

# SECADO-DESHIDRATACIÓN

Humedad relativa? Absoluta?

¿Por qué un alimento, como la harina, sale del proceso de producción con un 14-15 % de humedad y durante su distribución y almacenamiento este valor disminuye a 10-12 % con una humedad ambiente promedio de 50-60 %?

¿Cómo se seca? Mecanismos

¿Qué pasa con el agua? ¿Dónde se va?

¿A qué velocidad se seca bajo ciertas condiciones?

# SECADO-DESHIDRATACIÓN

La deshidratación es una operación en la que la mayor parte del **agua presente en un alimento es eliminada por evaporación** o sublimación bajo condiciones controladas

El aire que nos rodea es "aire húmedo", contiene ***vapor de agua***

## Propiedades de las mezclas aire-vapor



Propiedades:

- del aire seco,
- del vapor de agua,
- y de la mezcla: el aire húmedo.

# Psicrometría

Ciencia que se ocupa de las propiedades termodinámicas del aire húmedo, y el efecto de la humedad atmosférica sobre los materiales y el confort humano

¿Qué es la humedad relativa? Absoluta?

¿Cómo se produce la condensación de la humedad en un serpentín de enfriamiento?

¿Por qué "suda" un ducto de aire frío?

Las respuestas tienen que ver con el conocimiento de las propiedades de la mezcla de aire y vapor de agua (humedad)

Las tablas psicrométricas (mayor precisión) y carta psicrométricas (menos precisa pero más rápida)

# Psicrometría

Para el secado de alimentos es de particular interés estudiar las propiedades de la mezcla aire-vapor de agua.

## Utilidad

- Análisis y diseño de sistemas de almacenamiento y procesamiento de alimentos.
- Diseño de sistemas de aire acondicionado (conservación de alimentos frescos, secadores de granos, torres de enfriamiento en plantas procesadoras)

Aire seco =====> no contiene vapor de agua.

Aire húmedo ==> aire seco + vapor de agua

La humedad está "en el aire", aire y vapor de agua, existen juntos en un espacio dado al mismo tiempo.

Los dos son **independientes** uno del otro, y no responden de la misma manera a los cambios de condiciones, especialmente a los cambios de temperatura.

## Propiedades del Aire

El aire es una mezcla de gases incolora, inolora e insabora

El aire seco  $\neq$  gas puro (mezcla) por lo tanto no se ajusta exactamente a las leyes de los gases, pero los gases que los componen son verdaderos gases; así que, para el propósito práctico, se considera a esta mezcla de gases (aire seco sin vapor de agua) como un solo compuesto, que sigue la ley de los gases.

Retiene sustancias en suspensión y en solución.

El aire tiene baja conductividad térmica.

El aire tiene peso, densidad, temperatura, calor específico, y cuando está en movimiento, tiene momento e inercia.

Es es una mezcla de gases altamente sobrecalentados. Por lo que, cuando calentamos o enfriamos aire seco, solamente estamos agregando o quitando calor sensible

Si el aire seco se calienta, se expande; y su densidad disminuye, cuando la presión permanece constante. Inversamente, si se enfría el aire seco, aumenta su densidad. Las temperaturas, densidades, volúmenes y presiones, todas varían proporcionalmente.

**Table 9.1** Composition of Standard Air

| Constituent   | Percentage by volume |
|---|----------------------|
| Nitrogen  | 78.084000            |
| Oxygen  | 20.947600            |
| Argon   | 0.934000             |
| Carbon dioxide  | 0.031400             |
| Neon  | 0.001818             |
| Helium  | 0.000524             |
| Other gases (traces of methane, sulfur dioxide, hydrogen, krypton, and xenon) | 0.000658             |
|   | 100.000000           |

### ley de Dalton

## Propiedades del aire seco

### Volumen específico del aire seco ( $V_{as}$ )

$$V_{as} = \frac{RT}{p_{as}}$$

$V_{as}$ : (m<sup>3</sup>/kg)

R: constante de los gases  
(m<sup>3</sup>.K.Pa/kg)

T: temp absoluta (K)

$p_{as}$ : presión parcial del as (Pa)

### Calor específico del aire seco ( $C_{pas}$ )

A 1 atm (101,325 kPa) es f(T) entre -40°C y 60°C varía desde 0,997 hasta 1,022 kJ/kg.K

Valor medio:  $C_{pas} = 1,005$  kJ/kg.K

### Entalpía del aire seco ( $H_{as}$ )

H o contenido energético del as es un término relativo que necesita de un punto de referencia.

En cálculos psicrométricos: presión atmosférica y 0°C

$$H_{as} = 1,005 (T_a - T_0)$$

$H_{as}$ : (kJ/kg)

$T_a$ : temp de bulbo seco (°C)

$T_0$ : temp de referencia (°C)

Su variación expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por el sistema

### Temperatura de bulbo seco ( $T_a$ )

En el acondicionamiento de aire, la temperatura del aire indicada es normalmente la temperatura de «bulbo seco» (*bs*), tomada con el elemento sensor del termómetro en una condición seca. Es la temperatura medida por termómetros ordinarios en casa.

# Vapor de Agua (Humedad)

La humedad describe la presencia de vapor de agua en el aire.

Aire y vapor de agua, existen juntos en un espacio dado al mismo tiempo.

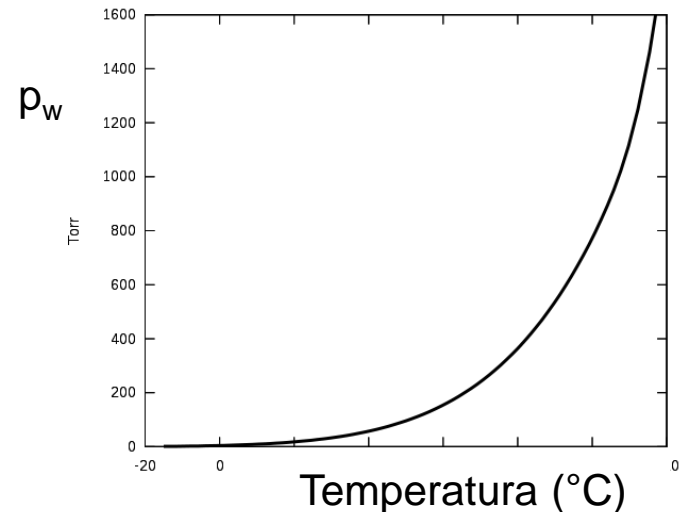
La humedad está "en el aire", solamente en el sentido de que los dos, aire y vapor de agua, existen juntos en un espacio dado al mismo tiempo

El vapor de agua es producido por el agua, a cualquier temperatura (aun sobre hielo).

El vapor ejerce una presión definida encima del agua, determinada por la temperatura del agua, independientemente de si el agua está o no en ebullición o de si el espacio por encima del agua contiene aire.

**Presión de vapor:** Es la presión ejercida por las moléculas de un componente que está en el estado vapor y que se encuentran en equilibrio dinámico con las moléculas del mismo componente que está en estado líquido.

$p_v$  de un compuesto es función de la temperatura



No hay diferencia si hay o no aire en ese espacio; la presión del vapor de agua será la misma, ya que ésta depende totalmente de la temperatura del agua

## Propiedades del vapor de agua

El vapor en el aire es esencialmente vapor sobrecalentado a baja presión parcial y temperatura (muy lejos de su temperatura de saturación).

Bajo ciertas condiciones, el aire puede contener gotas de agua en suspensión (niebla)

PM: 18,01534

### Volumen específico del vapor de agua ( $V_w$ )

$$V_w = \frac{R_w T}{p_w}$$

$V_w$ : (m<sup>3</sup>/kg)

$R_w$ : constante de los gases para el vapor (m<sup>3</sup>.K.Pa/kg)

$T$ : temp absoluta (K)

$p_w$ : presión parcial del va (Pa)

### Calor específico del vapor de agua ( $C_{pw}$ )

El  $C_{pw}$  saturado o sobrecalentado no varía apreciablemente entre -71°C y 124°C

$$C_{pw} = 1,88 \text{ kJ/kg.K}$$

### Entalpía del vapor de agua ( $H_w$ )

$$H_w = 2501,4 + 1.88 (T_a - T_0)$$

$H_w$ : (kJ/kg)

$T_a$ : temp ambiente (°C)

$T_0$ : temp de referencia (°C)

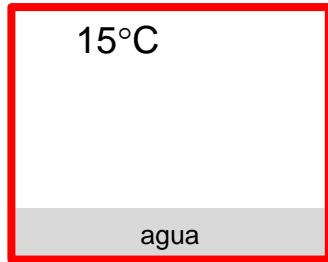
Calor latente de vaporización del vapor:  
2501,4 kJ/kg



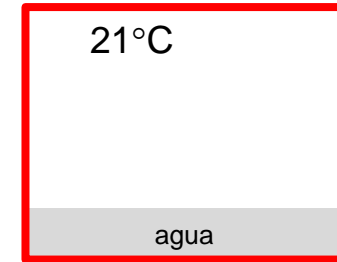
# Mezclas aire-vapor

**Presión atmosférica:** presión del aire + presión del vapor de agua que éste contiene (Ley de Dalton)

$$P_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n P_i$$



Aplicamos calor



Sistema en equilibrio

$P_t = 101.325 \text{ kPa}$

$P_v = 1.70 \text{ kPa}$

Presión del aire seco =  $99.625 \text{ kPa}$

**Aire seco saturado con humedad.** Incorrecto, porque el aire en sí permanece seco, solamente está mezclado con el vapor de agua saturado, pero es un término usado

Algo del agua se evaporará

> peso de vapor y  $P_v$

< Vol específico ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )

El aire se expande (cuarto no

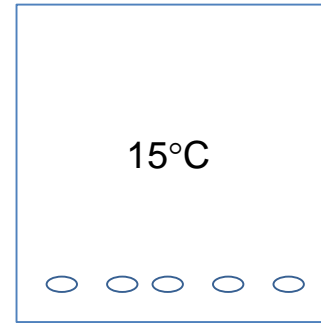
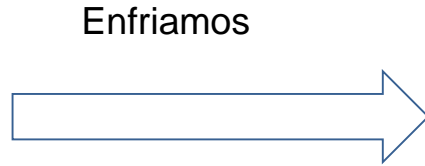
sellado y algo de aire se escapa)

> Vol específico aire

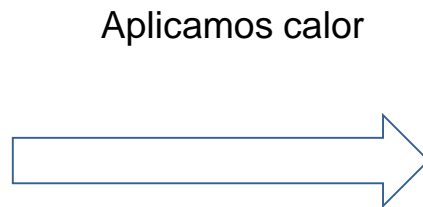


El aire ganó algo de capacidad para retener humedad. En realidad, el aire nada tiene que ver con eso. La temperatura del espacio es lo que cuenta.

Y si se enfría el sistema de  $21$  a  $15 \text{ }^\circ\text{C}$



Vapor condensa gradualmente (gotas de agua) hasta la condición de saturación a 15 °C (nuevas características de presión, volumen, densidad y otras) El aire disminuirá su volumen, y algo de aire exterior entrará



El vapor se sobrecalienta (no hay fuente de agua) y su presión ( $P_v$ ) no cambia

El aire se expande (cuarto no sellado y algo de aire se escapa)  
>Vol específico aire

## Propiedades de las mezclas aire-vapor

Estas mezclas no siguen estrictamente las leyes de los gases ideales aunque pueden utilizarse con buena precisión a presiones  $< 3$  atm

Las mezclas aire-vapor de agua en la atmosfera siguen la ley Gibbs-Dalton

$$p_B = p_A + p_w$$

$p_B$ : presión total o barométrica del aire húmedo

$p_{as}$ : presión parcial del as (Pa)

$p_w$ : presión parcial del va (Pa)

## Humedad Relativa

La humedad relativa (Hr), expresa la cantidad de humedad en una muestra de aire, en comparación con *la cantidad de humedad que el aire tendría, estando totalmente saturado* y a la misma temperatura de la muestra

$$H_r = \frac{p_w}{p_{ws}} * 100 = \frac{x_w}{x_{ws}} * 100$$

$p_w$ : presión de vapor de agua (Pa)

$p_{ws}$ : presión de saturación del vapor de agua (Pa)

$x_w$ : fracción molar del vapor de agua

$x_{ws}$ : fracción molar de saturación del vapor de agua

Medida relativa que proporciona información de la cantidad de agua presente en el aire en relación con la máxima cantidad que pueda existir en el aire saturado a esa temperatura (de bulbo seco)

## Humedad absoluta, W

Se define como la masa de vapor de agua por unidad de masa de aire seco

$$w = \frac{m_w}{m_{as}} = 0,622 \frac{x_w}{x_a}$$

$m_w$ : masa vapor (kg)

$m_{as}$ : masa aire seco (kg)

$x_w$ : fracción molar del vapor de agua

$x_{as}$ : fracción molar del as

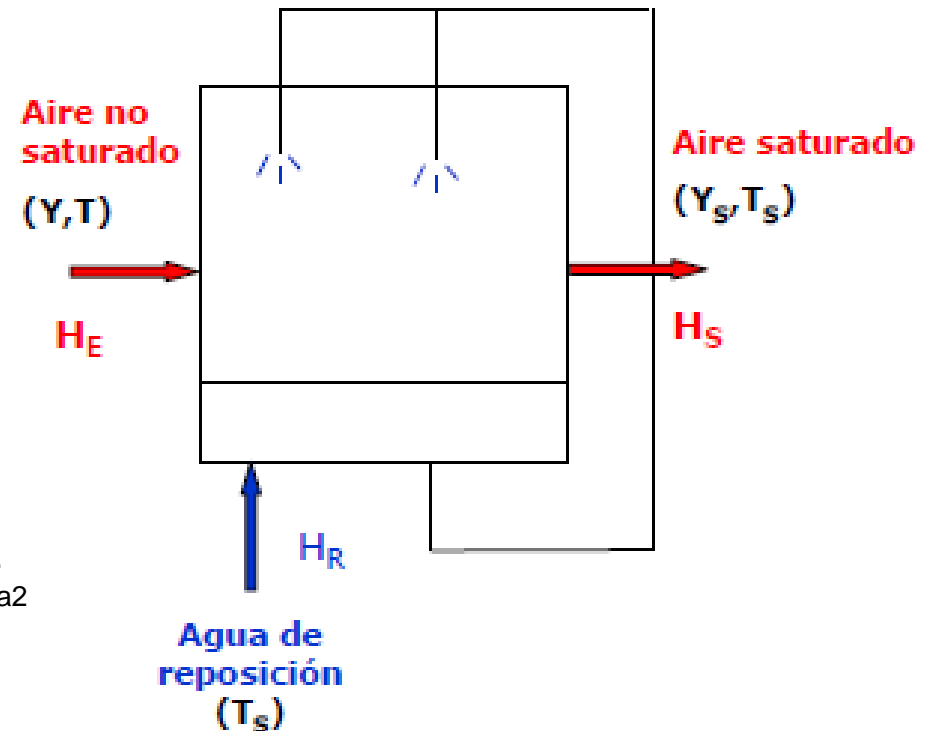
## Temperatura de saturación adiabática del aire

Si una corriente de aire se mezcla perfectamente con una cantidad de agua a la temperatura  $T_s$  ( $T_{a2}$ ) en un sistema adiabático, la temperatura del aire descenderá y su humedad aumentará. La evaporación del agua en el aire produce su saturación.

El calor latente de evaporación es suministrado por el calor sensible transferido desde el aire.

Si  $T_s$  es tal que el aire que sale del sistema está en equilibrio (saturado) con el agua,  $T_s$  es la temperatura de saturación adiabática y la línea que relaciona la temperatura con la humedad del aire es la línea de saturación adiabática

$$T_{a1} - T_{a2} = L * \frac{(W_2 - W_1)}{(1,005 + 1,88 * W_1)}$$



$T_{a1}$ : Temp aire entrada

$T_{a2}$ : temp aire salida (temp de saturación,  $T_s$ )

L: es el calor latente de vaporización del agua a  $T_{a2}$

$W_1$ : humedad aire entrada

$W_2$ : humedad aire salida (saturación)

## Termómetro de Bulbo Húmedo, $T_{bh}$

Temperatura de estado estacionario (equilibrio dinámico) de una superficie de agua que se está evaporando en condiciones adiabáticas en una corriente de aire.

Se mide por medio de un sensor de temperatura cubierto por un trapo que se mantiene saturado de agua.

Cuando la superficie de agua se expone al aire sin saturar, parte al agua se evapora ( $P_v$  del paño húmedo saturado  $>$   $P_v$  del aire sin saturar). Este proceso consume calor latente y produce un descenso de la temperatura del bulbo cubierto.

El estado estacionario se alcanza cuando el flujo de calor desde el aire hacia el paño es igual al calor latente de evaporación necesario para evaporar la humedad del paño.

La  $T$  de equilibrio, es la temperatura de bulbo húmedo.

Temperatura de bulbo seco,  $T_{BS}$  ( $T_{aire}$ )

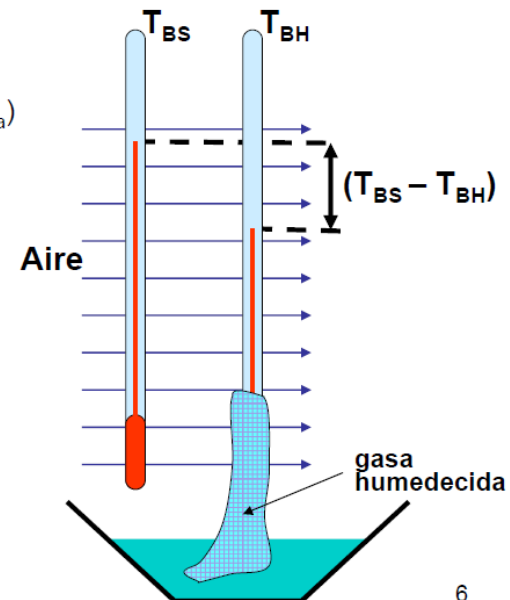
Temperatura de bulbo húmedo,  $T_{BH}$  ( $T_{agua}$ )

$T_{BS} = T_{BH} \Rightarrow$  aire saturado

$T_{BS} > T_{BH} \Rightarrow$  aire no saturado

$(T_{BS} - T_{BH})$  en tablas  $\rightarrow$  HR

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } (T_{BS} \gg T_{BH}) \Rightarrow \text{HR baja} \\ \text{Si } (T_{BS} \approx T_{BH}) \Rightarrow \text{HR alta} \end{array} \right.$



## Termómetro de Bulbo Húmedo, $T_{bh}$

Si el aire estuviese saturado con humedad (100% Hr), la lectura de la temperatura en el termómetro de bulbo húmedo, sería la misma que la del termómetro de bulbo seco.

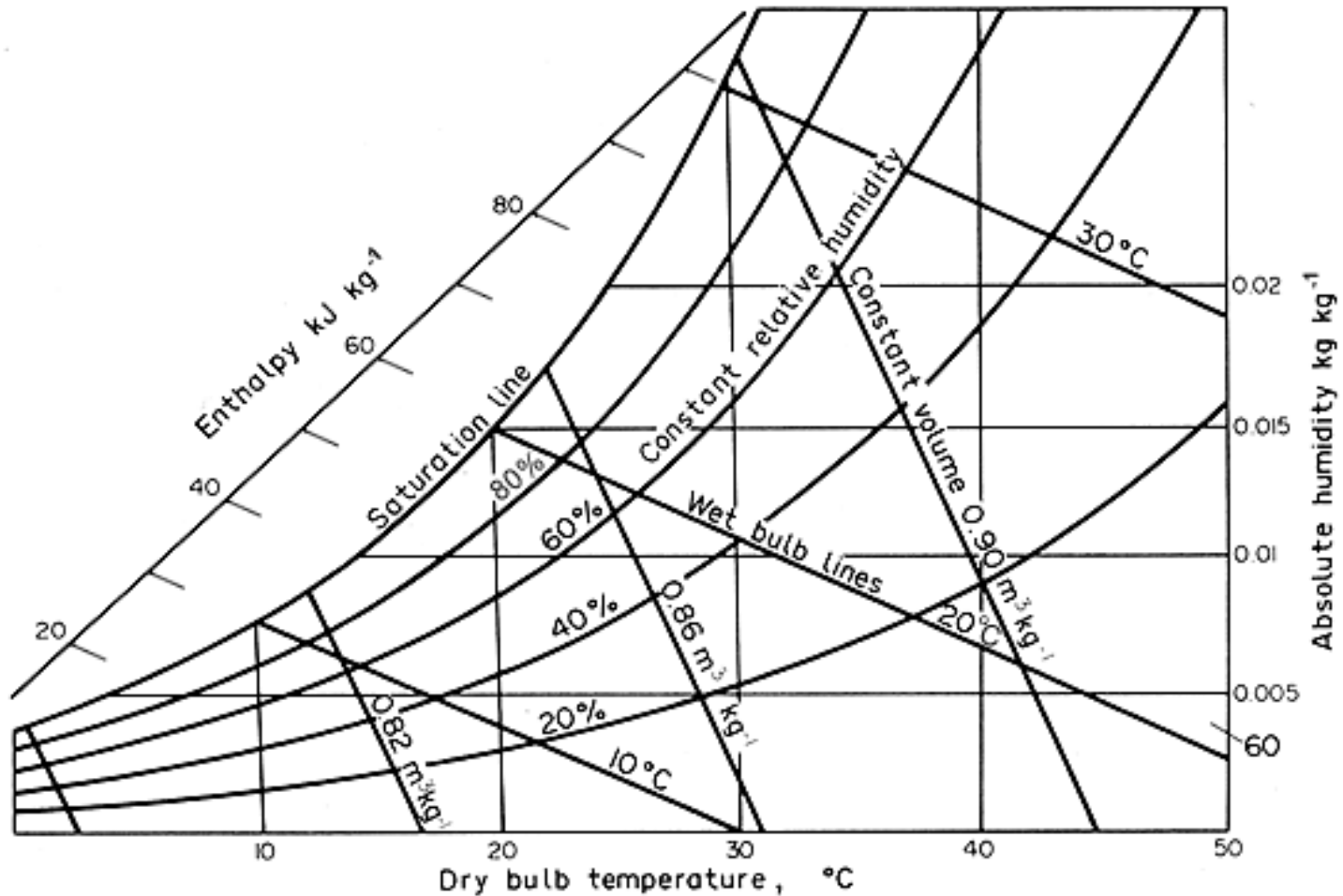
Mientras más seco esté el aire, más rápida será la evaporación de la humedad de la mecha y menor será la  $T_{bh}$

Solamente en el sistema de vapor de agua – aire, la **temperatura de bulbo húmedo coincide con la temperatura de saturación adiabática.**

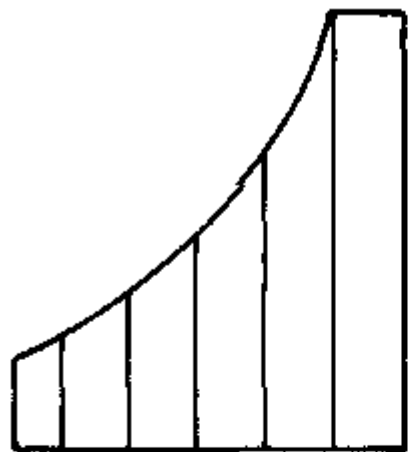
## Diagrama psicrométrico

Las propiedades de las mezclas aire-vapor de agua están interrelacionadas y pueden ser calculadas por ecuaciones matemáticas.

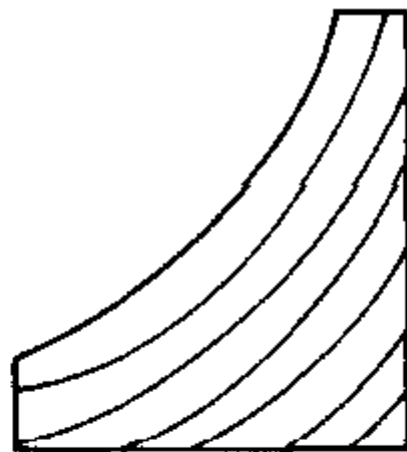
El diagrama psicrométrico es la representación gráfica de las ecuaciones analíticas descritas para las mezclas aire-vapor de agua.



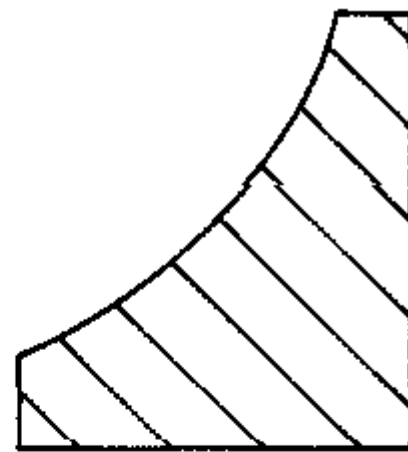




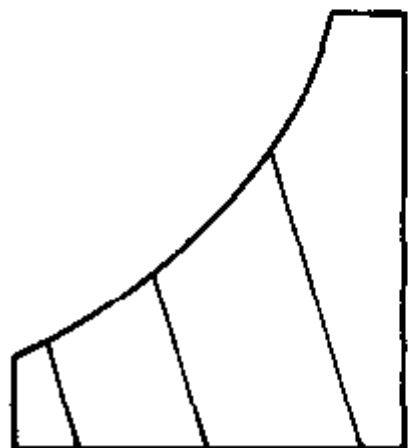
TEMP. BULBO SECO ( $^{\circ}\text{C}$ )



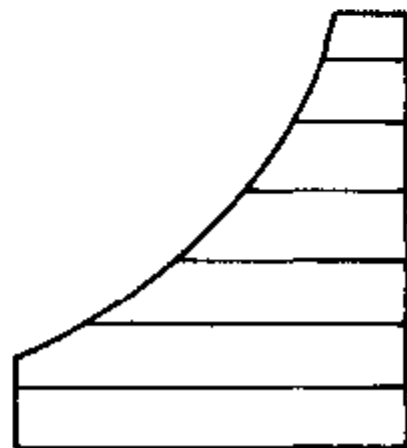
HUMEDAD RELATIVA (%)



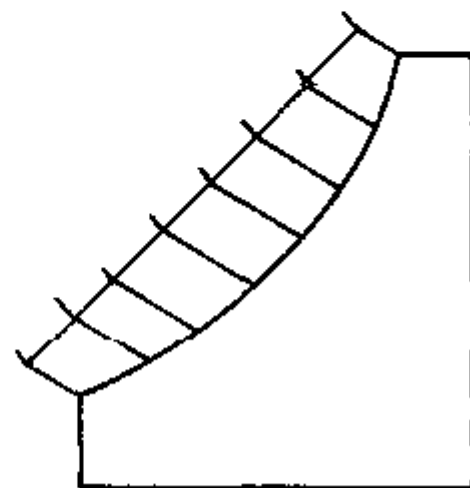
TEMP. BULBO HUMEDO ( $^{\circ}\text{C}$ )



VOLUMEN ESPECIFICO  
( $\text{m}^3/\text{kg}$  DE AIRE SECO)

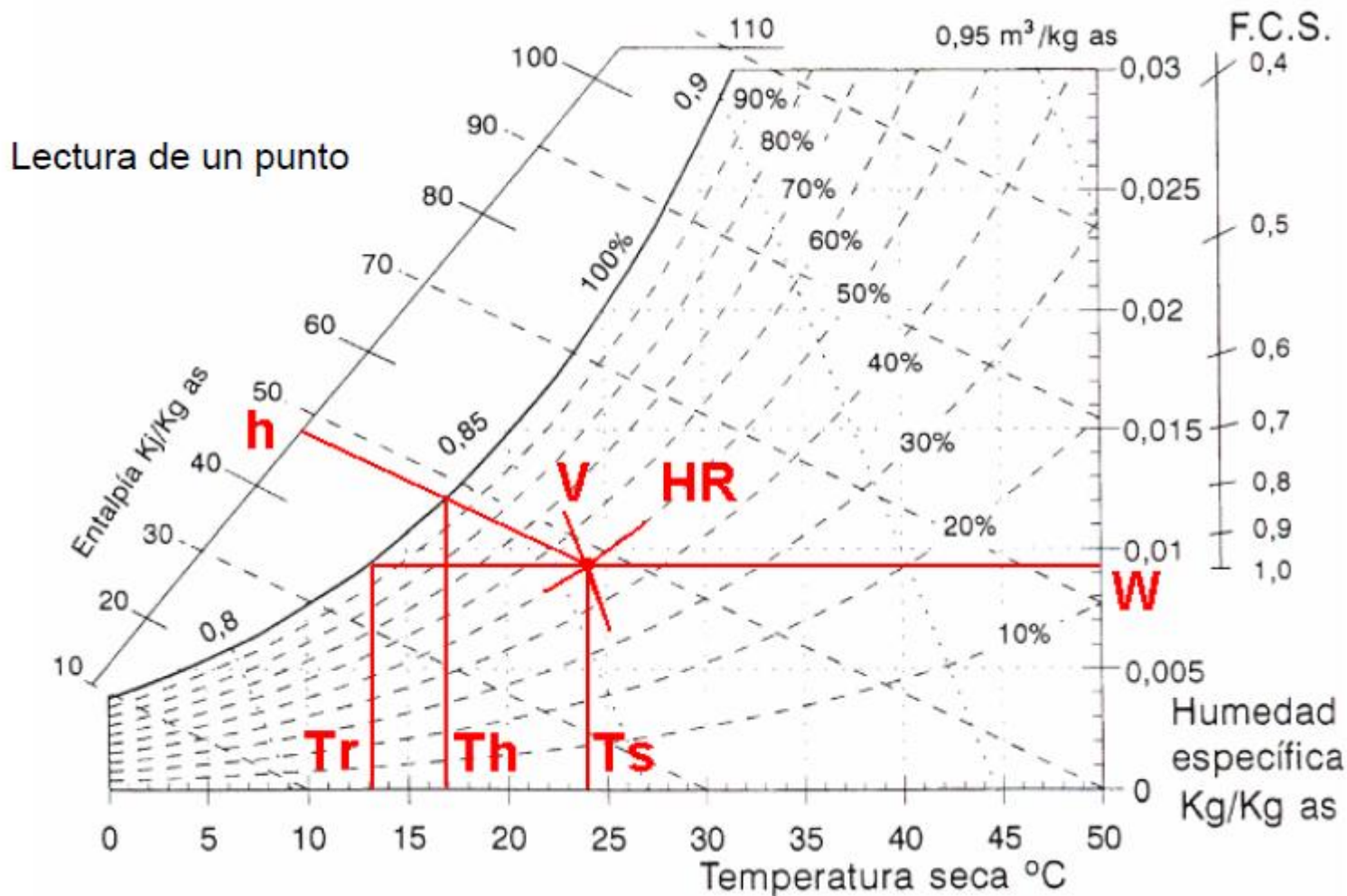


RAZON DE HUMEDAD  
( $\text{kg}$  DE VAPOR /  $\text{kg}$  DE AIRE SECO)



ENTALPIA  
( $\text{kJ}/\text{kg}$  DE AIRE SECO)

Determinación de propiedades de una mezcla aire-vapor de agua, en un diagrama psicrométrico.



# Utilización del diagrama psicrométrico para el análisis de procesos de acondicionamiento del aire

## Calentamiento – enfriamiento simple

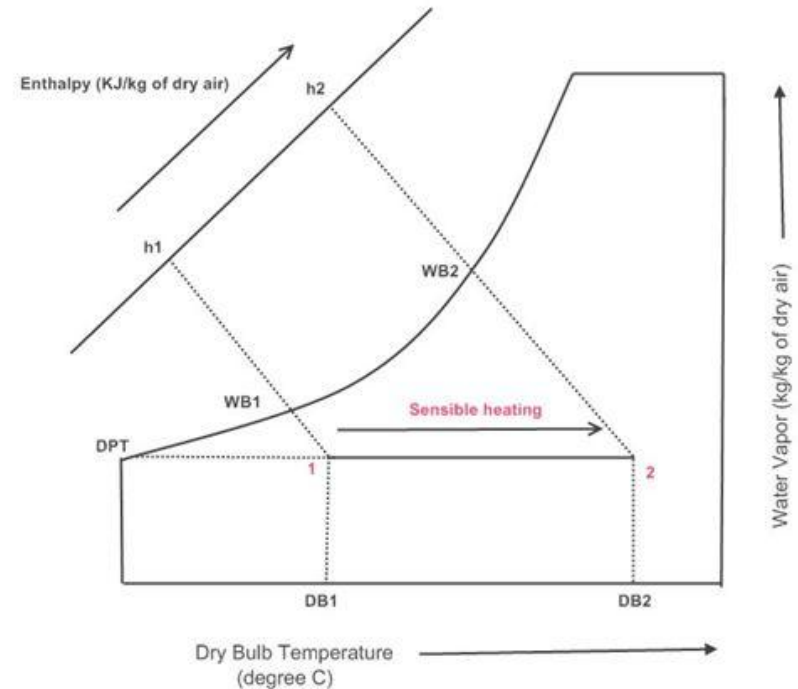
Balance de materia

$$\dot{m}_{G1} = \dot{m}_{G2} = \dot{m}_G$$
$$Y_1 = Y_2$$

Balance de energía

$$\dot{q} = \dot{m}_G (H_2 - H_1)$$

m: masa aire seco (kg/h)



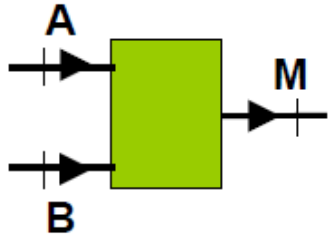
### CALENTAMIENTO (W = cte)

- Propio de sistemas de calefacción residenciales (estufa, resistencia eléctrica...)
- Línea de W = cte en la dirección de aumento de Tbs y disminución de la Hr

### ENFRIAMIENTO (W = cte)

- Línea de W = cte, en la dirección de disminución de Tbs con aumento de la Hr

# Mezcla de dos masas de aire (A y B) con distinta humedad



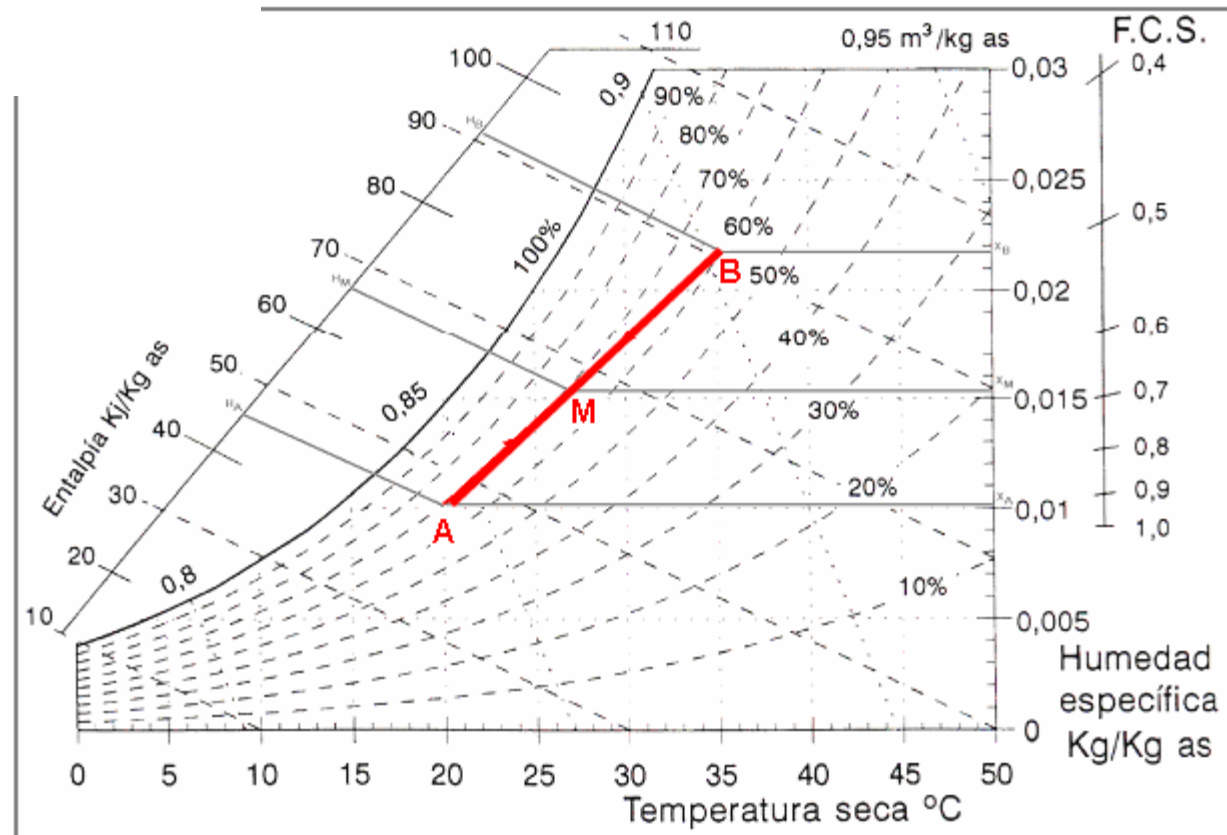
$$G_A + G_B = G_M$$

$$G_A w_A + G_B w_B = G_M w_M$$

$$G_A h_A + G_B h_B = G_M h_M$$

La mezcla (M) situada en la recta que une los dos puntos

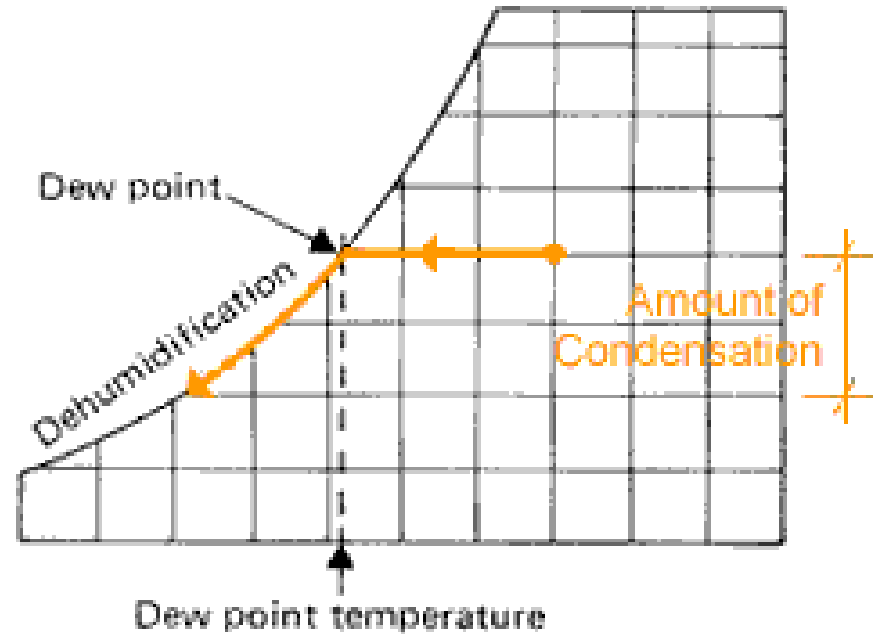
G es la masa de aire (kg)  
w humedad específica



## Enfriamiento con deshumidificación

Necesario si la humedad relativa alcanza niveles extremadamente altos durante el enfriamiento a  $W = \text{cte}$

El aire caliente y húmedo entra en la sección de enfriamiento, su  $T$  disminuye y su humedad relativa aumenta a  $W = \text{cte}$



Si la sección de enfriamiento es suficientemente largo el aire sale saturado.

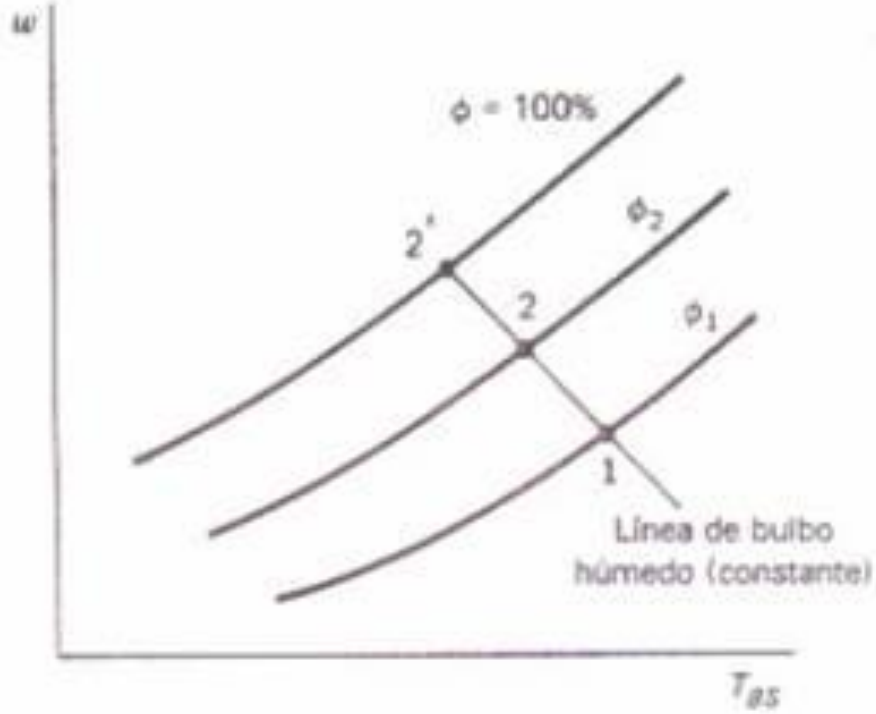
El enfriamiento adicional del aire provocará la condensación de parte la humedad

El aire permanece saturado durante todo el proceso de condensación, sigue la línea de saturación hasta el estado final

# Enfriamiento y humidificación

Pasando aire por pulverizadores de agua en una cámara térmicamente aislada  
Se realiza a  $T_{bh} \sim cte \Rightarrow H \sim cte$

El aire se atura adiabáticamente

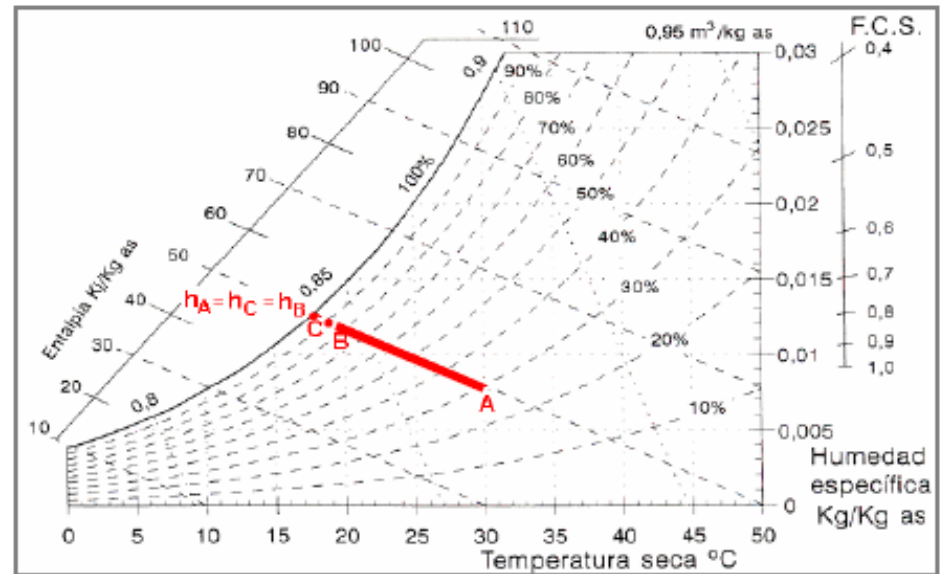


# Secado

Cuando se hace pasar aire caliente a través de un lecho de alimentos húmedos



El proceso puede describirse en el diagrama como un proceso de saturación adiabática



El calor de vaporación necesario para secar el alimento proviene solamente del aire seco (sin transmisión de calor desde y hacia el exterior).

Conforme el agua pasa a través del sólido parte del calor sensible del aire es convertido en calor latente y en consecuencia más agua pasa al aire.

$$T_{bs} \text{ disminuye, } H \sim \text{cte} \Rightarrow T_{bh} \sim \text{cte}$$

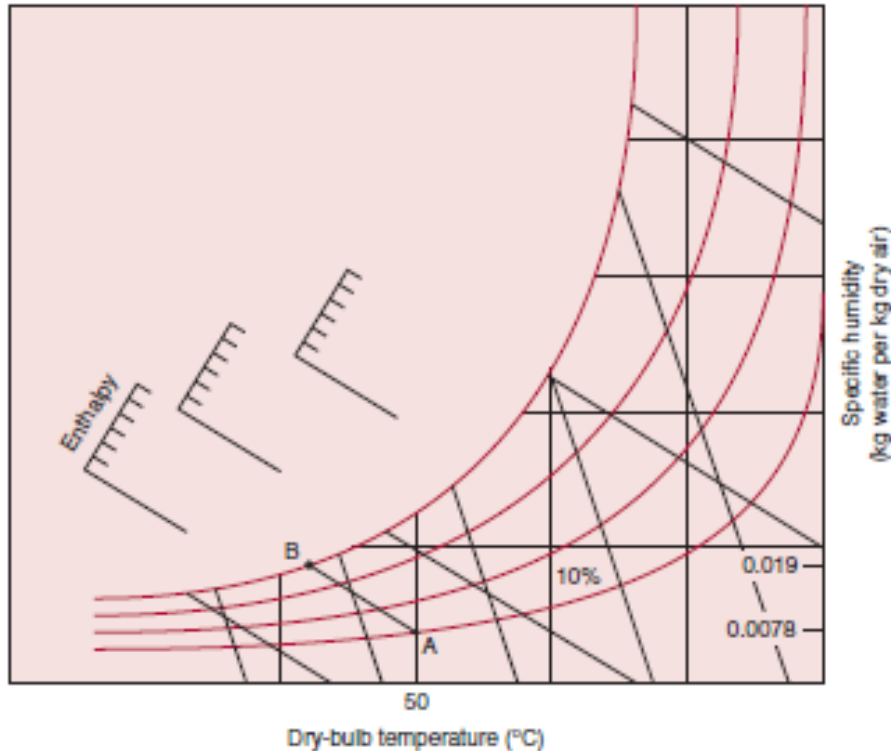
## EJEMPLO 1

Encuentre las propiedades de un aire húmedo cuando la temperatura de bulbo seco es de  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$  y la de bulbo húmedo de  $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Determinar humedad absoluta y relativa, entalpía, Volumen específico y punto de rocío.



## EJEMPLO 2

El aire a 50 °C y 10% de humedad relativa se utiliza para secar arroz en un silo. El aire sale del silo bajo condiciones saturadas. Determine la cantidad de agua removida por kg de aire



1. Ubicar el aire de entrada en la tabla. Leer el valor de humedad absoluta (0.0078 kg agua/kg aire seco).
2. Seguir la línea de entalpía constante (temperatura de bulbo húmedo constante) hasta saturación (B).

3. Leer el valor de humedad absoluta (0.019 kg agua/kg aire seco).

4. La cantidad de agua removida es  $0.019 - 0.0078 = 0.0112$  kg

kg agua/kg aire seco.

### EJEMPLO 3

En un secador continuo se insufla aire a 60 °C con un 8 % de humedad relativa y lo abandona a 35 °C. Calcule la cantidad de agua eliminada por kg de aire que pasa y el volumen de aire requerido para eliminar 20 kgh<sup>-1</sup> de agua.