

TECNOLOGIA DE LOS ALIMENTOS 2025

Conservación de alimentos por deshidratación

Fundamentos de la eliminación de agua.

Humedad de equilibrio.

Cinética del secado.

Efectos del secado sobre calidad de los alimentos.

Secado por aire.

Secaderos por conducción.

Secado en el estado congelado: liofilización.

SECADO-DESHIDRATACIÓN

¿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 %?

¿Cuáles son los mecanismos que producen la deshidratación de los alimentos?

¿Qué pasa con el agua? ¿Dónde se va?

¿A qué velocidad se seca bajo ciertas condiciones?

¿Cuáles son las condiciones más favorables de secado?

Equipamiento usado en la deshidratación de alimentos

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

Los procesos de deshidratación más comunes utilizan **aire caliente como medio de secado (o medio de eliminación del vapor)**

El aire entrega calor al producto para evaporar la humedad.

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

El aire debe tener menor presión de vapor de agua que el alimento (fuerza motriz transferencia de masa).

Entonces, las propiedades del aire son críticas para el secado



Propiedades de las mezclas aire-vapor

Propiedades PSICROMETRICAS

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

¿Cuál es la humedad relativa?

¿Porqué y cómo se produce la condensación de la humedad en un serpentín de enfriamiento?

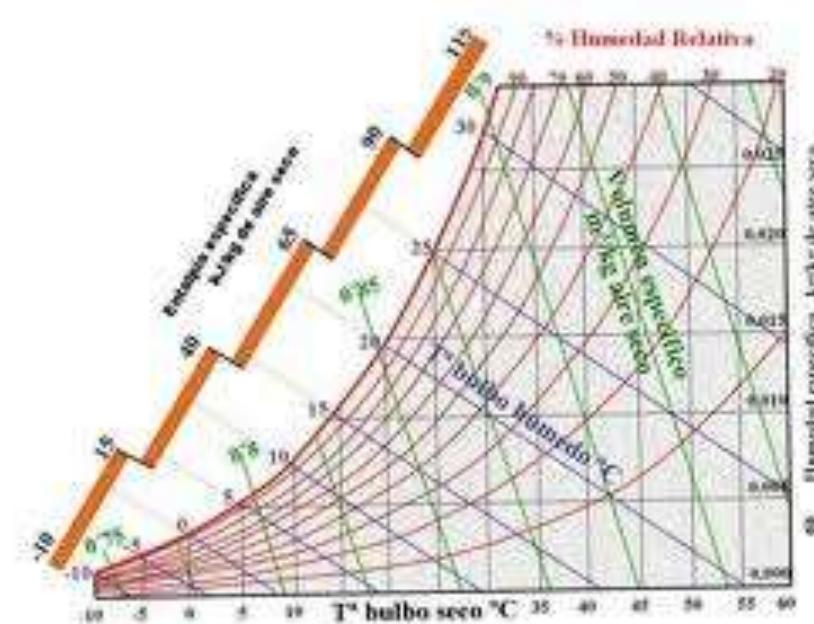
¿Por qué "suda" un ducto de aire frío?

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 diagramas psicrométricas (menos precisos pero más rápidos)



Muestran las propiedades termodinámicas del aire en diversas condiciones



Usos

- 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: presencia de vapor de agua 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.

Por costumbre, “decimos que el aire contiene humedad”

Propiedades del Aire

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

El aire seco ≠ gas puro (mezcla) (ley Dalton).

Los gases que los componen son verdaderos gases; para el propósito práctico, se considera a esta mezcla de gases como un solo compuesto, que sigue la ley de los gases.

El aire tiene peso, densidad, temperatura, calor específico, y baja conductividad térmica.

Retiene sustancias en suspensión y en solución.

Aire: mezcla de gases altamente sobrecalentados.

Cuando calentamos o enfriamos aire seco, solamente estamos agregando o quitando **calor sensible**.

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
	100.0000000



Propiedades del aire seco (as)

Volumen específico del aire seco (V_{as})

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

V_{as} : (m^3/kg)

R: constante de los gases
($\text{m}^3 \cdot \text{K} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$)

T: temp absoluta (K)

p_{as} : presion 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: $C_{pas} = 1,005 \text{ kJ/kg.K}$

Entalpía del aire seco (H_{as})

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

H_{as} : (kJ/kg)

T_a : temp de bulbo seco (°C)

T_0 : temp de referencia (°C)

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

En cálculos psicrométricos: presión atmosférica y 0°C

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.

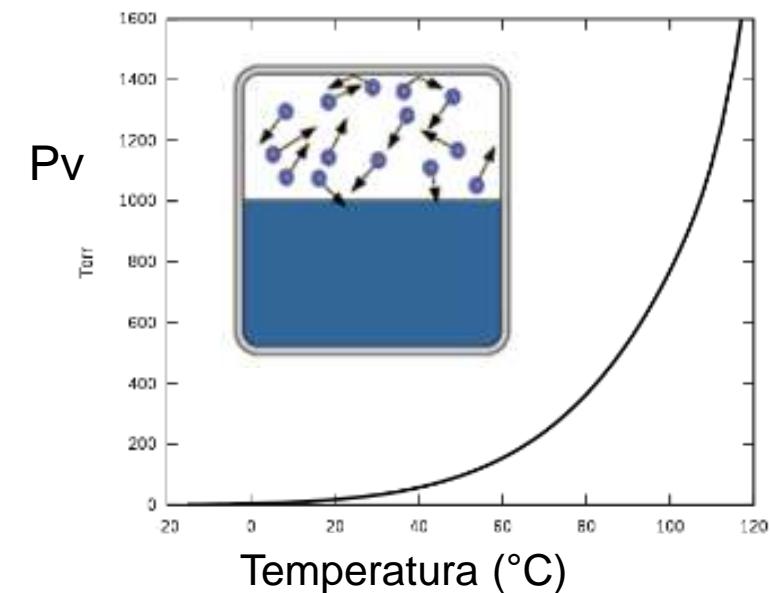
Aire y vapor de agua, existen juntos en un espacio dado al mismo tiempo.

El vapor de agua es producido por el agua, a cualquier temperatura.

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

Presión de vapor: presión ejercida por las moléculas en el estado vapor y en equilibrio dinámico con las moléculas del componente en estado líquido.

La 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 será la misma, y 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. Bajo ciertas condiciones, el aire puede contener gotas de agua en suspensión (niebla)

Volumen específico del vapor de agua (V_w)

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

V_w : (m³/kg)

R_w : constante de los gases para el vapor (m³.K.Pa/kg)

T: temp absoluta (K); p_w : presion parcial del va (Pa)

PM: 18,01534

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

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

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

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).
Presión atmosférica "normal" a nivel del mar, es de 101.325 kPa o de 760 mm de Hg



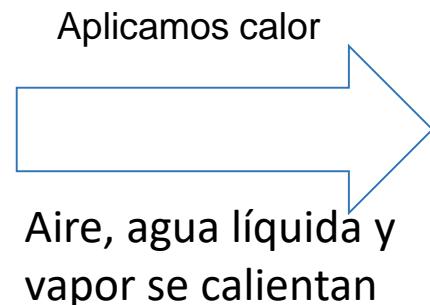
Sistema en equilibrio

$P_t = 101.325 \text{ kPa}$

$P_v = 1.70 \text{ kPa}$

Presión del aire seco = 99.625
kPa

Aire seco saturado con humedad. Término incorrecto, porque el aire en sí permanece seco, solamente está mezclado con el vapor de agua saturado, pero es un término conveniente



Nuevo equilibrio

Algo del agua se evaporó:

- >peso de vapor y P_v
- <Vol específico (m^3/kg) (mayor densidad)

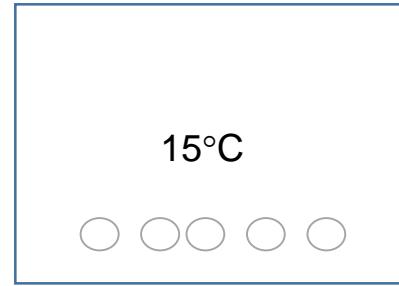
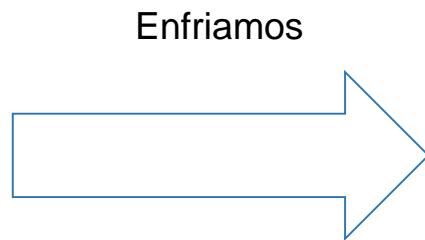
El aire se expandió:

- cuarto no sellado y algo de aire se escapa
- >Vol específico aire



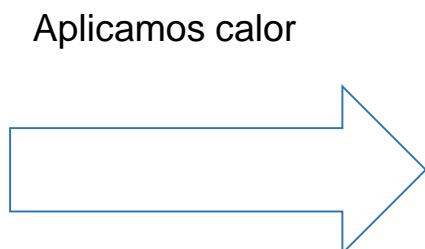
El aire ganó algo de capacidad para retener humedad (en realidad, el aire nada tiene que ver con eso, la temperatura es lo que cuenta)

Y si se enfriá el sistema de 21 a 15 °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 atmósfera 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)

Contenido de humedad

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 : fraccion molar del vapor de agua

x_{as} : fracción molar del as

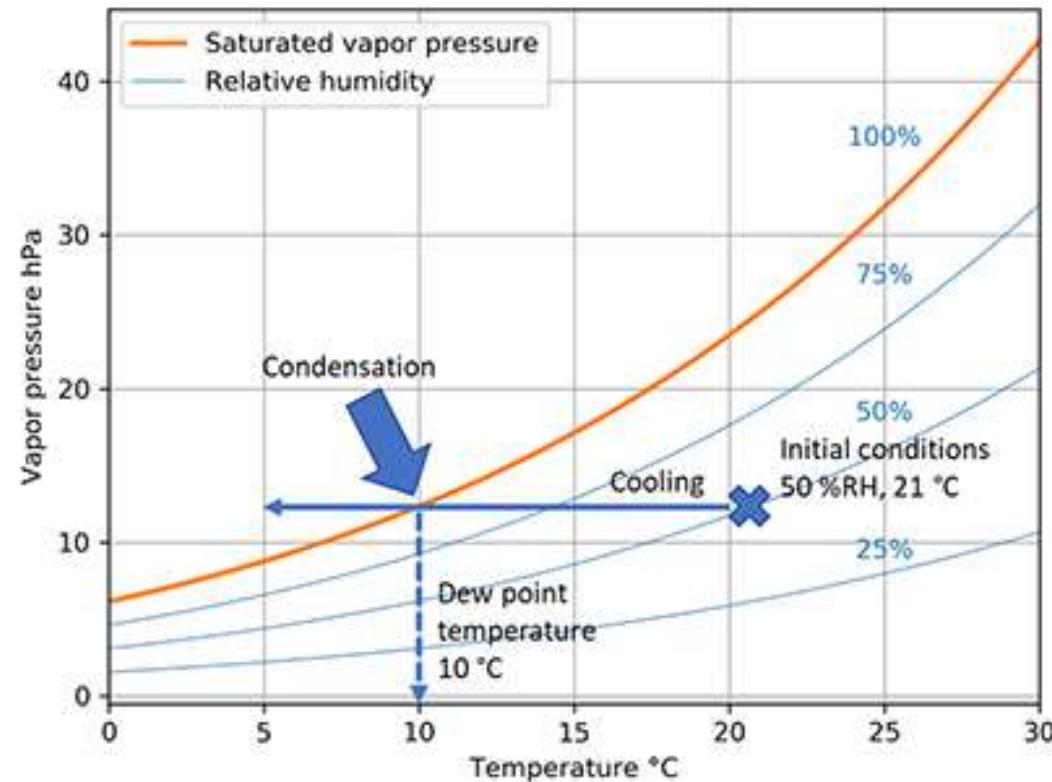
Temperatura o punto de rocío

Punto de rocío: temperatura debajo de la cual el vapor de agua en el aire comienza a condensarse.

El aire se encontrará saturado cuando su temperatura sea la de saturación correspondiente a la P parcial ejercida por el vapor de agua



También es el punto de 100% de humedad relativa



Calor específico aire húmedo o calor húmedo de una mezcla aire-vapor (C_s)

Es el calor que hay que suministrar a un kg de aire seco y al vapor que contiene, para elevar un grado de temperatura (a presión constante)

$$C_s = 1,005 + 1,88 * W$$

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

$$C_{pas} = 1,005 \text{ kJ/kg.K}$$

W: humedad (kg agua /kg as)

Volumen específico del gas húmedo o volumen húmedo (V_m)

Es el volumen específico ocupado por 1 kg de aire seco más el del vapor presente [m³/kg aire seco]. Se obtiene a partir de la ecuación del estado gaseoso ideal, en donde P es la presión, V el volumen R es una constante y T la temperatura y M la masa del gas

$$V_m = (0,082 * T_a + 22,4) * \left(\frac{1}{29} + \frac{W}{18} \right)$$

Entalpía específica o húmeda (H_s)

En el caso de los gases húmedos la entalpía específica es la suma del calor sensible de una masa de gas, y el calor latente de vaporización a la temperatura a la que se refieren las entalpías.

$$H_m = C_s * (T - T_0) + L * W$$

L: es el calor latente de vaporización del agua a T_0

Saturación adiabática del aire

Este fenómeno ocurre cuando el aire se encuentra en contacto con una gran superficie de agua en **condiciones adiabáticas (no ganancia/pérdida de calor con respecto al exterior)**.

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.

La **temperatura de saturación adiabática** es la alcanzada por una masa gaseosa cuando se pone en contacto en un líquido en condiciones adiabáticas.

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

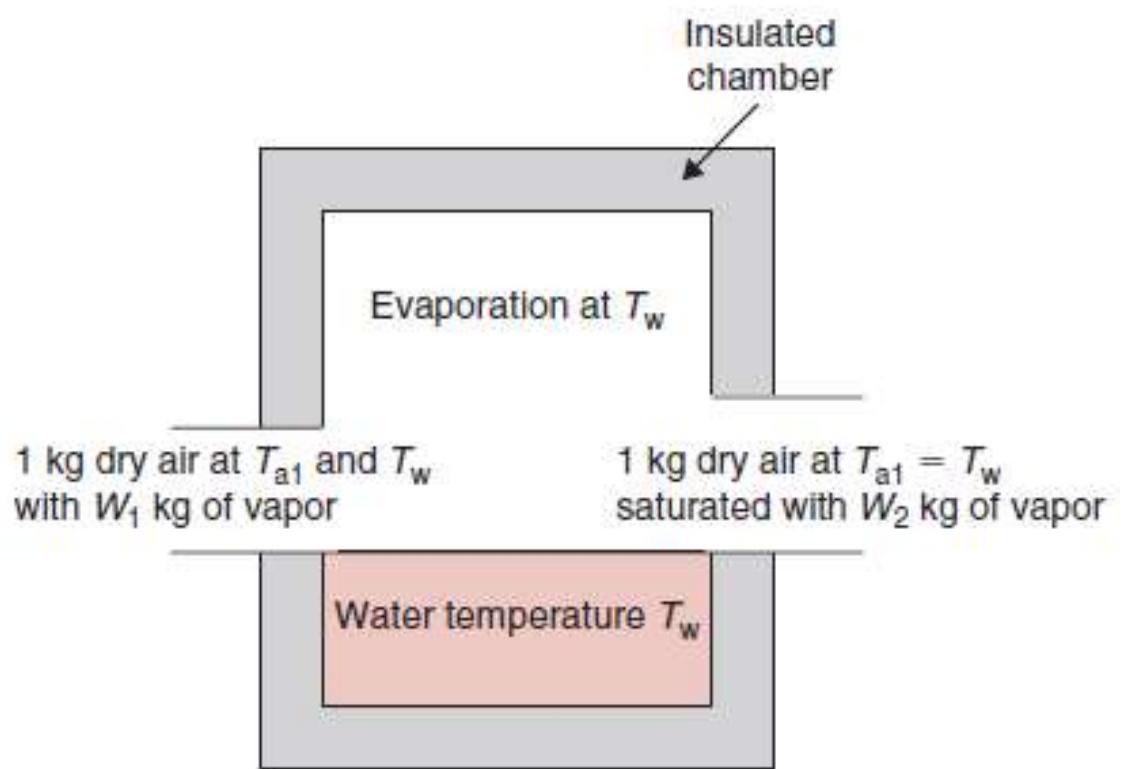
T_{a1} : Temp aire entrada

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

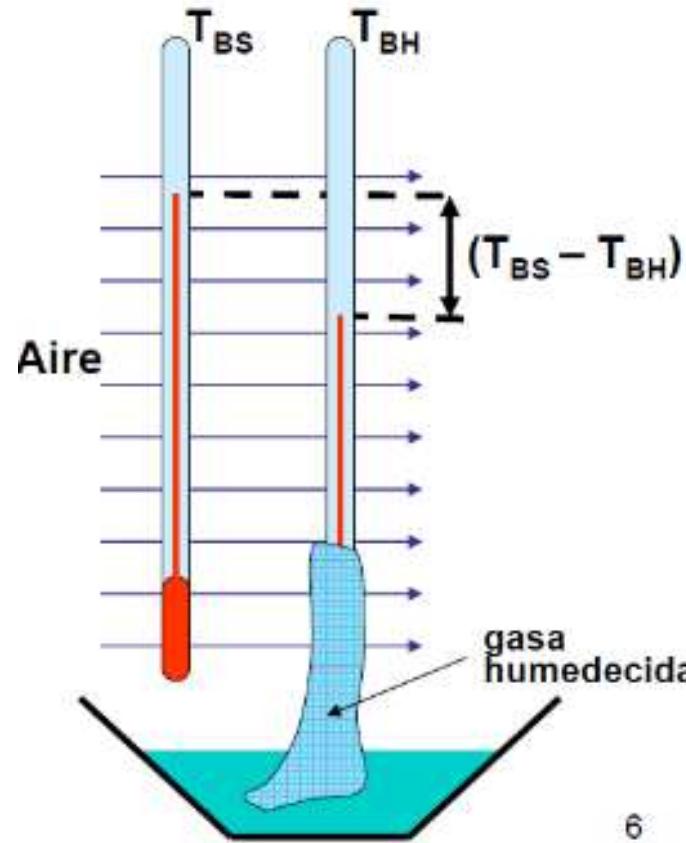
L: es el calor latente de vaporización del agua a T_{a2}

W_1 : humedad aire entrada

W_2 : humedad aire salida (saturación)



Termómetro de Bulbo Húmedo, T_{bh}



Propiedad del aire de la carta psicrométrica.
Corresponde a la temperatura medida con un termómetro de bulbo húmedo.

Cuando el paño 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 del paño y produce un descenso de la temperatura del bulbo cubierto.

Cuando la T del paño desciende por debajo a la T de bulbo seco del aire, el calor fluye desde el aire al paño y tiende a aumentar su T.

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

Termómetro de Bulbo Húmedo, T_{bh}

Como reaccionaría la temperatura de bulbo húmedo si:

- Aire estuviese saturado con humedad
- Aire seco

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}

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

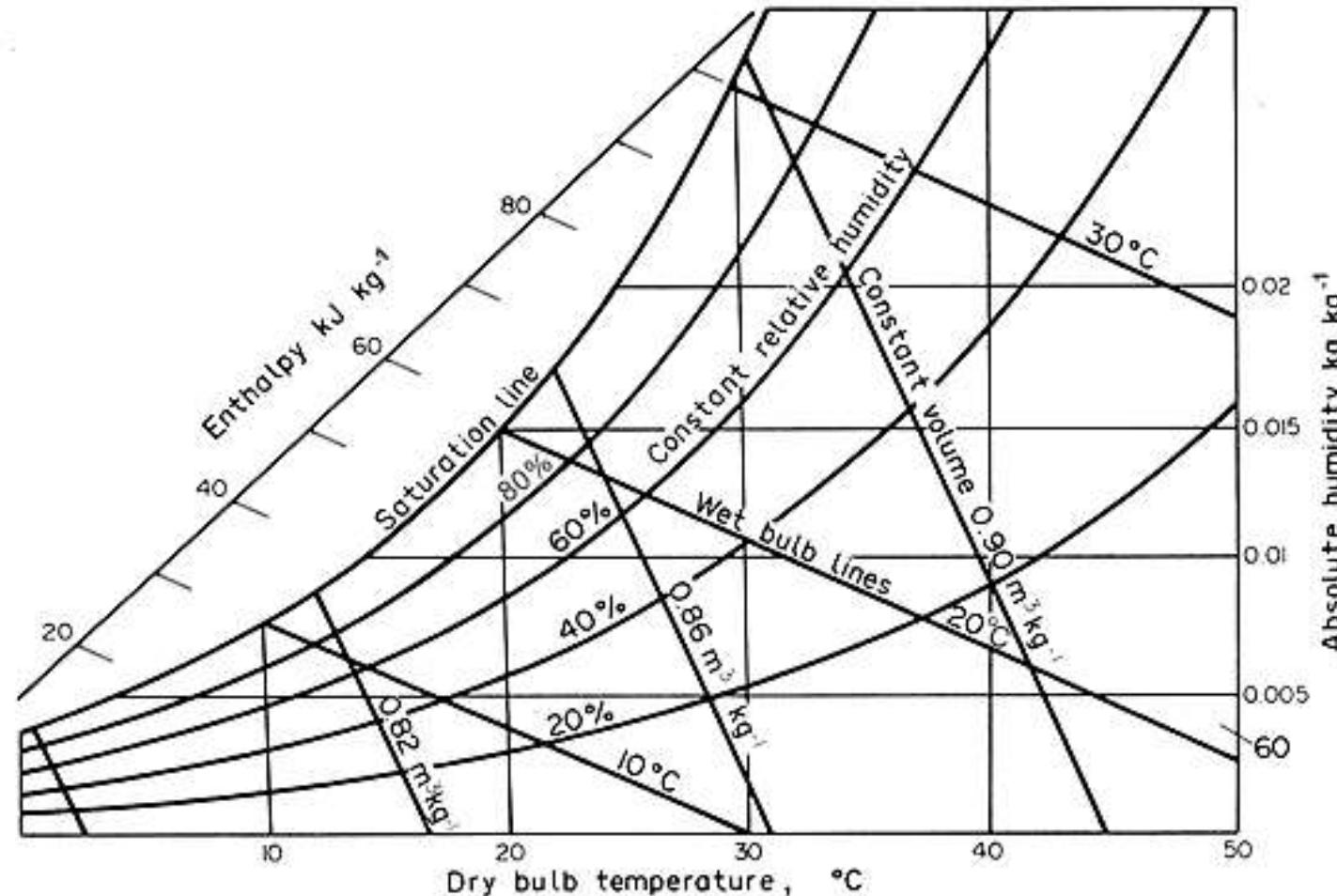
$(T_{BS} - T_{BH})$ en tablas \Rightarrow HR

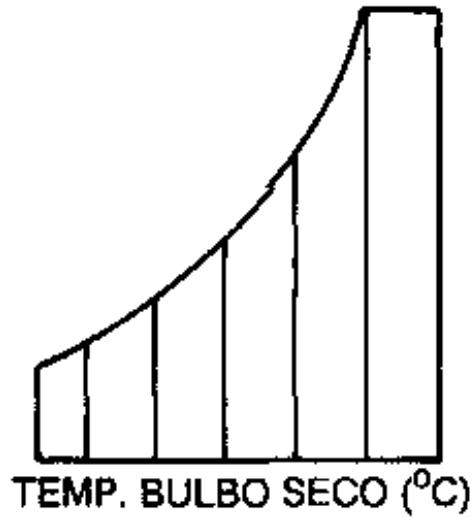
$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } (T_{BS} \gg T_{BH}) \Rightarrow \text{HR baja} \\ \text{Si } (T_{BS} \approx T_{BH}) \Rightarrow \text{HR alta} \end{array} \right.$

Diagrama psicrométrico

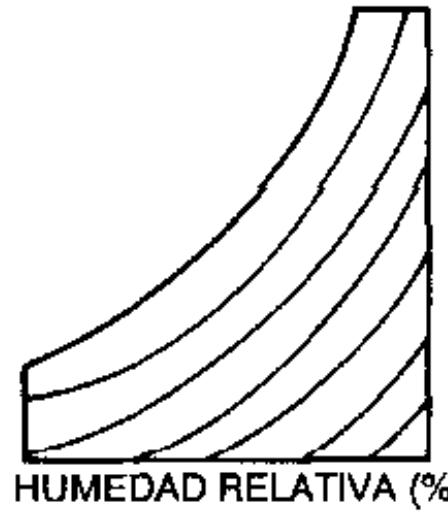
Las propiedades de las mezclas aire-vapor de agua están interrelacionadas y pueden ser calculadas por ecuaciones matemáticas.

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

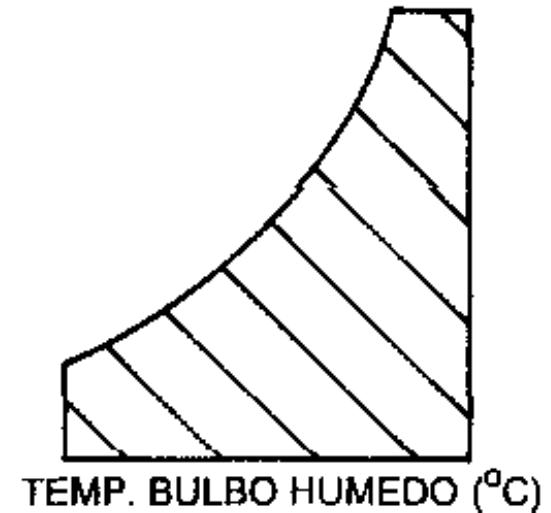




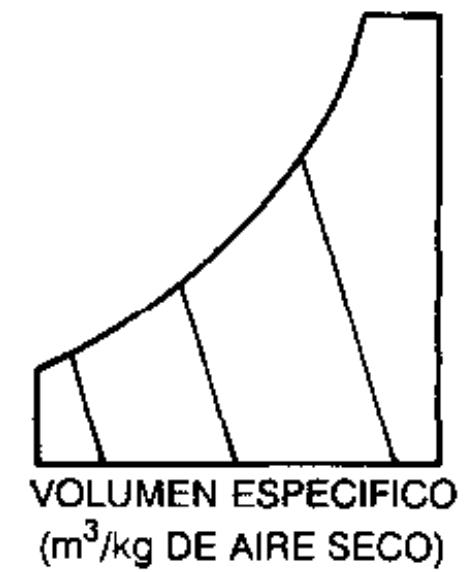
TEMP. BULBO SECO ($^{\circ}$ C)



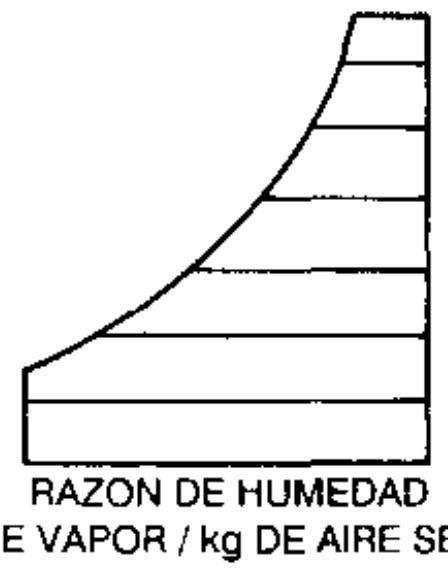
HUMEDAD RELATIVA (%)



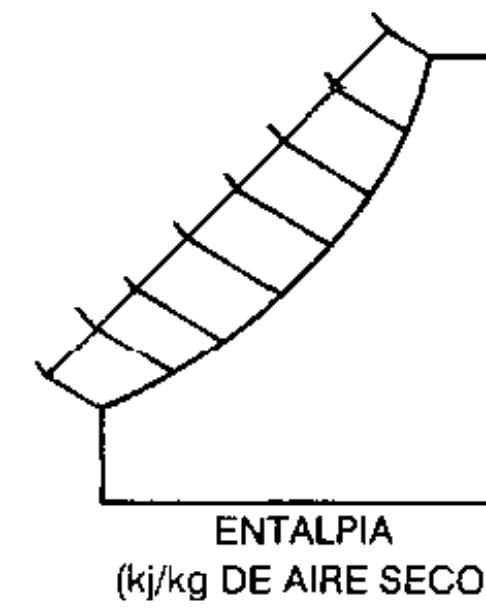
TEMP. BULBO HUMEDO ($^{\circ}$ C)



VOLUMEN ESPECIFICO
(m^3 /kg DE AIRE SECO)



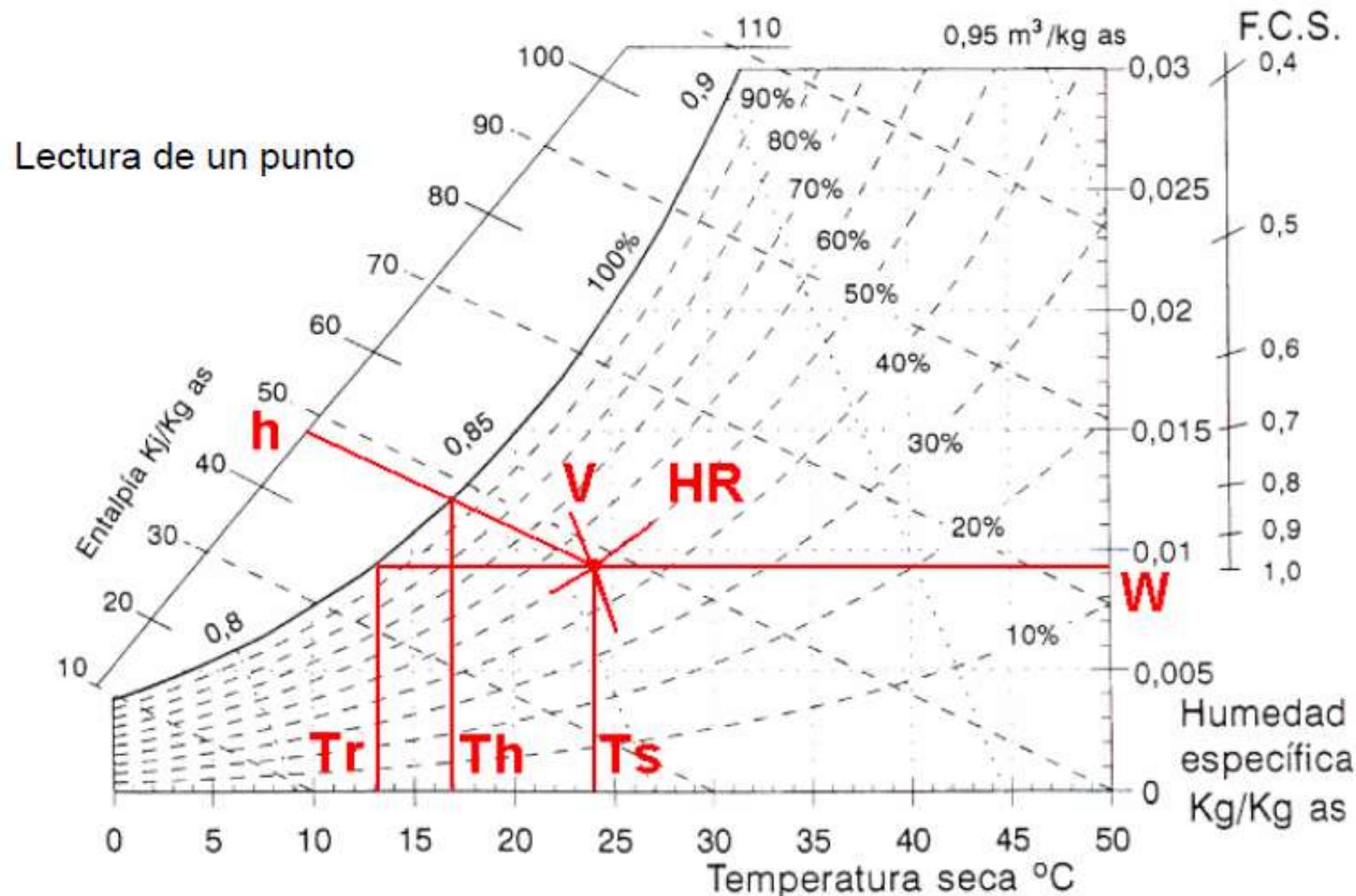
RAZON DE HUMEDAD
(kg DE VAPOR / kg DE AIRE SECO)



ENTALPIA
(kj/kg DE AIRE SECO)

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

Para utilizar esta tabla, se debe conocer al menos dos propiedades del aire



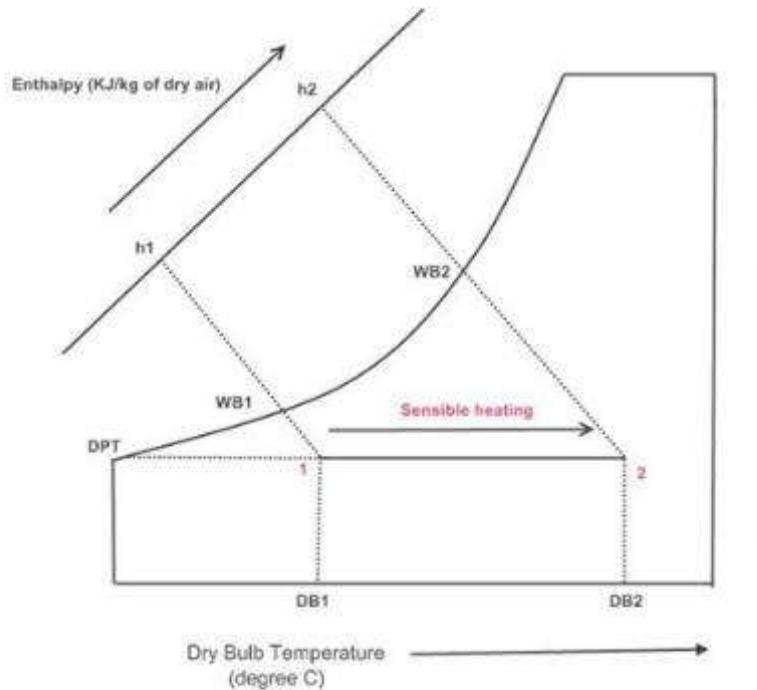
Calentamiento – enfriamiento simple

Balance de materia

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

Balance de energía

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



CALENTAMIENTO ($W = \text{cte}$)

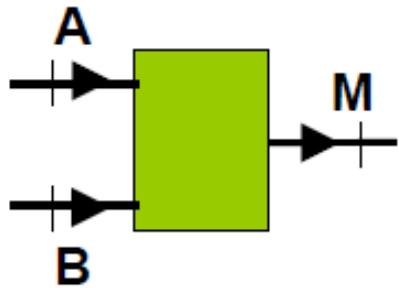
- Propio de sistemas de calefacción residenciales (estufa, resistencia eléctrica...)
- Línea de $W = \text{cte}$ en la dirección de aumento de Tbs y disminución de la Hr

ENFRIAMIENTO ($W = \text{cte}$)

- Línea de $W = \text{cte}$, en la dirección de disminución de Tbs con aumento de la Hr

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

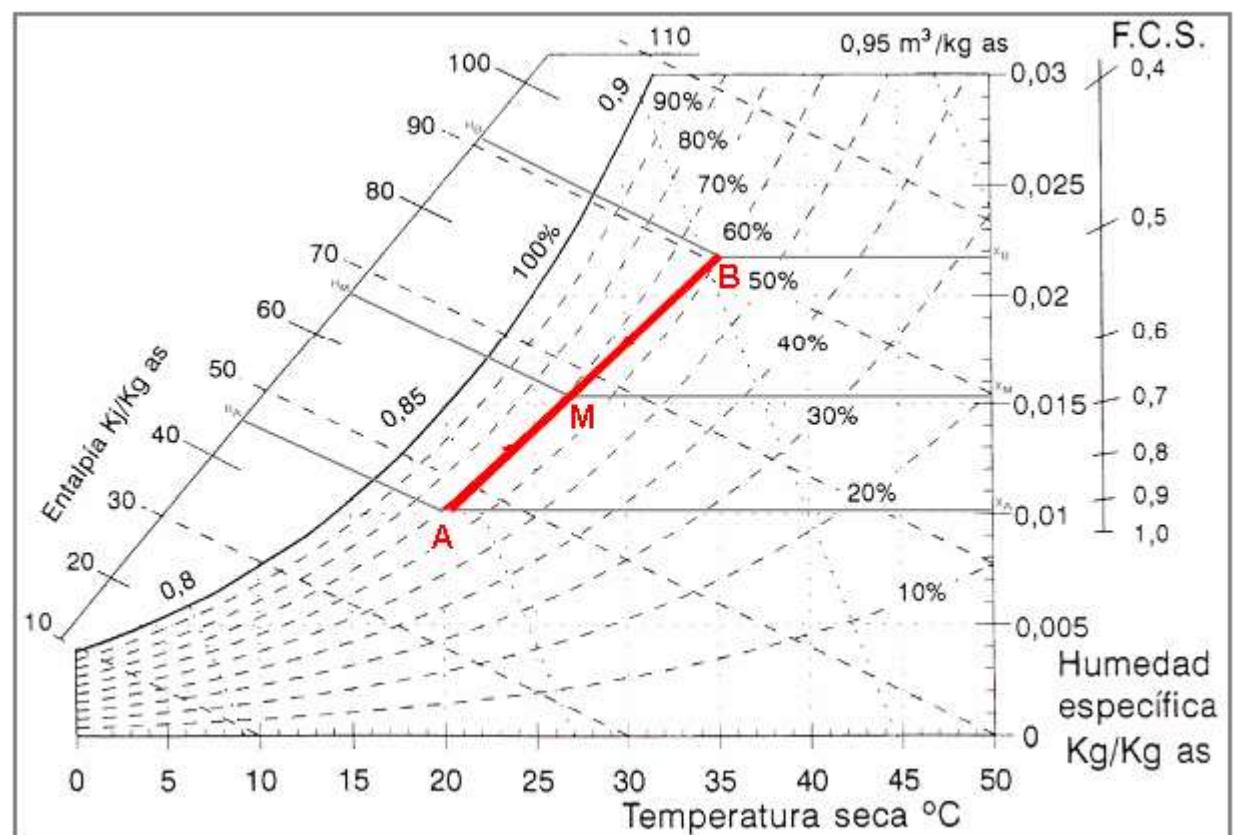
Balance de masa y energía



$$G_A + G_B = G_M$$
$$G_A w_A + G_B w_B = G_M w_M$$
$$G_A h_A + G_B h_B = G_M h_M$$

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

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

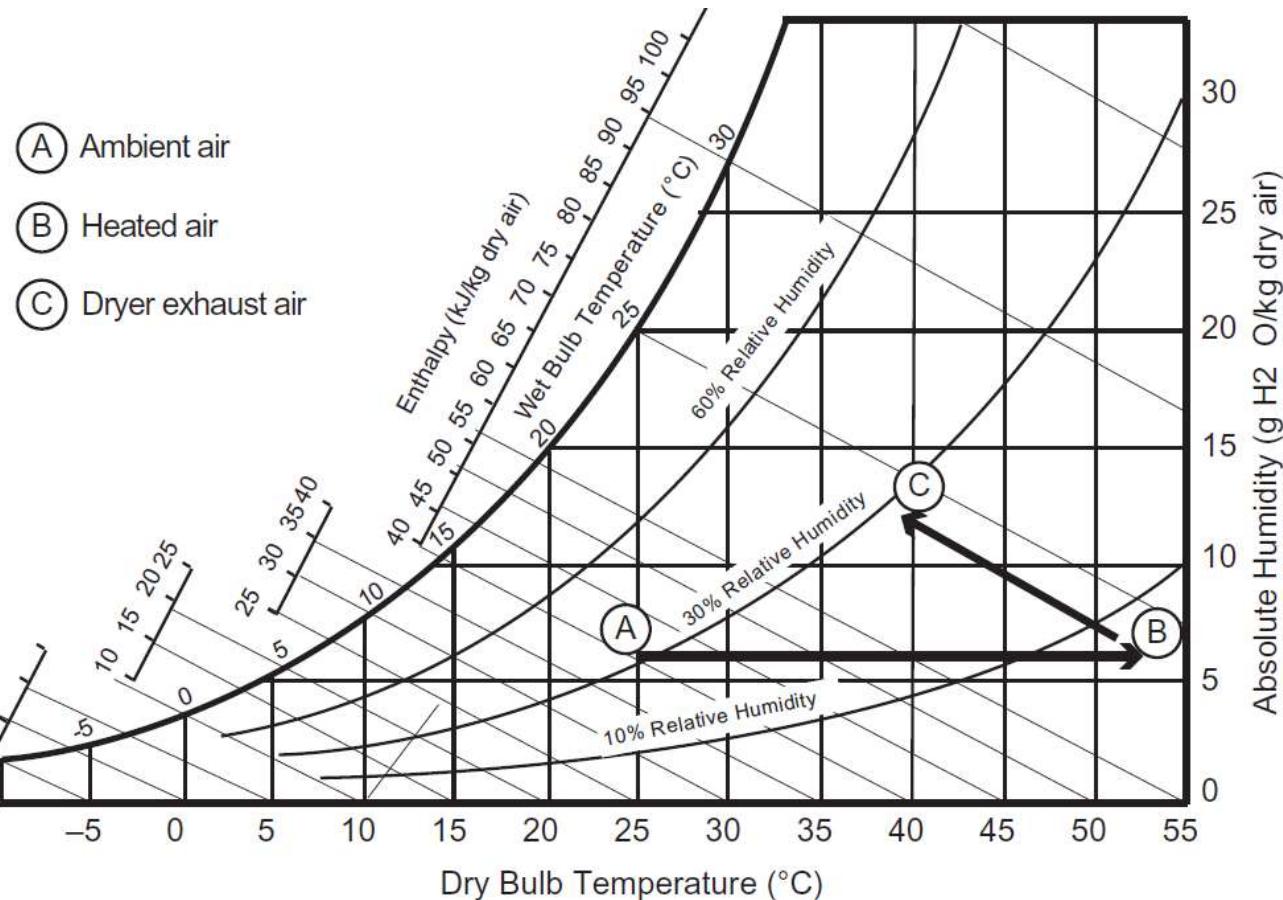


Calentamiento de aire + Secado

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



Los procesos pueden describirse en el diagrama como: calentamiento del aire (A-B) y de saturación adiabática (B-C)



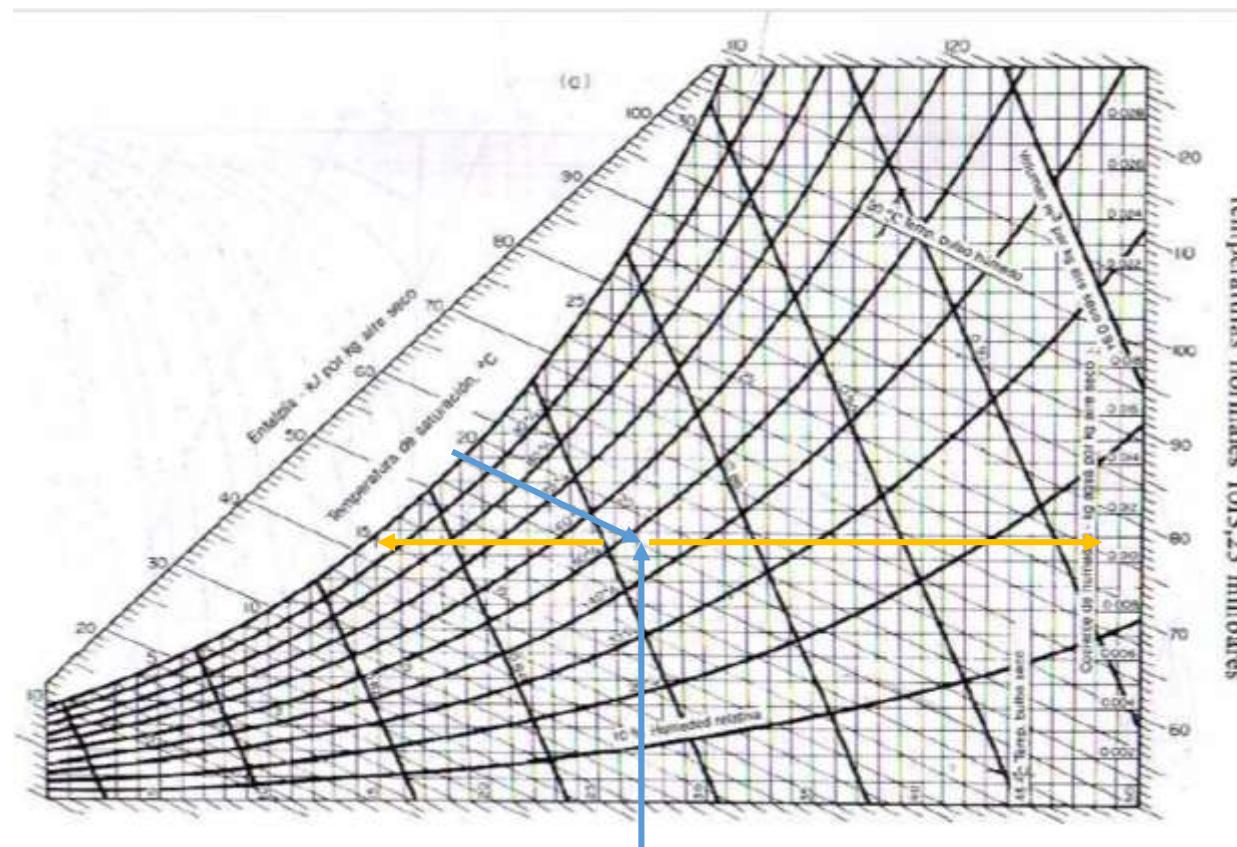
El calor de vaporación necesario para secar el alimento proviene solamente del aire seco (sin transmisión de calor desde y hacia el exterior).

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.

$$T_{bs} \text{ disminuye, } H_{\text{aire húmedo}} = \text{cte} \Rightarrow T_{bh} \sim \text{cte}$$

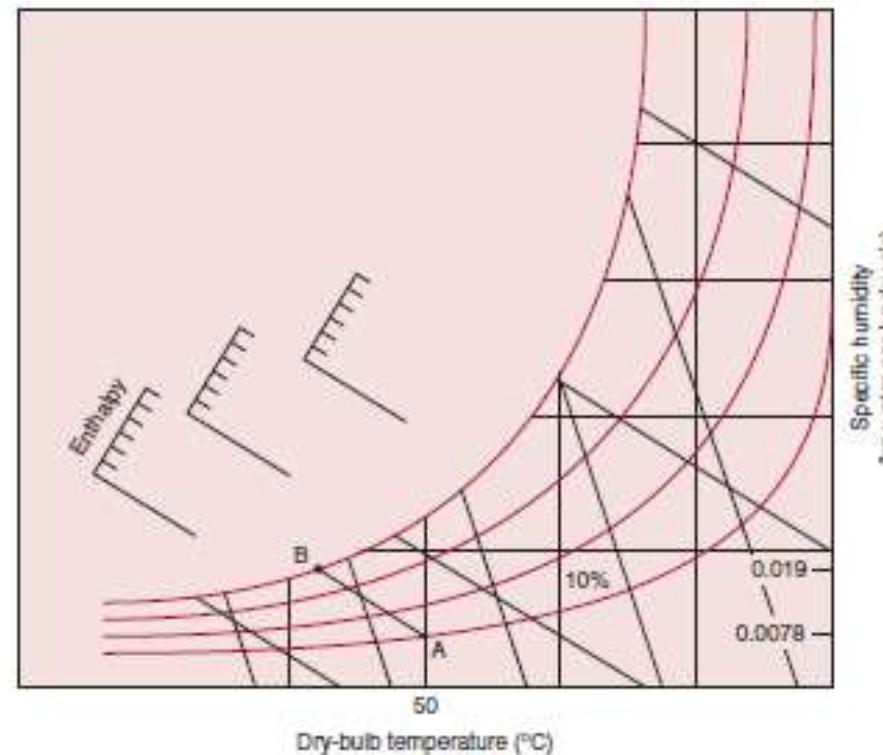
EJEMPLO 1

Encuentre las propiedades de un aire húmedo cuando la temperatura de bulbo seco es de 27 °C y la de bulbo húmedo de 19 °C. Determinar humedad absoluta y relativa, entalpía, Volumen específico y punto de rocío.



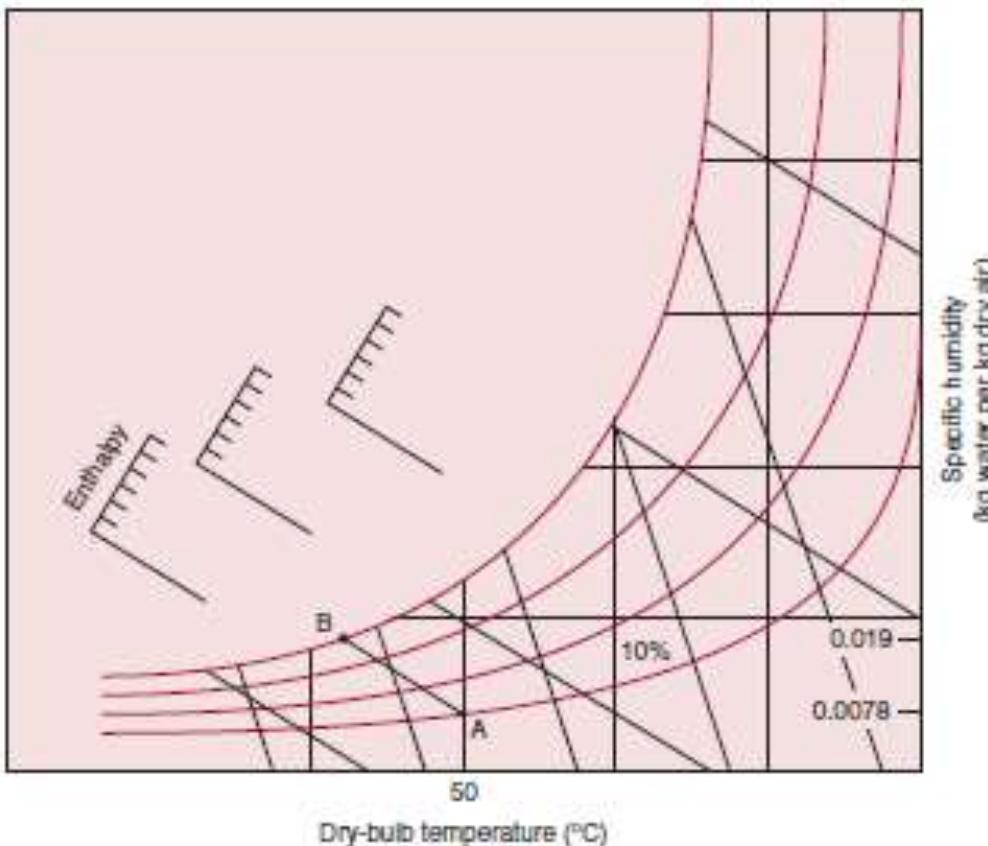
EJEMPLO 2

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



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.
2. 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 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^{-1} de agua.

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 kg h^{-1} de agua.



Free online Psychrometric Calculator

Print

OIP SI

altitude

0

m

b press

101325

Pa

T (°C) dry bulb	rH (%) rel.humidity	TDP (°C) dew point	W (kg/kg) abs. humidity	h (kj/kg) enthalpy	Tw (°C) wet bulb	sp. vol (m³/kg)	Calculate	Remove
60	8	14	0,00995	86,3	26,9	0,96		
35	56,8	25,2	0,02028	87,2	26,9	0,9		

$$0,020 - 0,009 = 0,011 \text{ kg w/kg as}$$

$$20 \frac{\text{kg w}}{\text{h}} * \frac{1}{0,011} \frac{\text{kg as}}{\text{kg w}} * 0,96 \frac{\text{m}^3}{\text{kg as}} = 1745 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$