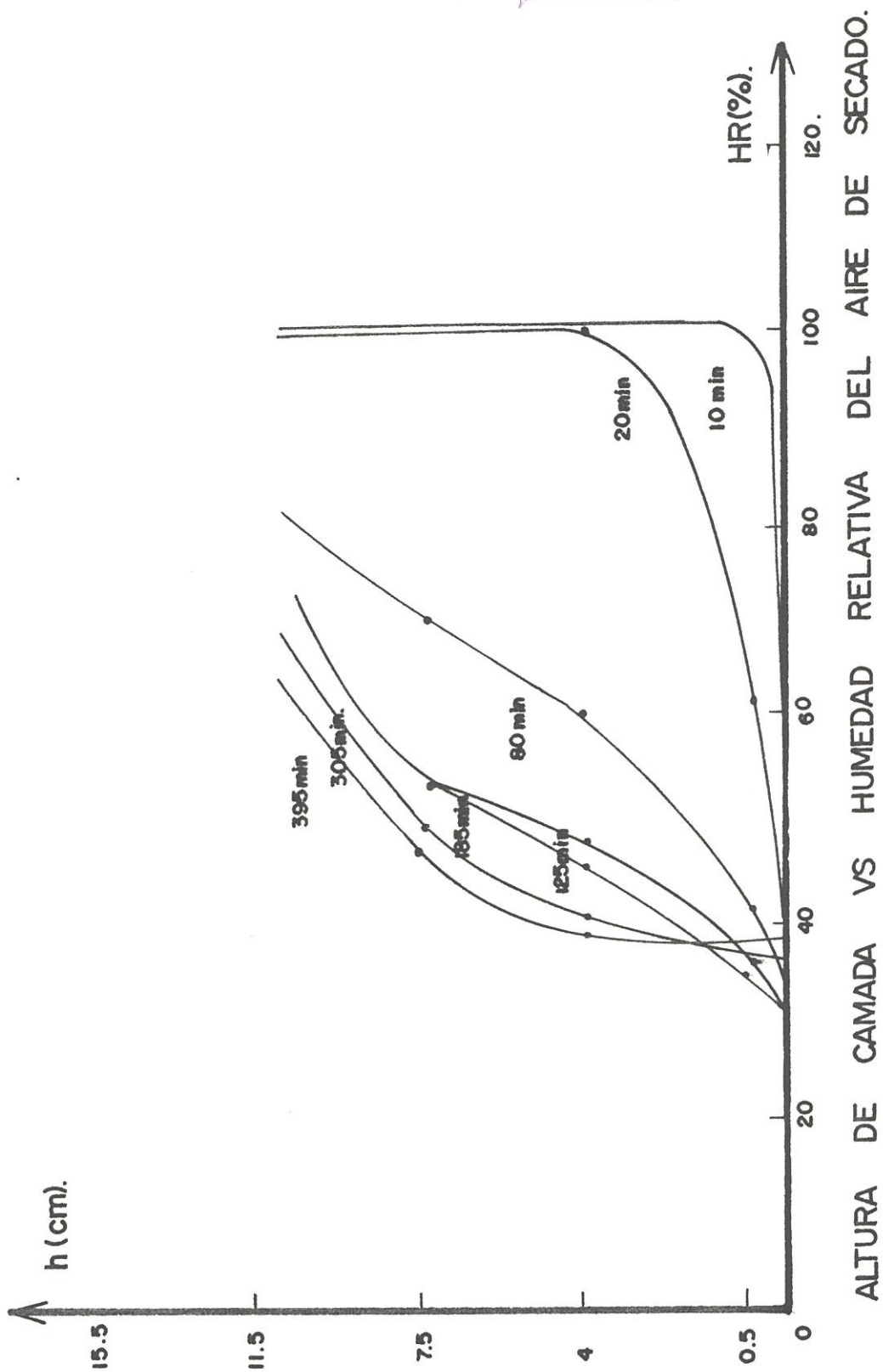






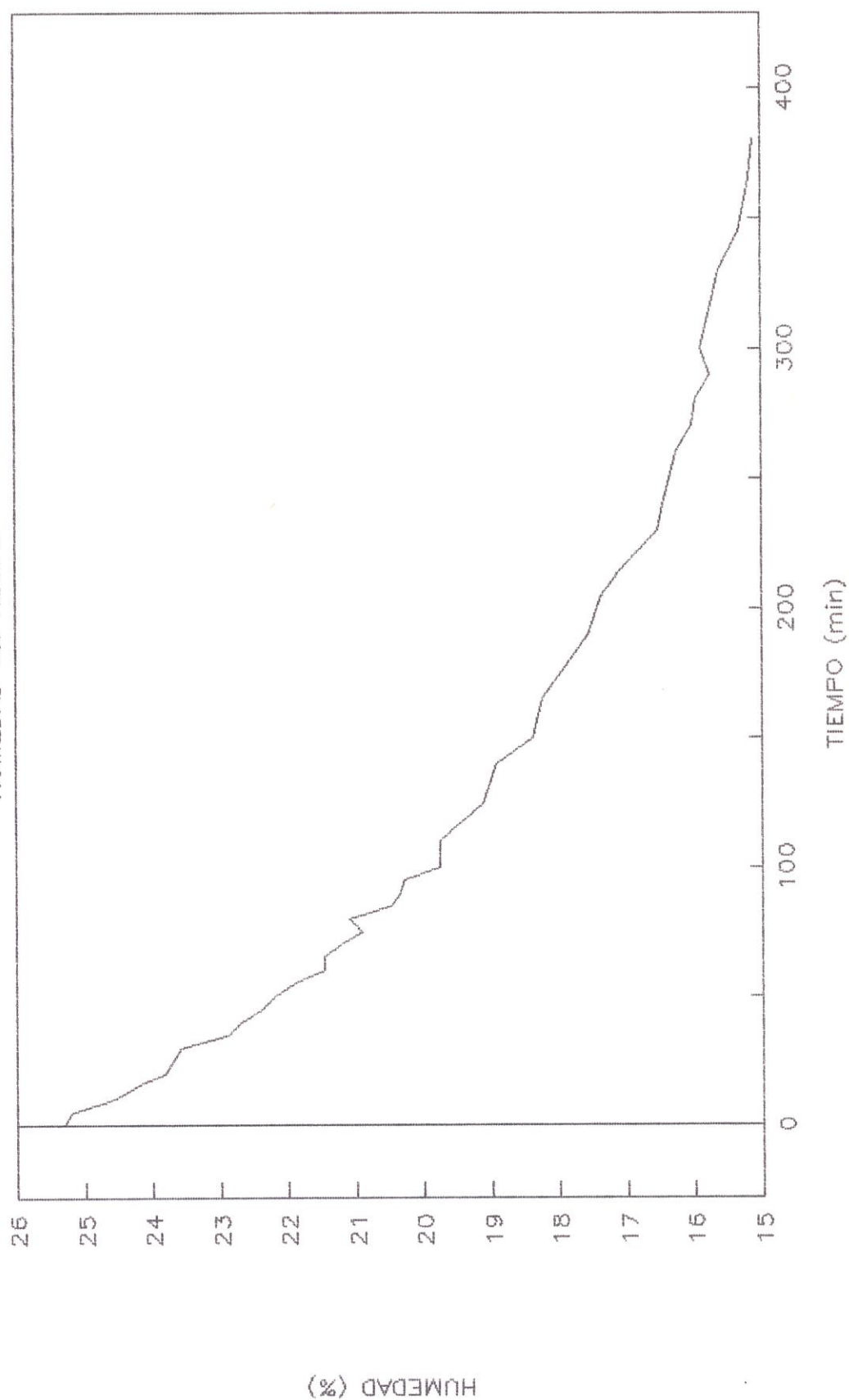


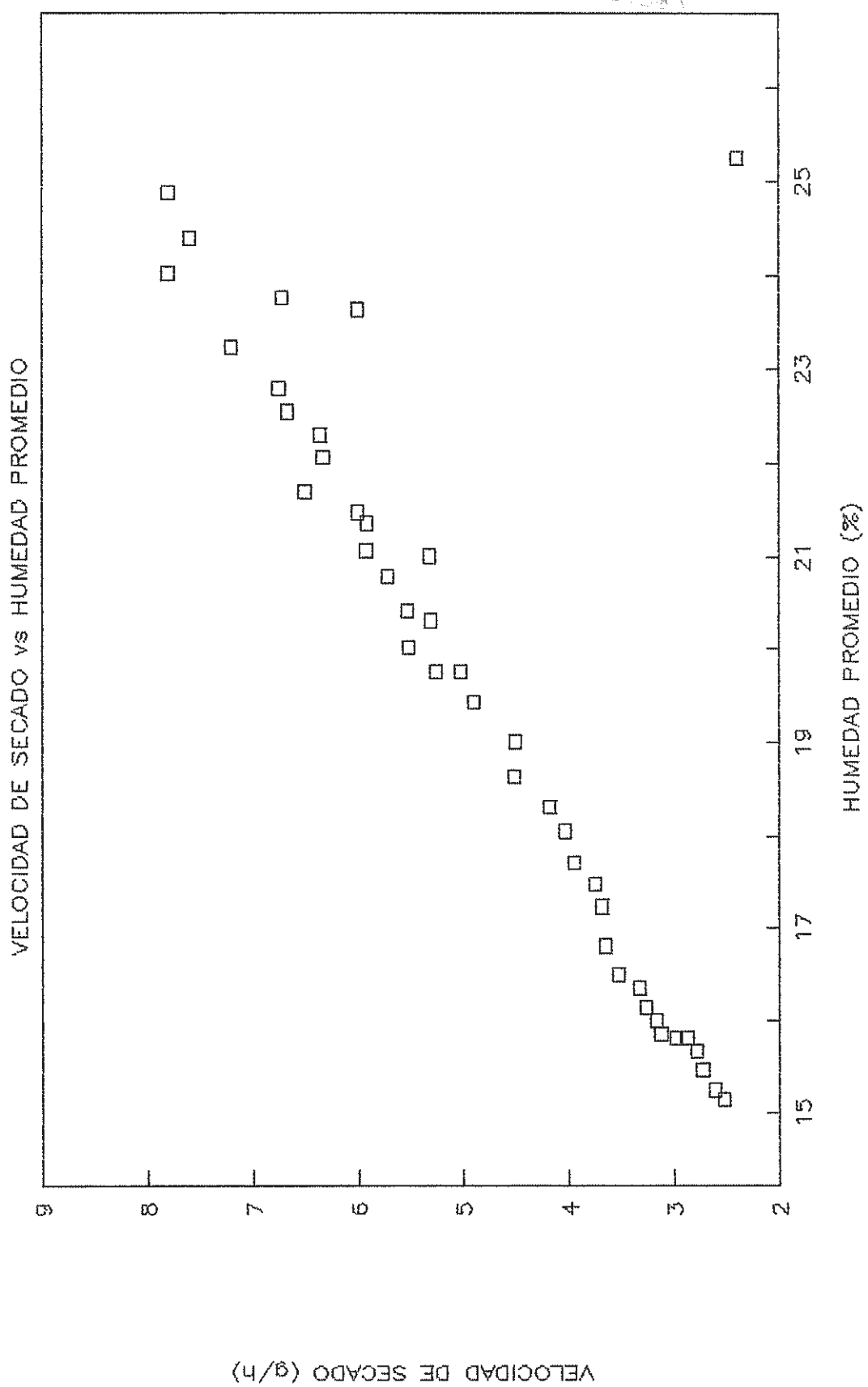
BIBLIOTECA

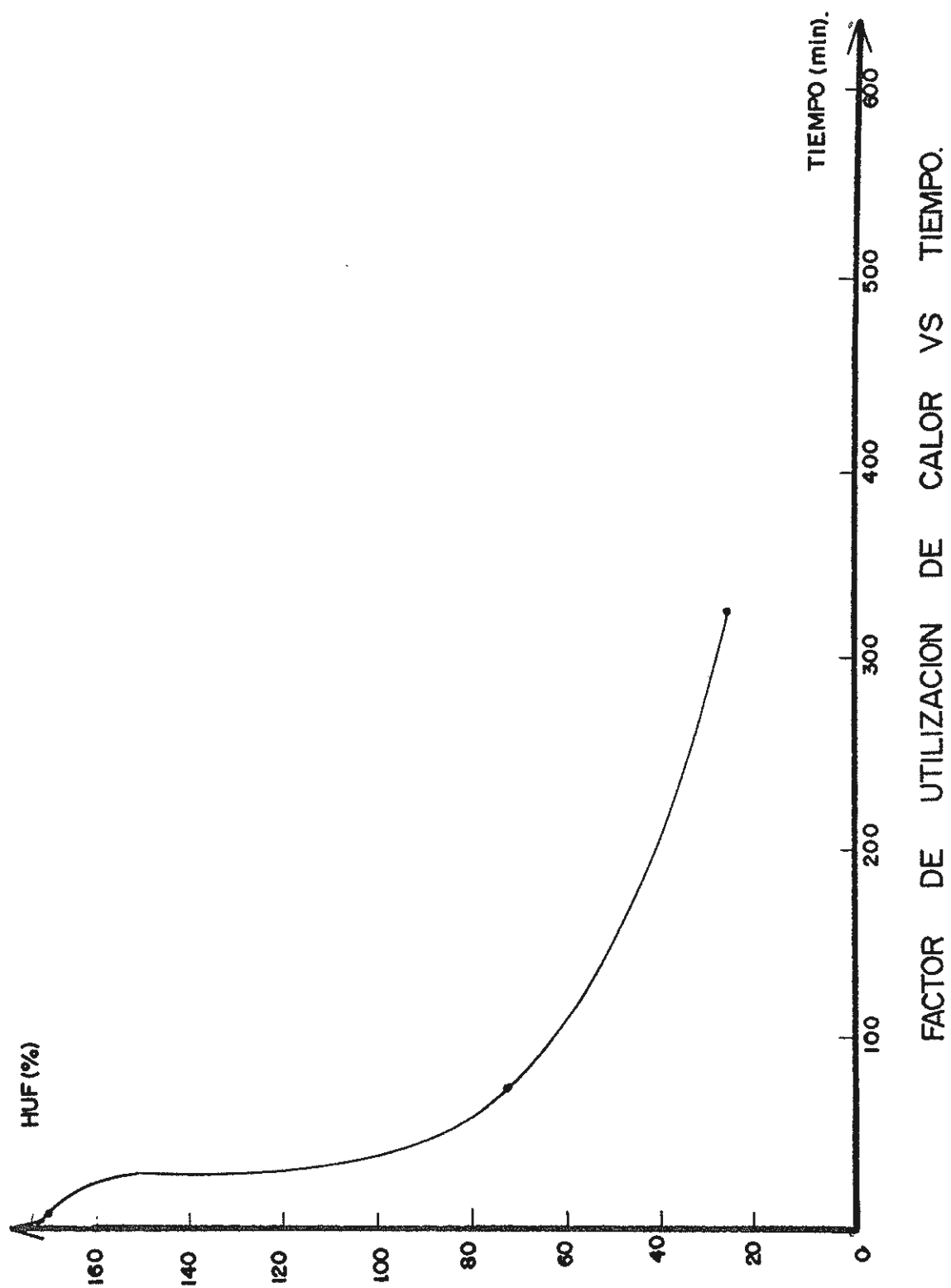


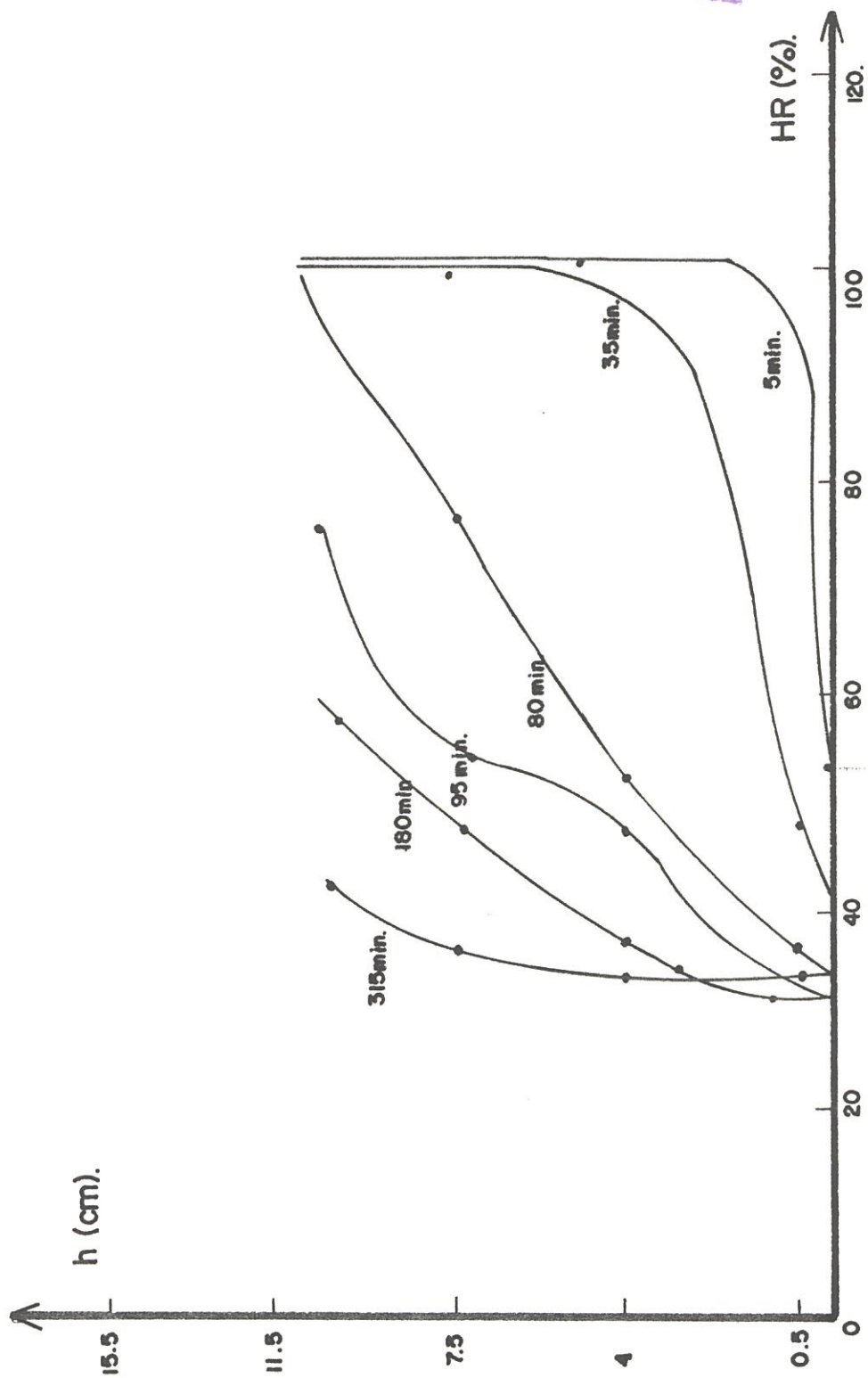
APENDICE B.4 — PRUEBA #4

HUMEDAD vs. TIEMPO



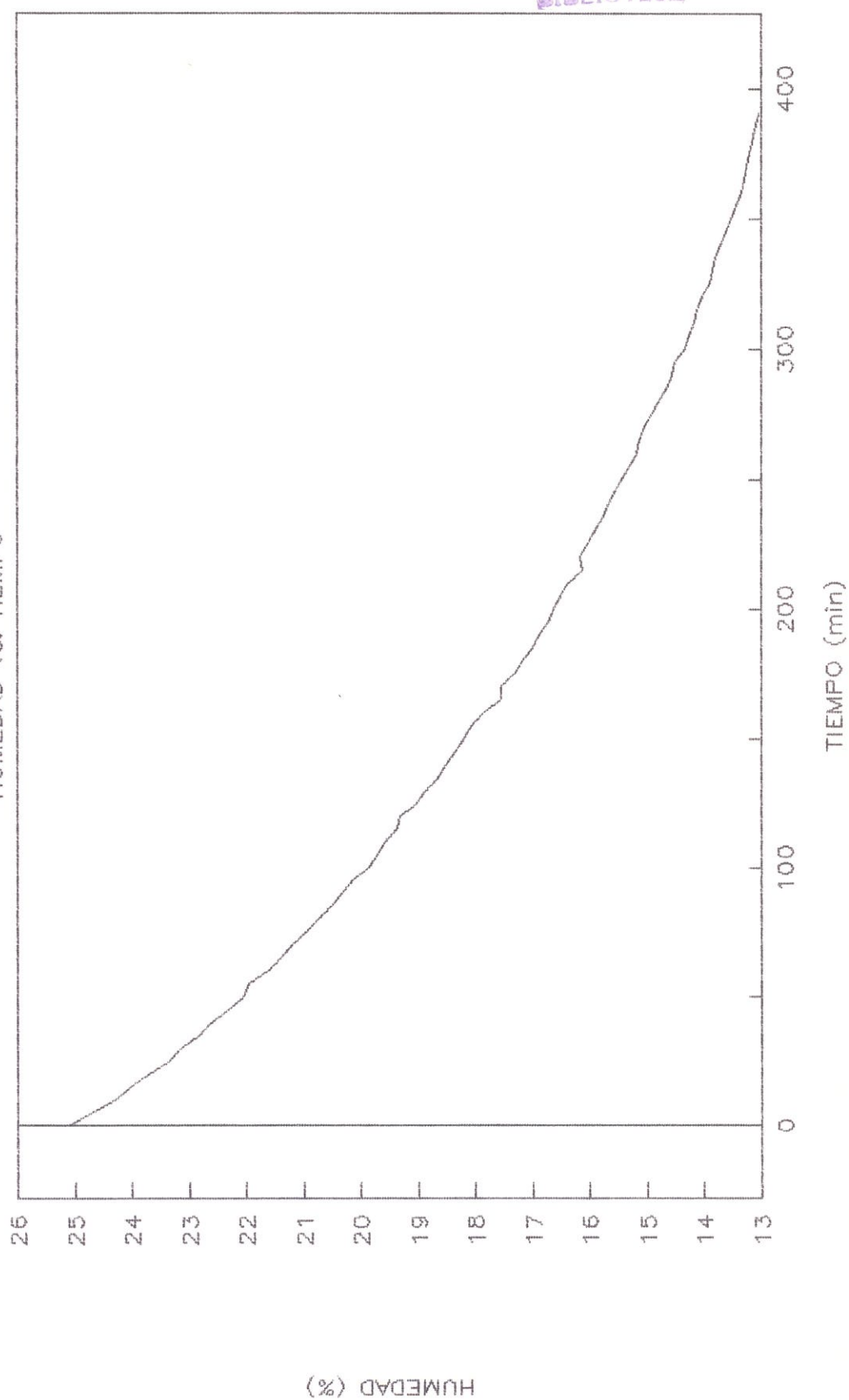




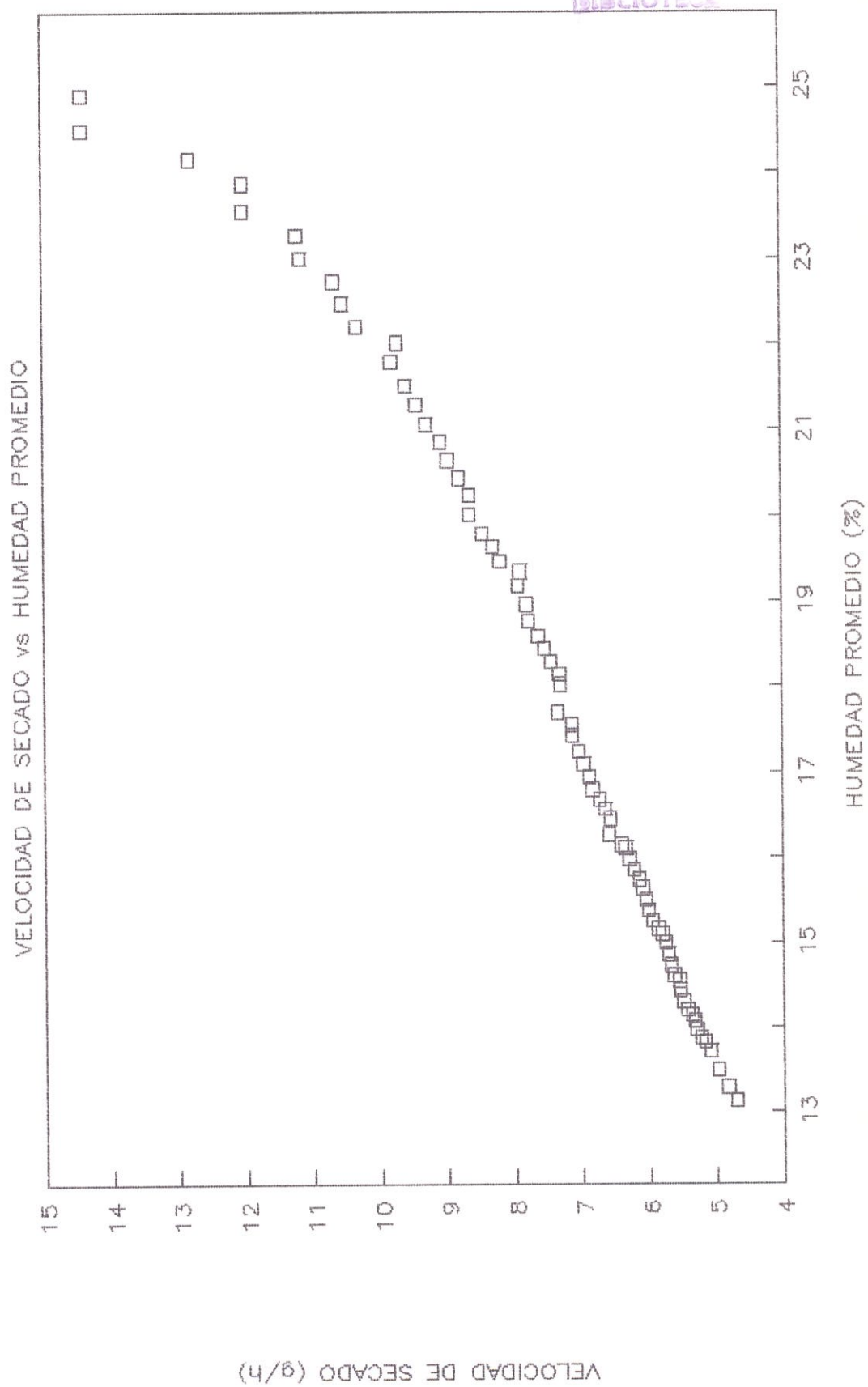


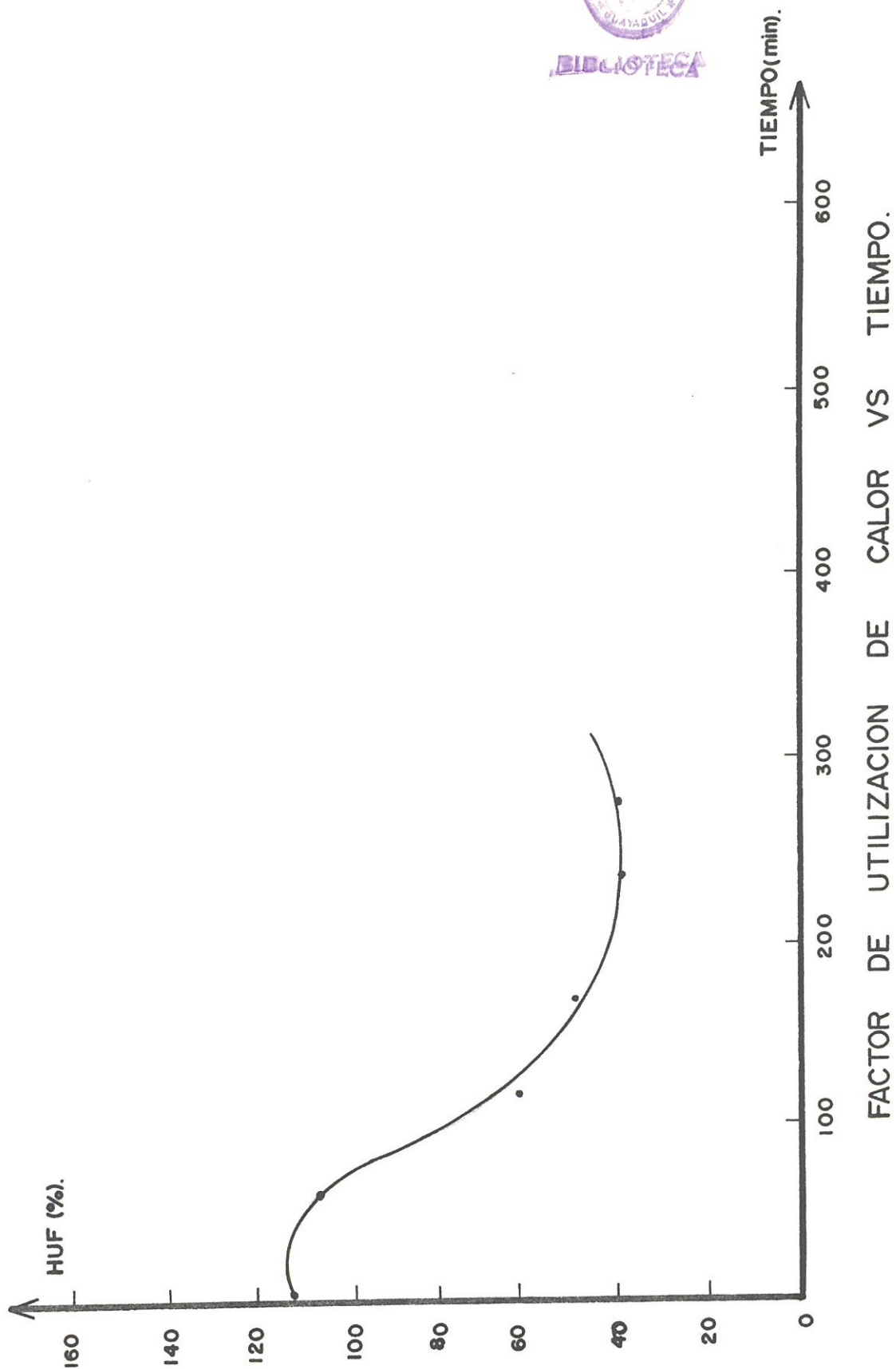
APENDICE B.5 — PRUEBA #5

HUMEDAD vs. TIEMPO



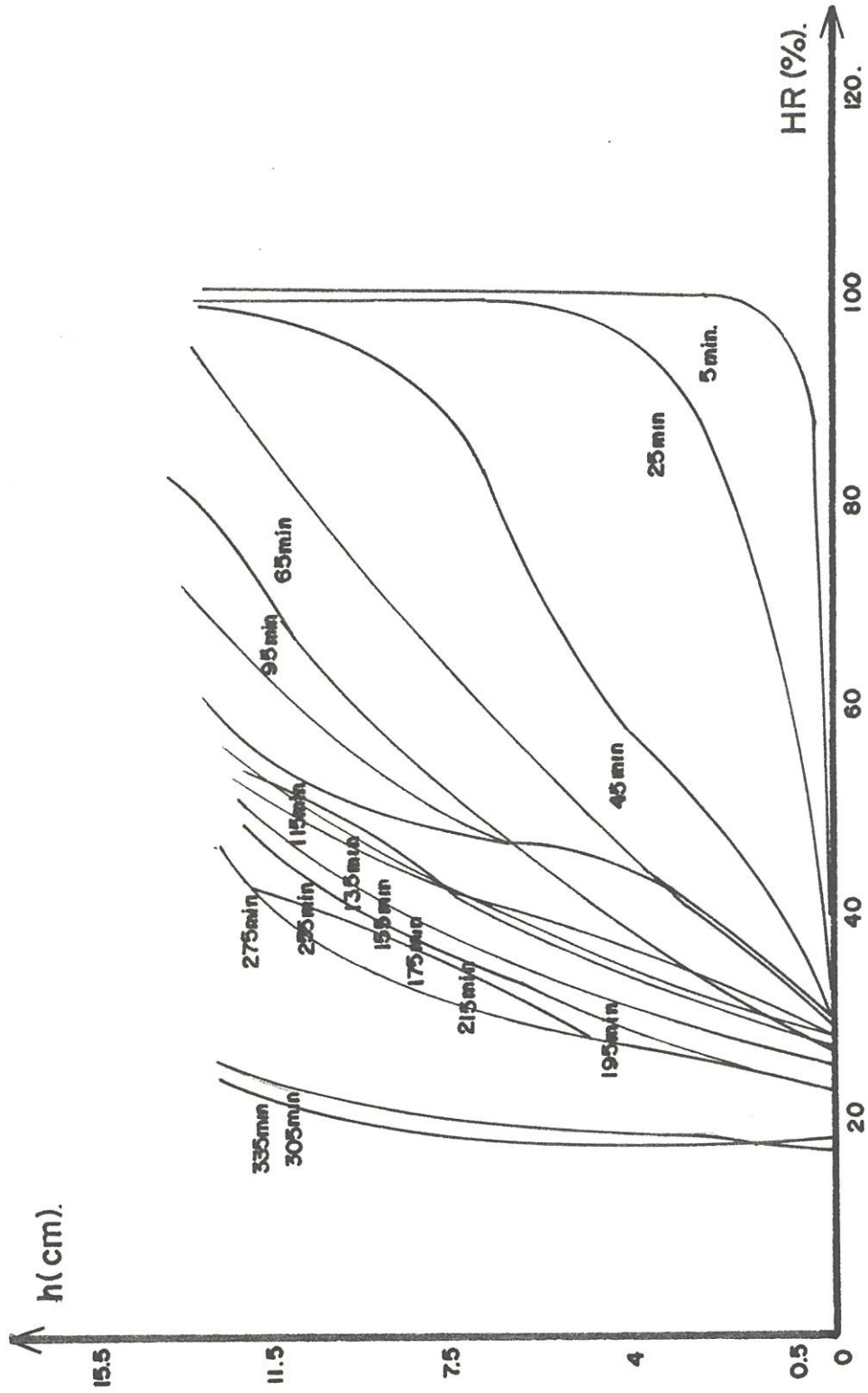
BIBLIOTECA







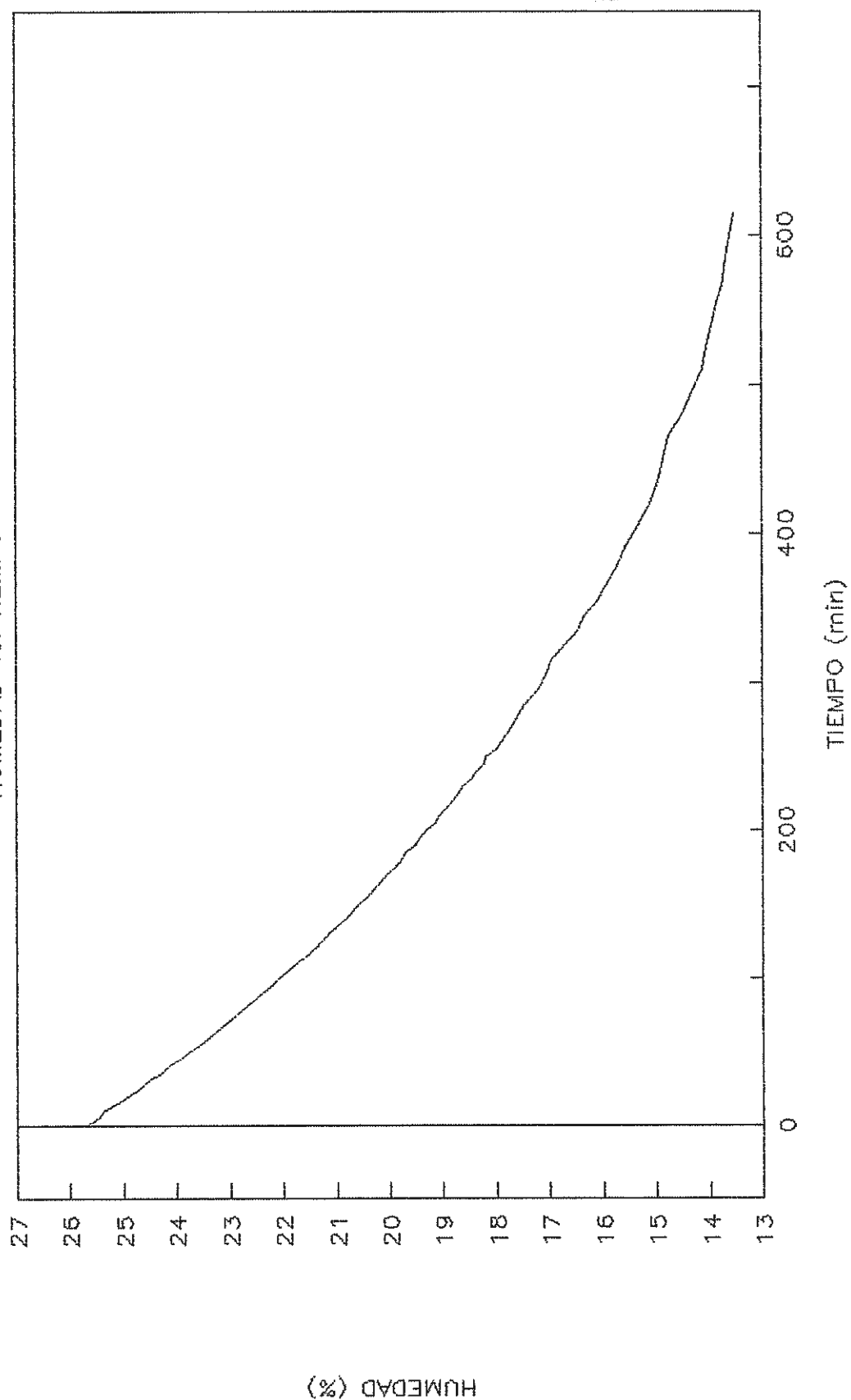
BIBLIOTECA



ALTURA DE CAMADA VS HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE DE SECADO.

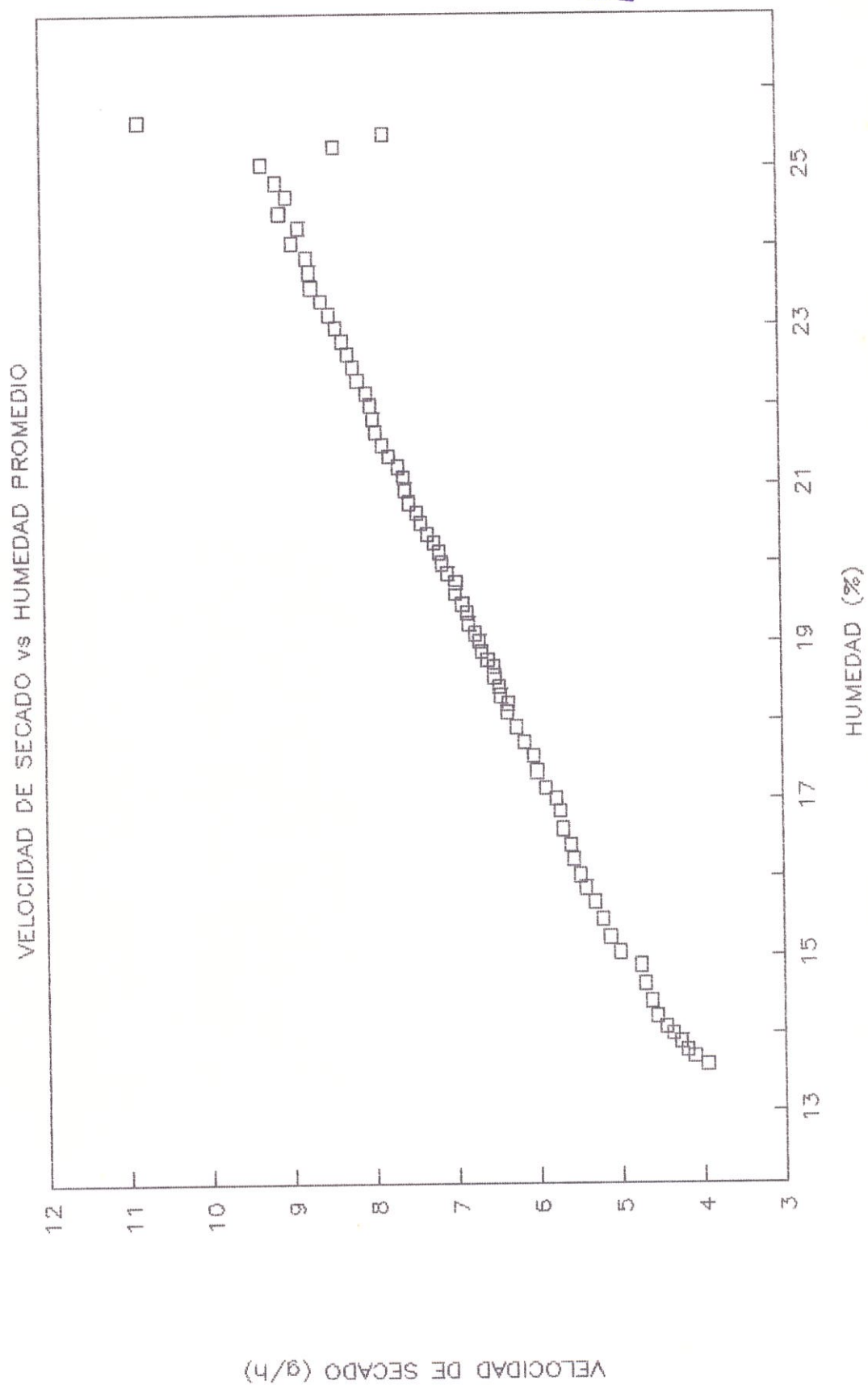
APENDICE B.6 — PRUEBA #6

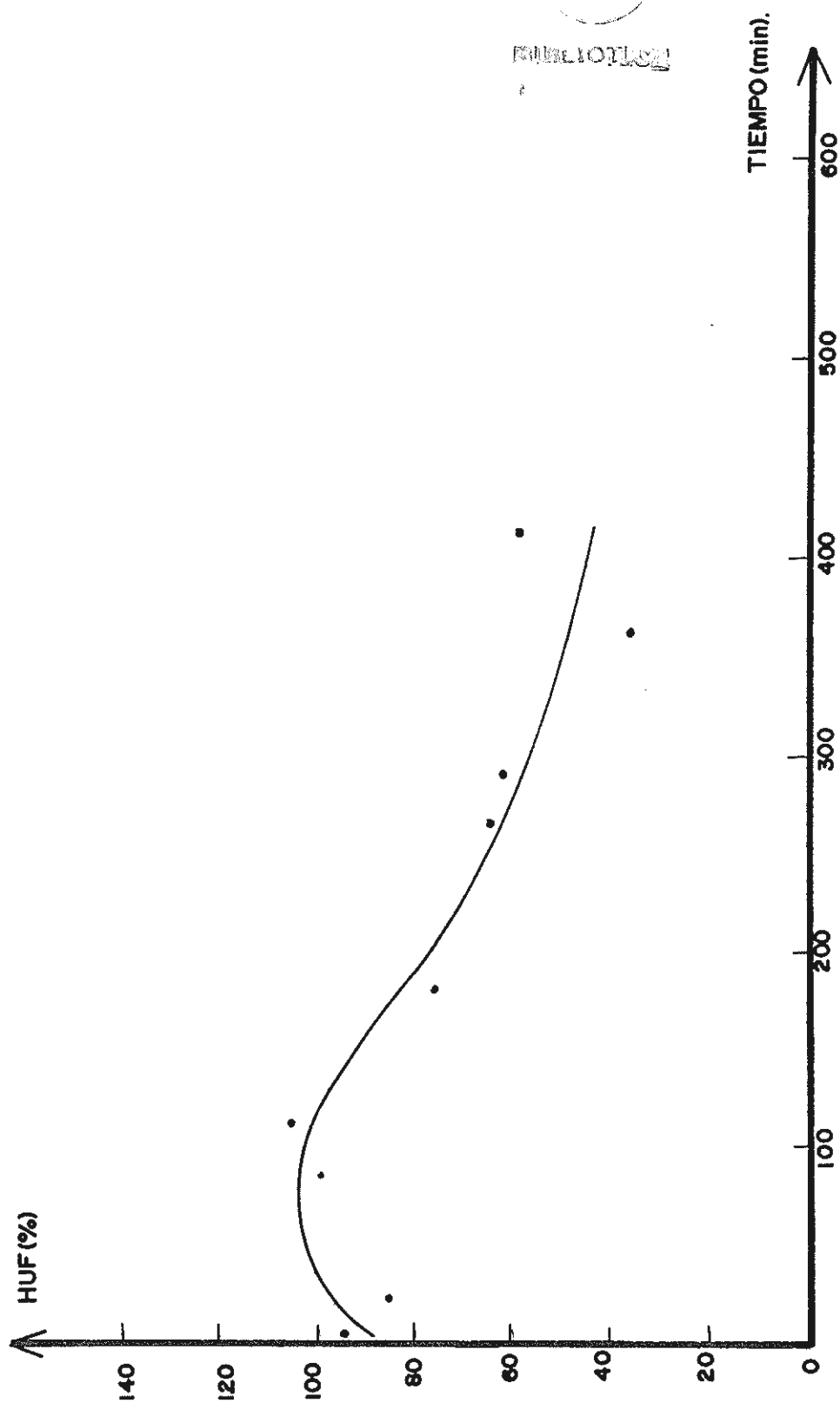
HUMEDAD vs. TIEMPO



REVISOR



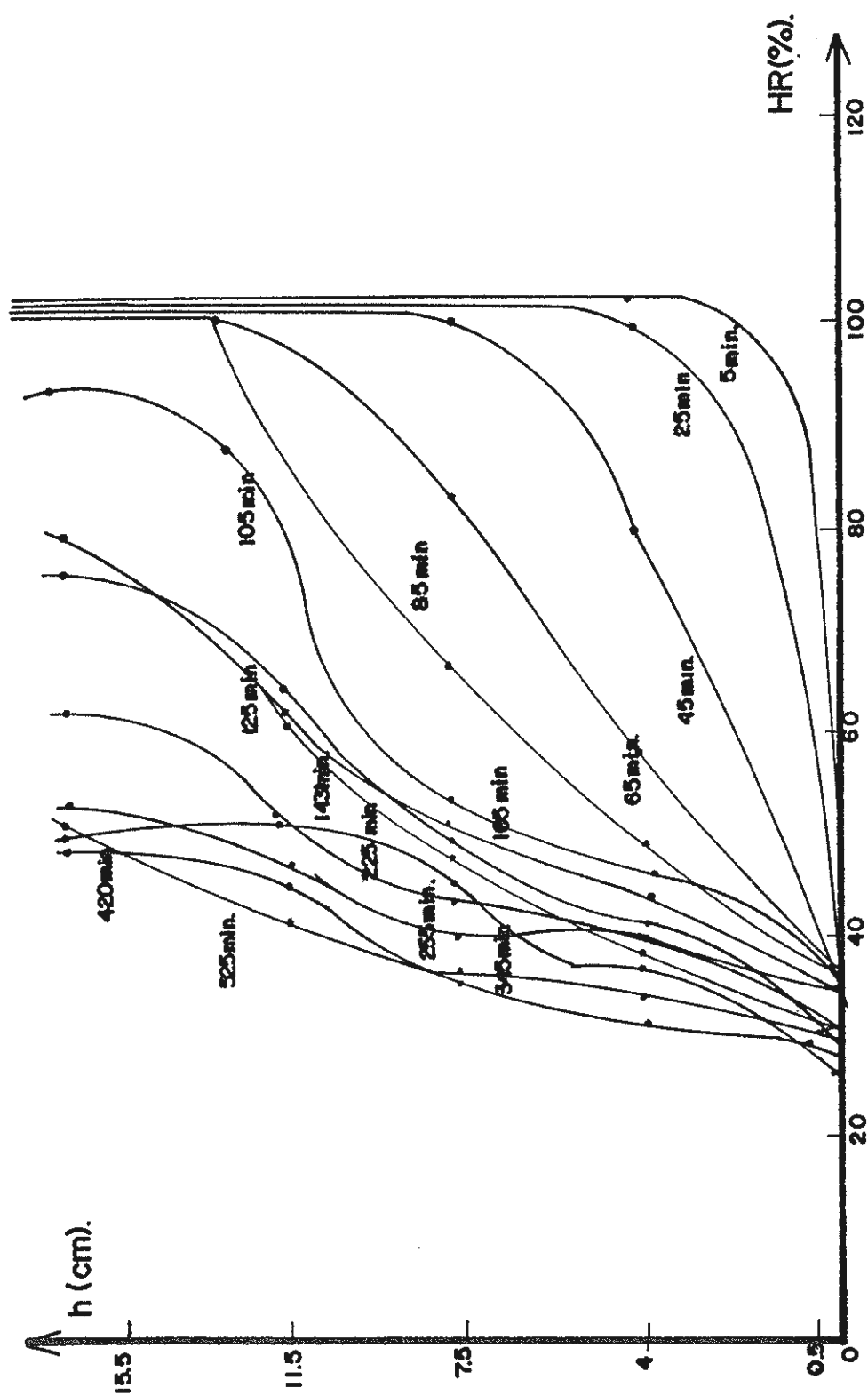




FACTOR DE UTILIZACION DE CALOR VS TIEMPO.

MILLIOTON





ALTURA DE CAMADA VS HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE DE SECADO.

BIBLIOTEC

B I B L I O G R A F I A

1. ANGLADETTE, André. El arroz, Editorial Blume, Barcelona, 1969.
2. BROOKER, Donald B. Drying cereal grains, The Avi Publishing Company, Westport-Connecticut, 1978.
3. BRUQUE, Jacinto. Contenido de humedad del grano de arroz en la cosecha y su influencia en el rendimiento en la variedad Iniap-6, Facultad de Agronomía, Universidad de Guayaquil, 1985.
4. CARRERES ORTELLS, Ramón. Secado del arroz en cáscara, Departamento del Arroz, C.R.I.D.A., Valencia, 1983.
5. GASPARETTO, Ettore. Postcosecha, tratamientos y almacenamiento de granos, ESPOL, Guayaquil, 1989.
6. GEANKOPLIS, Cristie J. Transport Processes and Unit Operations, Allyn and Bacon Inc., Massachusetts, 1983.
7. INCROPERA, F.-DEWITT, D. Fundamentals of Heat Transfer, John Wiley & Son Inc., 1981.
8. KREITH, F.-BLACK, W.Z. La transmisión de calor. Principios Fundamentales, Editorial Alhambra, 1980.
9. MANALO, A.S. Rice hull as fuel for drying paddy, IRRI Saturday Seminar, 1971.
10. MANALO, A.S.-ARBOLEDA J.R-KHAN, A.U. Drying and processing research at IRRI, IRRI Saturday Seminar, 1972.

11. OCON/TOJO. Problemas de Ingeniería Química, Ediciones Aguilar, Madrid, 1980.
12. QUIÑONEZ MERA, Benjamín. Bioenergía, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Agrícola, Bogotá, 1982.
13. RAMIREZ, M. Genel. Almacenamiento y conservación de granos y semillas, Compañía Editorial Continental S.A., México, 1975.
14. TREYBAL, Robert E. Operaciones de transferencia de masa. McGraw-Hill. México, 1980.