

Recordatorio de Psicrometría

IIQ2023 - Operaciones Unitarias II

José Rebolledo Oyarce

1 de Junio de 2021

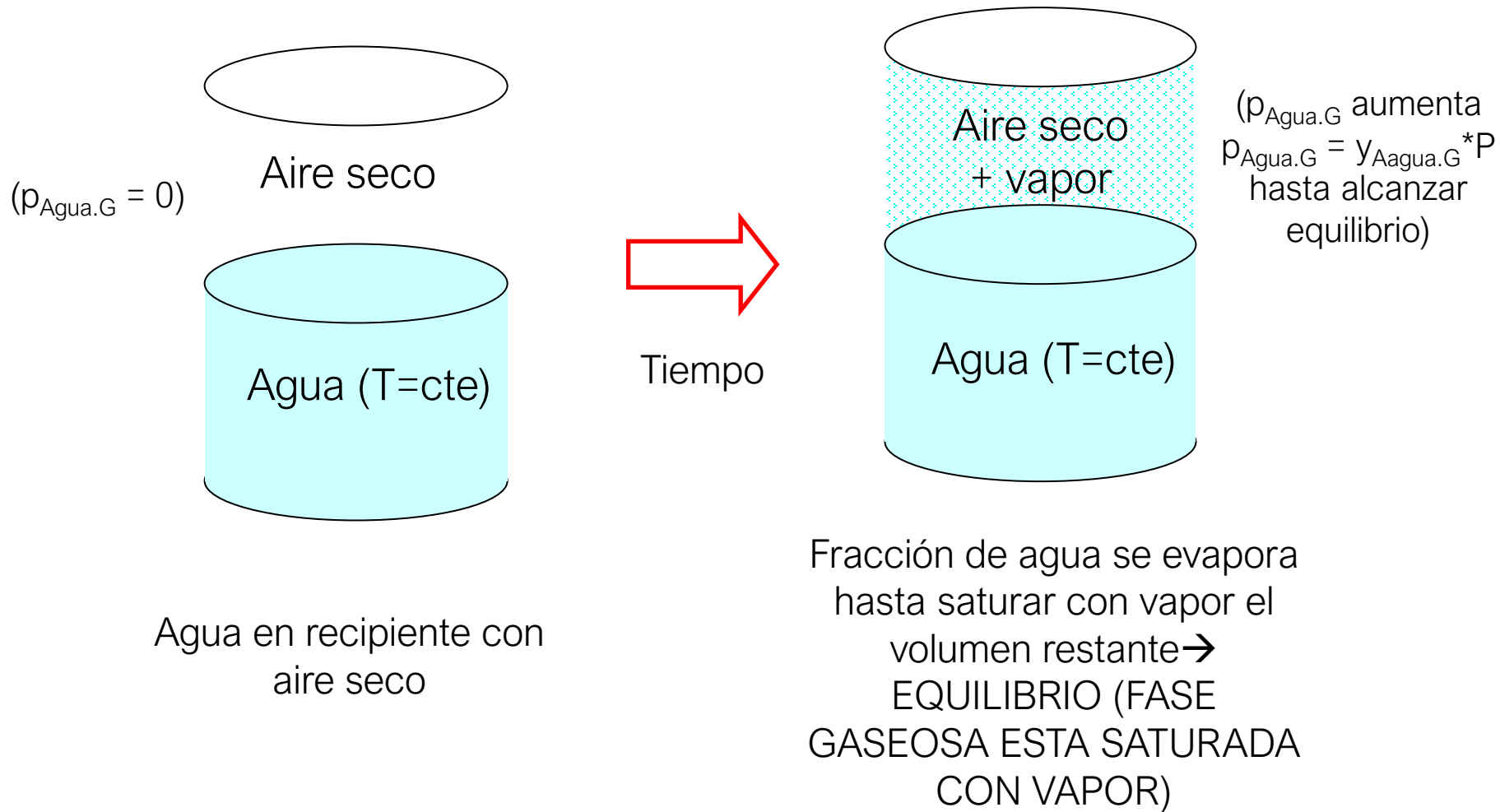


- Objetivos de la Clase
- Psicrometría
 - ¿Qué es la Psicrometría?
 - Parámetros de Importantes en las mezclas gas-vapor
 - Carta Psicrométrica
 - Proceso de Enfriamiento Adiabático

Objetivos de la Clase

- Revisar las relaciones que surgen en un sistema aire-agua y la carta psicrométrica.
- Comprender el proceso de enfriamiento adiabático (saturación adiabática).

Humidificación: ¿Qué pasa físicamente?



¿Qué es la Psicrometría?

La psicrometría o higrometría es el campo de la ingeniería que se dedica a estudiar las **propiedades físicas y termodinámicas** de las mezclas de gas y vapor.

Es decir, se dedica a estudiar cómo estas mezclas se relacionan y alcanzan el equilibrio debido **al contacto íntimo** que existe entre los compuestos.

El caso más estudiado de la psicrometría es la **mezcla de aire-agua**, debido a su aplicación en la industria de los alimentos



Una de las formas de generar alimentos con una mayor vida útil es hacerlos pasar por un proceso de secado y para ellos es importante entender las propiedades de la mezcla de aire-agua

Fracción Molar de la Mezcla (z) y Humedad absoluta (W)

La fracción molar de la mezcla es la razón entre la cantidad de moles del vapor del compuesto A (agua u otro solvente) y la cantidad de moles del gas (aire u otro gas transportador de materia).

$$z = \frac{\text{Moles de vapor}}{\text{Moles de gas seco}} = \frac{y_A}{1 - y_A} = \frac{p_A}{P - p_A}$$

Donde y_A es la concentración del compuesto vaporizado A que está en el gas, P es la presión total del sistema y p_A es la presión parcial del compuesto vaporizado A que está en el gas. También es común expresarlo como ppm ($ppm = 10^6 z$)

Adicionalmente, de la expresión anterior, también sabemos el que vapor tiene un peso molecular igual a PM_v y el gas seco tiene un peso molecular igual a PM_g . Por lo que desde la expresión de fracción molar de la mezcla es posible obtener el concepto de **Humedad Absoluta (W)**:

$$W = \frac{\text{Masa de vapor}}{\text{Masa de aire seco}} = \frac{PM_v \cdot y_A}{PM_g(1 - y_A)} = \frac{PM_v \cdot p_A}{PM_g \cdot (P - p_A)}$$

Fracción Molar de la Mezcla (z) y Humedad absoluta (W)

Por lo tanto, la Humedad Absoluta se define como la cantidad de **masa de vapor** del compuesto A (agua u otro solvente) que está contenido en el gas que lo transporta por unidad de **masa del gas seco** que realiza dicho transporte de materia (puede ser aire u otro gas transportado inerte)

Se define como seco debido a que se considera la masa de gas libre del compuesto vaporizado A.

Si consideramos el caso de la mezcla de aire-agua, tenemos que necesitamos conocer el peso molecular del aire ya que el peso molecular del agua es 18 g/mol aproximadamente. Para ello, tenemos la siguiente tabla

Sustancia	Símbolo	Peso molecular	Análisis volumétrico
Nitrógeno	N ₂	28,016	78,08
Oxígeno	O ₂	32	20,95
Argón	Ar	39,944	0,93
Dióxido de carbono	CO ₂	44,01	0,03
Otros			0,01

Haciendo el promedio ponderado tenemos que el peso molecular del aire es aprox. 29 g/mol

Humedad absoluta (W): kg vapor/kg de aire seco

Volviendo a la definición de Humedad Absoluta, tenemos que para el caso de la mezcla de aire-agua:

$$z = \frac{\text{Moles de vapor}}{\text{Moles de aire seco}} = \frac{y_{\text{agua}}}{1 - y_{\text{agua}}} = \frac{p_{\text{agua}}}{P - p_{\text{agua}}}$$

$$W = \frac{\text{Masa de vapor}}{\text{Masa de aire seco}} = \frac{PM_{H_2O} \cdot p_{\text{agua}}}{PM_{\text{Aire}} \cdot (P - p_{\text{agua}})} = \frac{18 \cdot p_{\text{agua}}}{29 \cdot (P - p_{\text{agua}})}$$

W depende sólo de la presión parcial del vapor en la mezcla cuando la presión total está fija.

Si $P_{\text{Total}} = 1 \text{ atm}$ se tendrá:

$$W = \frac{\text{Masa de vapor}}{\text{Masa de aire seco}} = \frac{PM_{H_2O} \cdot p_{\text{agua}}}{PM_{\text{Aire}} \cdot (P - p_{\text{agua}})} = \frac{18 \cdot p_{\text{agua}}}{29 \cdot (1 - p_{\text{agua}})}$$

Humedad de Saturación (W_s) y Humedad Relativa (HR)

A medida que el gas va admitiendo vapor, el gas se va saturando hasta cierto punto donde no es posible recibir ninguna nueva molécula de vapor. Aquí decimos que el sistema está **saturado**.

Esta concentración de saturación comúnmente se mide en términos de presión y se puede estimar usando estimaciones simples como la ecuación de Antoine:

$$\ln p_s = A - \frac{B}{T - C}$$

O bien mediante estimaciones más complejas como la expuesta por Sonntag en 1990 que generó una ecuación para la presión de saturación de una mezcla de agua-aire:

$$\ln p_s = -\frac{6096.9385}{T} + 21.2409642 - 2.711193 \cdot 10^{-2}T + 1.673952 \cdot 10^{-5}T^2 + 2.433502 \ln T$$

Donde p_s es la presión de saturación en Pascales y T es la temperatura en Kelvin

Humedad de Saturación (W_s) y Humedad Relativa (HR)

Con el valor de presión de saturación del sistema, es posible definir el concepto de Humedad de Saturación (W_s) como la relación entre la masa de vapor del compuesto vaporizado A en su punto de saturación y la masa de gas seco cuando este gas está completamente saturado:

$$W_s = \frac{\text{masa de vapor saturado}}{\text{masa de gas en el sistema saturado}} = \frac{PM_v \cdot p_{s,v}}{PM_g \cdot (P - p_{s,v})}$$

En el caso de la mezcla de aire-agua:

$$W_s = \frac{18 \cdot p_{s,v}}{29 \cdot (P - p_{s,v})}$$

Adicionalmente, con la presión de saturación es posible obtener el término de Humedad Relativa (HR ó Ψ ó RH ó W_R) que es la razón entre la cantidad de vapor que tiene el sistema versus la cantidad de vapor que tiene el sistema cuando está saturado:

$$HR = 100 \cdot \frac{p_A}{p_{s,A}} \quad \text{Es un valor porcentual}$$

Humedad de Saturación (W_s) y Humedad Relativa (HR)

Adicionalmente, con la presión de saturación es posible obtener el término de Humedad Relativa (HR ó Ψ ó RH ó W_R) que es la razón entre la cantidad de vapor que tiene el sistema versus la cantidad de vapor que tiene el sistema cuando está saturado:

$$HR = 100 \cdot \frac{p_A}{p_{s,A}}$$

Este concepto es importante porque es el más común al momento de medir la humedad del ambiente y generalmente, esta es la humedad que miden los dispositivos



Humedad Porcentual (W_p)

Finalmente, existe un último concepto importante que es la razón de humedad absoluta sobre la humedad de saturación, dado por la siguiente expresión:

$$W_p = 100 \cdot \frac{W}{W_s}$$

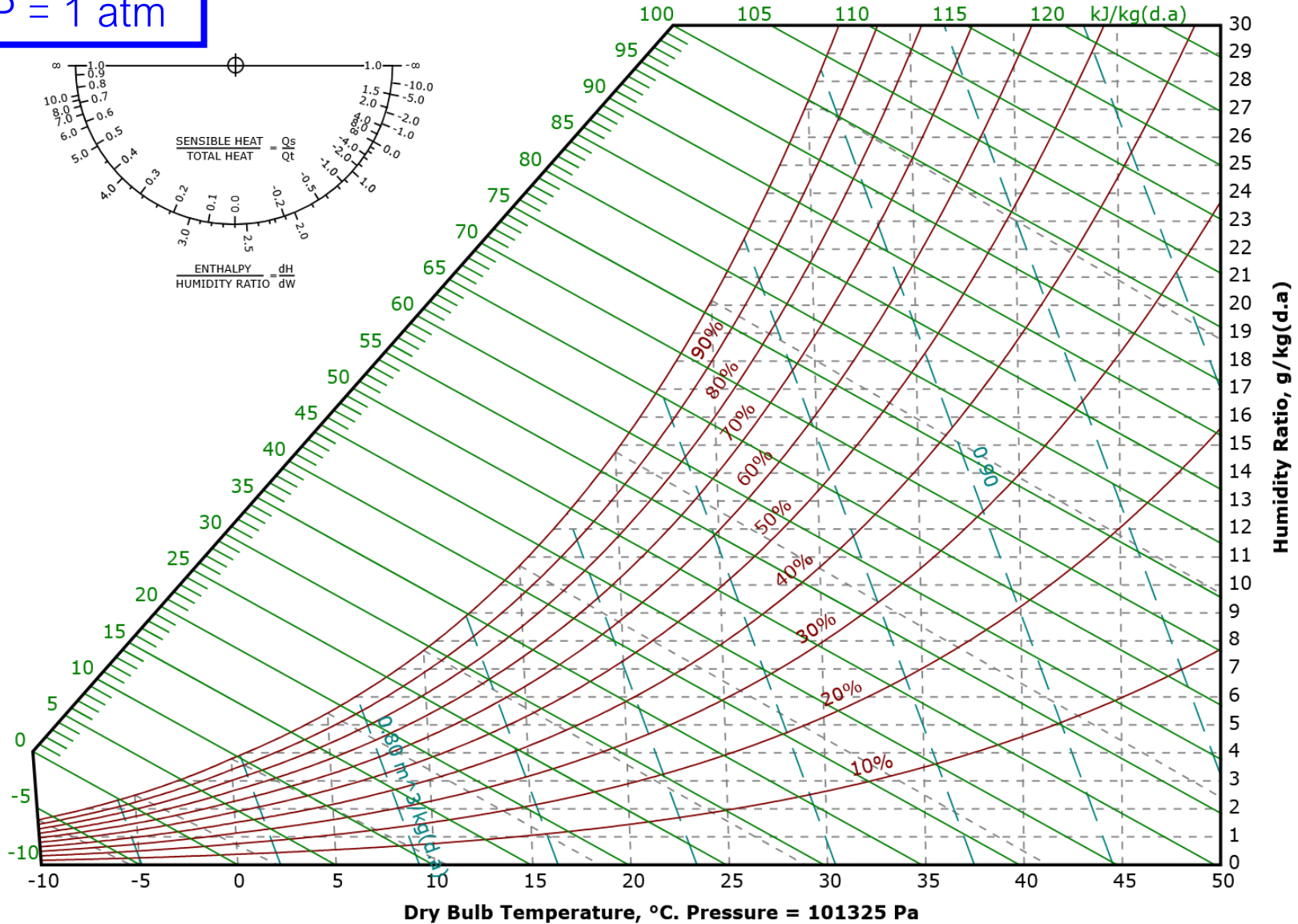
Haciendo la expansión de la expresión:

$$W_p = 100 \cdot \frac{W}{W_s} = 100 \cdot \frac{\frac{p_A}{P - p_A}}{\frac{p_{s,A}}{P - p_{s,A}}}$$

A este término se le conoce como Humedad Porcentual (W_p)

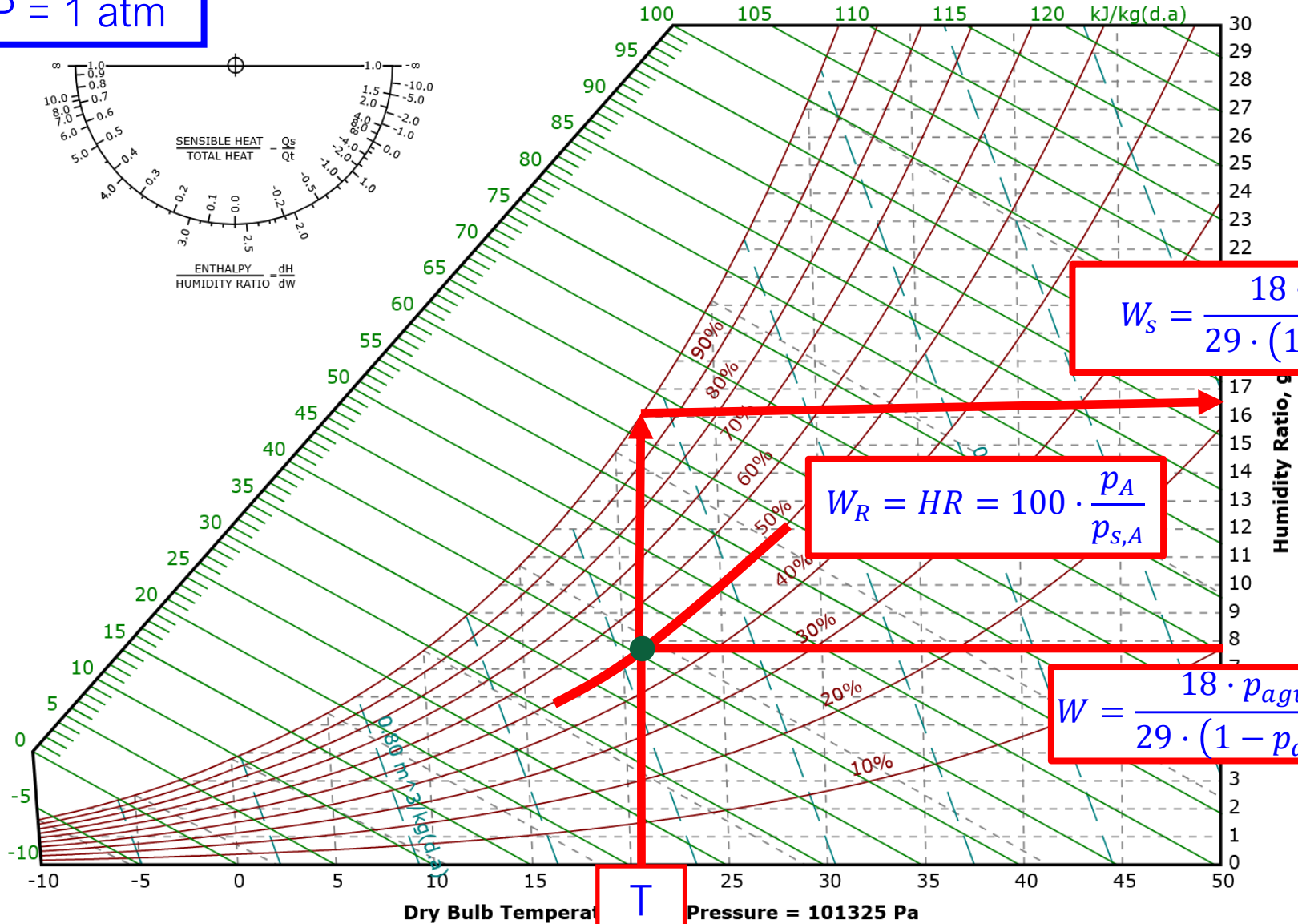
Carta psicrométrica: muestra propiedades de sistema aire-agua

$P = 1 \text{ atm}$



Carta psicrométrica: muestra propiedades de sistema aire-agua

$P = 1 \text{ atm}$



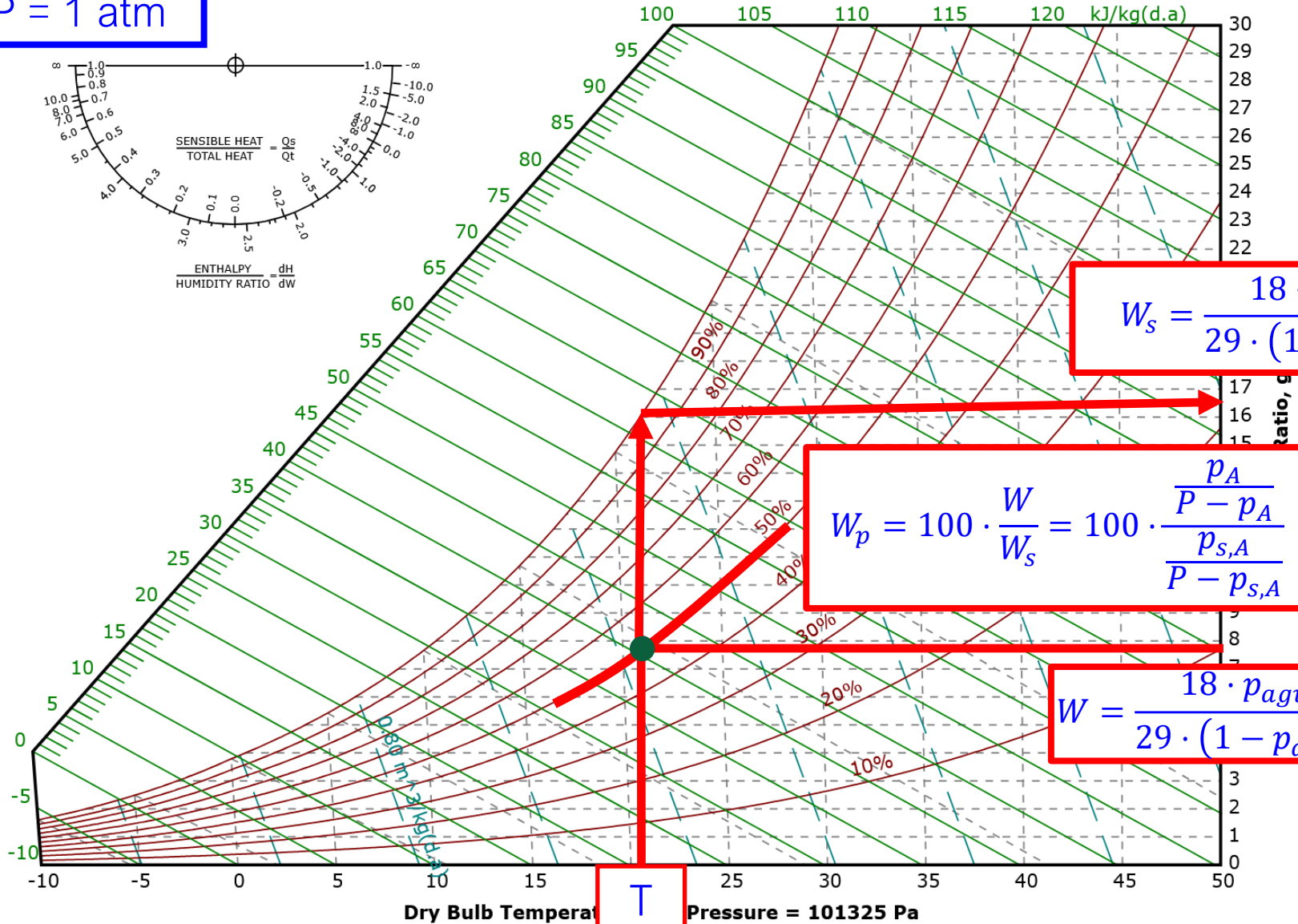
$$W_s = \frac{18 \cdot p_{s,v}}{29 \cdot (1 - p_{s,v})}$$

$$W_R = HR = 100 \cdot \frac{p_A}{p_{s,A}}$$

$$W = \frac{18 \cdot p_{agua}}{29 \cdot (1 - p_{agua})}$$

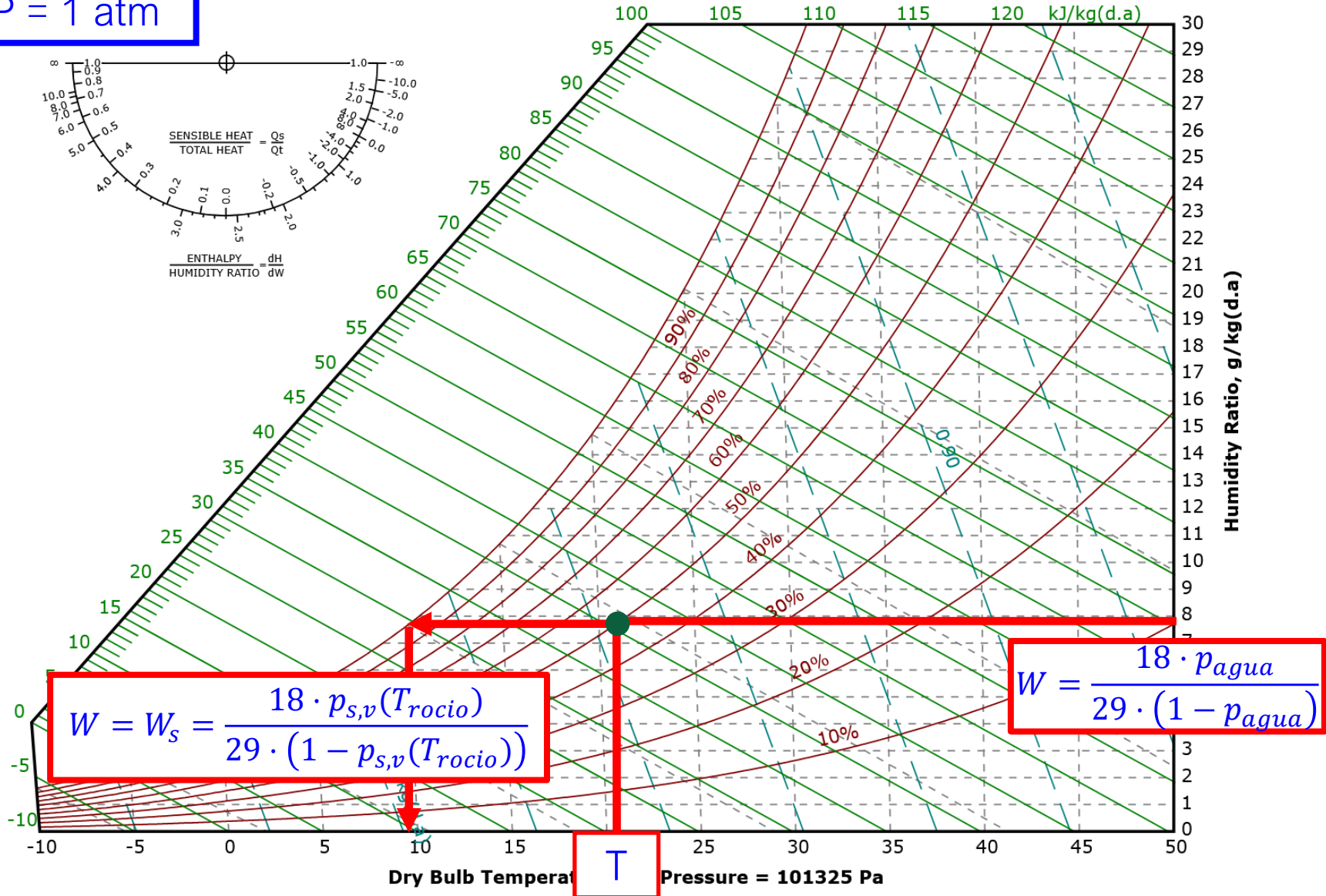
Carta psicrométrica: muestra propiedades de sistema aire-agua

$P = 1 \text{ atm}$



Carta psicrométrica: muestra propiedades de sistema aire-agua

$P = 1 \text{ atm}$



Calor húmedo (C_s)

Energía necesaria para aumentar la temperatura de 1 g de aire seco más el vapor que éste contiene en 1°C.

Se tiene que:

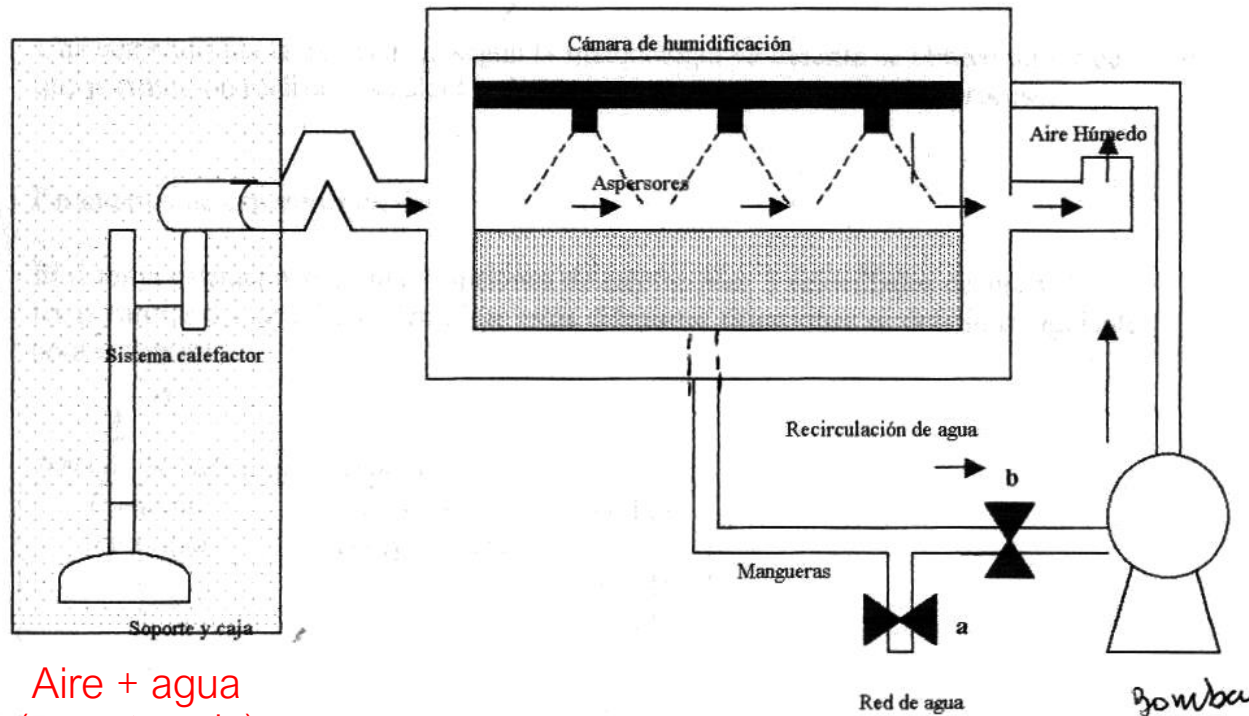
$$C_{pg, \text{ agua}} \approx 0.45 \text{ cal/}(\text{°C} \cdot \text{g agua}) = 1.88 \text{ J/}(\text{°C} \cdot \text{g agua})$$

$$C_{pg, \text{ aire}} \approx 0.24 \text{ cal/}(\text{°C} \cdot \text{g aire seco}) = 1.005 \text{ J/}(\text{°C} \cdot \text{g aire seco})$$

$$C_s = 0.24 + 0.45 \cdot W \quad \text{cal/}(\text{°C} \cdot \text{g aire seco})$$

$$C_s = 1.005 + 1.88 \cdot W \quad \text{J/}(\text{°C} \cdot \text{g aire seco})$$

Humidificación adiabática (temperatura de saturación adiabática)



Aire + agua
(no saturado)

Cambia T y W del aire

Si contacto agua-aire
es suficiente

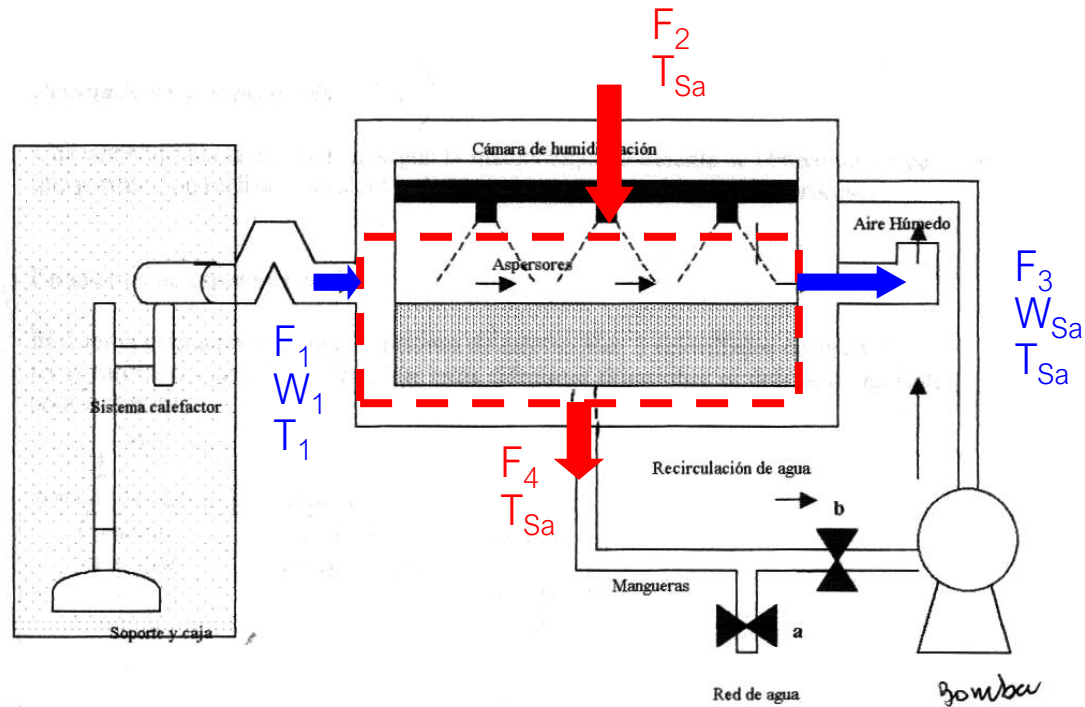


Aire + agua
(saturado) @ T_{Sa}

T_{Sa} = temp. de
saturación adiabática

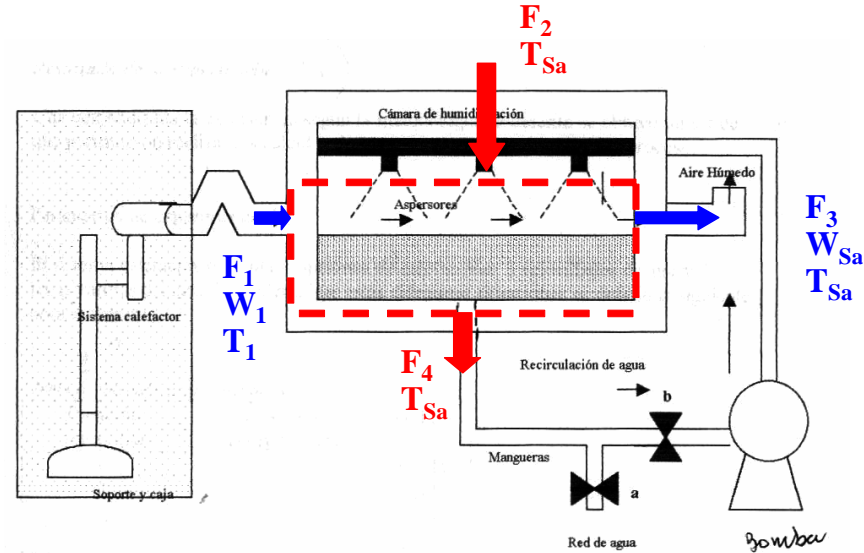
El gas de entrada (T_G y W_G) fluye en forma continua y se pone en contacto con una **gran** cantidad de agua (cámara de lluvia), por lo que se enfría (T_{Sa}) y humidifica (W_{Sa}).

Humidificación adiabática – Balance de Energía



B.M. aire seco: $F_1 = F_3$

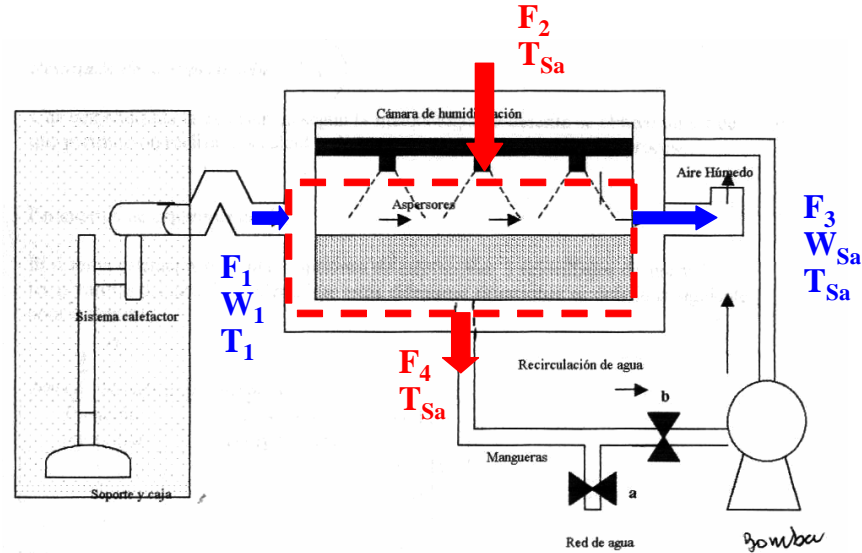
B.M. agua: $F_1 W_1 + F_2 = F_3 W_{sa} + F_4$



Usando estados de referencia $T = T_{sat}$ estado gaseoso para aire seco y líquido para el agua:

$$F_1 \cdot [C_{S(w1)}(T_1 - T_{sat}) + \lambda_{sat}W_1] + F_2 \cdot C_{p,l,agua} \cdot (T_{sat} - T_{sat})$$

$$= F_4 \cdot C_{p,l,agua} \cdot (T_{sat} - T_{sat}) + F_3 \cdot [C_{S(w3)}(T_{sat} - T_{sat}) + \lambda_{sat}W_{sat}]$$



Usando estados de referencia $T = T_{sat}$ estado gaseoso para aire seco y líquido para el agua:

$$\begin{aligned}
 & F_1 \cdot [C_{S(w1)}(T_1 - T_{sat}) + \lambda_{sat}W_1] + F_2 \cdot C_{p,l,agua} \cdot \cancel{(T_{sat} - T_{sat})}^0 \\
 & = F_4 \cdot C_{p,l,agua} \cdot \cancel{(T_{sat} - T_{sat})}^0 + F_3 \cdot [C_{S(w3)}\cancel{(T_{sat} - T_{sat})}^0 + \lambda_{sat}W_{sat}]
 \end{aligned}$$

$$F_1 [C_{S(w1)}(T_1 - T_{sat}) + \lambda_{sat}W_1] = F_3 \lambda_{sat}W_{sat}$$

Pero sabemos por el balance de materia que $F_1 = F_3$

$$C_{S(w1)}(T_1 - T_{sat}) + \lambda_{sat}W_1 = \lambda_{sat}W_{sat}$$

Pero sabemos por el balance de materia que $F_1 = F_3$

$$C_{s(w1)}(T_1 - T_{sat}) + \lambda_{sat}W_1 = \lambda_{sat}W_{sat}$$

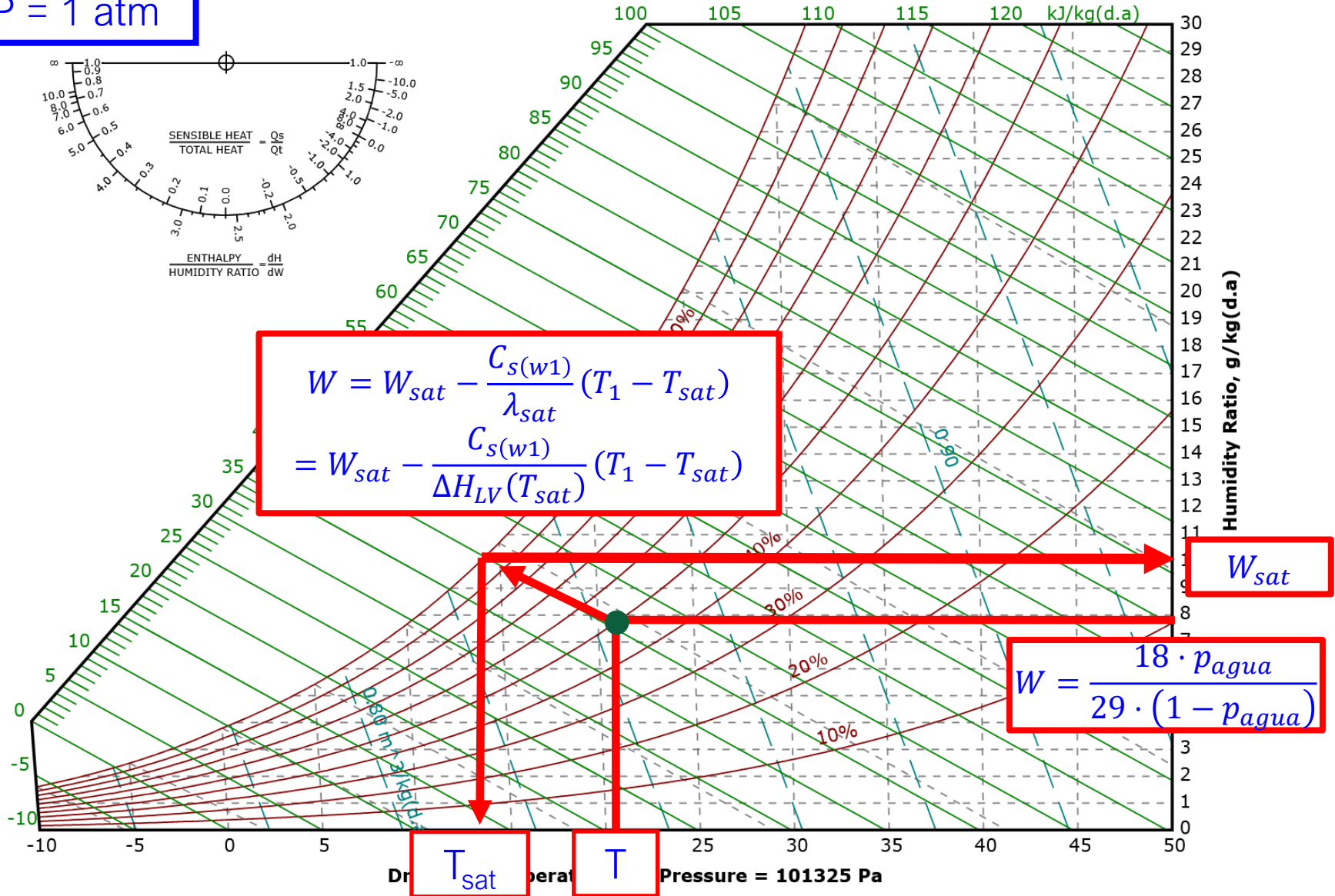
Haciendo un reordenamiento de esta expresión, y despejando el término de W_1

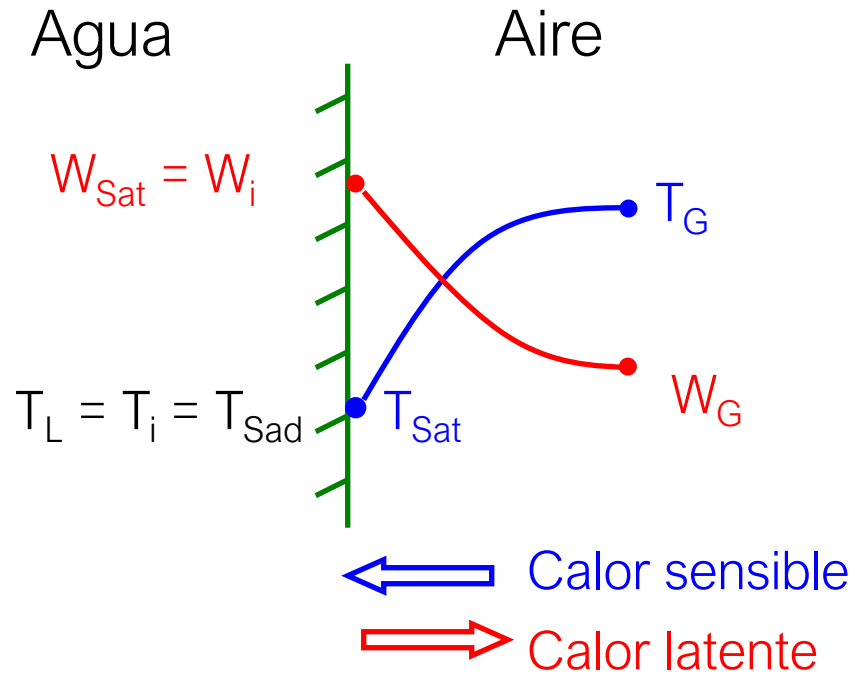
$$\rightarrow W_1 = W_{sat} - \frac{C_{s(w1)}}{\lambda_{sat}}(T_1 - T_{sat})$$

Esta ecuación determina la curva de *saturación adiabática*, que define la humedad absoluta de una mezcla aire-agua cuando ésta se satura (equilibra) en forma adiabática con un exceso de agua que se mantiene a una temperatura T_{sat} .

Carta psicrométrica: muestra propiedades de sistema aire-agua

$P = 1 \text{ atm}$





T_i y W_i representan condiciones de interfase \Rightarrow equilibrio y por tanto son condiciones de saturación. La temperatura del aire T_G **debe** ser mayor que T_i y W_i **debe** ser mayor que W_G .

- Revisar las relaciones que surgen en un sistema aire-agua y la carta psicrométrica.
- Comprender el proceso de enfriamiento adiabático (saturación adiabática).

Recordatorio de Psicrometría

IIQ2023 - Operaciones Unitarias II

José Rebolledo Oyarce

1 de Junio de 2021

