

# AIRE HUMEDO

1

## UNIDAD 13: AIRE HÚMEDO

- **13.A. Mezcla de aire y agua.** Análisis del sistema aire vapor de agua: humedad absoluta, máxima, relativa y grado de saturación. Entalpía del aire húmedo. Punto de rocío. Mezclas de corrientes de aire húmedo.
- **13.B. Temperaturas – Cálculo y Medición.** Temperatura de Rocío. Temperatura de Saturación. Temperatura de Bulbo Seco. Temperatura de Bulbo Húmedo. Psicrómetro. Temperatura de Saturación Adiabática.
- **13.C. Tablas y Diagramas.** Tablas de aire húmedo. Diagrama Psicrométrico. Diagrama entálpico. Procesos con aire húmedo.

2

## AIRE HUMEDO

- *El aire húmedo es una mezcla de aire seco y vapor de agua.*
- *El aire seco es una mezcla de gases, cuya composición química es:*

▪ Nitrógeno	78,08%
▪ Oxígeno	20,95%
▪ Argón	0,93%
▪ CO <sub>2</sub> , CO, SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> , ...	0,03%
▪ Otros	0,01%

## AIRE HUMEDO

- *El Peso Molar del aire húmedo se calcula:*

$$P_{M.a.s.} = N_2 \cdot 28 + O_2 \cdot 32 + Ar \cdot 39,9 + CO_2 \cdot 44,01$$

$$P_{M.a.s.} = 0,78084 \cdot 28 + 0,209476 \cdot 32 + 0,00934 \cdot 39,9 + 0,0003 \cdot 44,01$$

$$P_{M.a.s.} = 28.95 \text{ kg / kmol}$$

- *El vapor de agua a presiones muy bajas ( < 0,1 bar) se comporta prácticamente como un gas ideal.*
- *El vapor de agua dentro del aire húmedo se encuentra a muy bajas P, por lo que asumiremos su comportamiento como gas ideal.*
- *Su peso molecular es de 18 kg / kmol.*

## AIRE HUMEDO

*Mezcla de aire seco y agua en estado de vapor.*

Grados de libertad:

$$Z = C + 2 - F$$

*C: cantidad de componentes = 2*

*F: n° de fases = 1*

$$Z = 3$$

*Se deben fijar 3 propiedades para definir el estado de equilibrio de la mezcla de gases.*

5

## PRESIONES PARCIALES

➤ *Aire húmedo es una mezcla de 2 gases:*

- Aire: ocupa un volumen → ejerce una presión  $P_a$
- Vapor de agua: ocupa un volumen → ejerce una presión  $P_v$

➤ *La presión total a la cual está sometida esa mezcla:*

$$P_{total} = P_a + P_v$$

- $P_a$ : presión parcial del aire
- $P_v$ : presión parcial del vapor
- $P_{total} = 1 \text{ Atm}$  (generalmente)

➤ **Las presiones parciales son proporcionales a las masas.**

- **$P_a$** : presión parcial proporcional a la **Masa de aire**
- **$P_v$** : presión parcial proporcional a la **Masa Vapor de Agua**

➤ **Presión de vapor saturado ( $P_{vs}$ )**

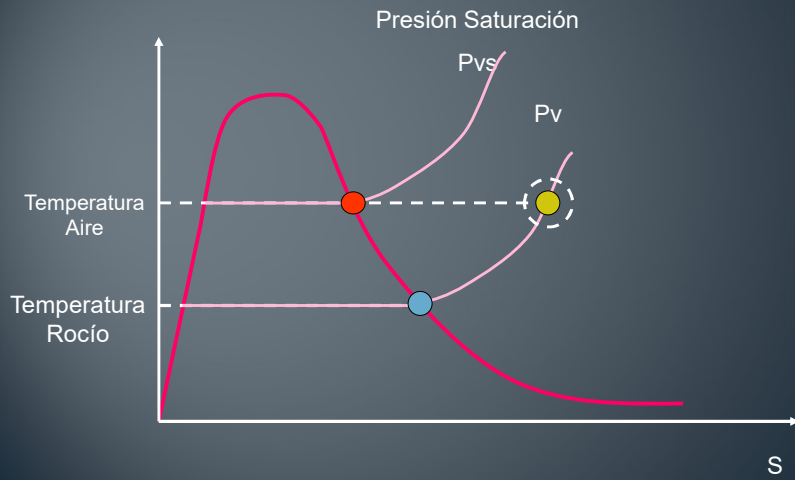
Es la presión que ejerce la máxima cantidad de vapor de agua que puede contener el Aire Húmedo en determinadas condiciones de Temperatura y Presión Total.

$$P_{total} = P_a + P_{vs}$$

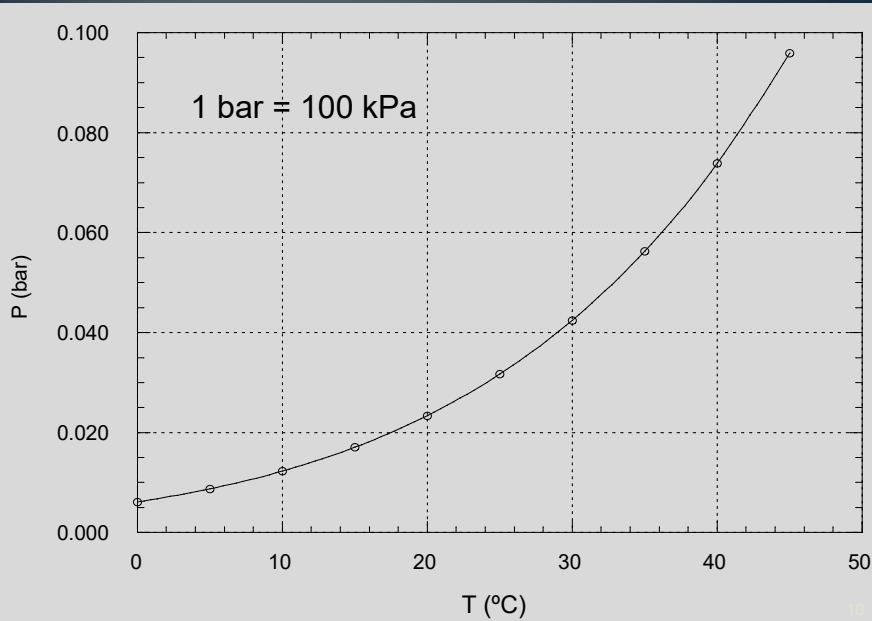
Relación Presiones aire húmedo

Temp °C	Presión Saturación kPa	Presión aire seco kPa	Presión atmosférica kPa
10	1.228	100.07	101.3
20	2.343	98.96	101.3
30	4.254	97.05	101.3
40	7.393	93.91	101.3
50	12.354	88.95	101.3
60	19.930	81.37	101.3
70	31.148	70.15	101.3
80	47.304	54.00	101.3
90	69.999	31.30	101.3
100	101.300	0.00	101.3

## gráfica agua pura: fase vapor de agua en el aire húmedo



## PRESIÓN DE VAPOR DE AGUA EN SATURACIÓN



## ECUACION PARA GASES IDEALES

$$P * V = m * R_p * T$$

Donde:

*V*: Volumen

*P*: Presión

*m*: Masa

*R<sub>p</sub>*: Constante Particular de los Gases

*T*: Temperatura [ °K ]

### ➤ Las constantes particulares:

▪ R aire seco                       $R_a = 0.287 \text{ KJ /kg } ^\circ\text{K}$

▪ R vapor                               $R_v = 0.461 \text{ KJ /kg } ^\circ\text{K}$

11

## VOLUMEN ESPECIFICO DEL AIRE HUMEDO

[ m<sup>3</sup> de aire húmedo por masa de aire seco ]

Se puede calcular aplicando la ecuación de los gases perfectos.

Aire:                                       $P_{aire} * V = m_{aire} * R_{aire} * T$

Vapor de agua :                       $P_{vap} * V = m_{vap} * R_{vap} * T$

Sumando:

$$(P_{aire} + P_{vap}) * V = (m_{aire} * R_{aire} + m_{vap} * R_{vap}) * T$$

$$P_{total} = P_{aire} + P_{vapor}$$

Dividiendo por *m* aire seco :

$$V_{ah} = (R_{aire} + X * R_{vap}) * T / P \quad \left[ m^3 / Kg_{aire\ seco} \right]$$

$$V_{aire} = R_{aire} * T / P \quad \left[ m^3 / Kg_{aire\ seco} \right]$$

12

## DENSIDAD DEL AIRE HUMEDO

$$\text{densidad} = 1 / (\text{volumen específico})$$

$$\text{aire húmedo} \quad V_{ah} = (R_{aire} + X * R_{agua}) * T / P$$

$$\text{aire seco} \quad V_{aire} = R_{aire} * T / P$$



$$\text{Vol. aire húmedo} > \text{Vol. del aire seco}$$

$$\text{densidad aire húmedo} < \text{densidad del aire seco}$$

El aire a medida que se va cargando de humedad asciende

13

## HUMEDAD ABSOLUTA (X)

Humedad absoluta o simplemente humedad, es la masa de agua presente por cada 1 kg de aire seco. Se representa por X.

$$X = \frac{m_v}{m_{as}} \quad \begin{matrix} [\text{kg agua}] \\ [\text{kg aire seco}] \end{matrix}$$

• Aire:  $\frac{P_{aire} * V}{R_{aire}} = m_{\text{aire seco}}$

• Vapor de agua:  $\frac{P_{vap} * V}{R_{vap} * T} = m_{\text{vapor agua}}$

## HUMEDAD ABSOLUTA ( X )

$$X = \frac{m_v}{m_{as}} = \frac{P_{vapor} * R_{aire}}{P_{aire} * R_{vapor}} = 0.622 \frac{P_{vapor}}{P_{aire}}$$

$$P_{total} = P_{aire} + P_{vapor} \quad P_{aire} = P - P_{vapor}$$

$$X = 0.622 \frac{P_{vapor}}{P - P_{vapor}} = 0.622 \frac{P_v}{P - P_v}$$

- Aire:  $R_{vapor} = 0.461$  KJ / Kg °K
- $R_{aire} = 0.2870$  KJ / Kg °K
- Peso Molar :  $PM_{vap} = 18$  Kg / Kmol
- $PM_{aire} = 28.95$  Kg / Kmol

## HUMEDAD DE SATURACIÓN (X<sub>s</sub>)

**Aire saturado:** la presión parcial del vapor de agua que contiene es igual a la presión de vapor del agua saturada pura a la misma temperatura del aire.

En otras palabras es la **“Máxima cantidad de agua que puede contener el Aire Húmedo en determinadas condiciones de Presión y Temperatura”**.

La humedad absoluta era:

$$X = 0.622 \frac{P_{vapor}}{P - P_{vapor}} = 0.622 \frac{P_v}{P - P_v}$$

Reemplazando la Presión de vapor por la Presión de Saturación, la **“humedad de saturación”** será:

$$X_s = 0.622 \frac{P_{vapor\ sat}}{P - P_{vapor\ sat}} = 0.622 \frac{P_{vs}}{P - P_{vs}}$$



## HUMEDAD RELATIVA

Relación entre el vapor de agua contenido en una determinada cantidad de aire y el que éste contendría si estuviese saturado a una determinada temperatura.

$$HR \text{ o } \Phi = \frac{P_v}{P_{vs}}$$

**P<sub>v</sub>**: Presión parcial del vapor de agua existente en el aire húmedo

**P<sub>vs</sub>**: Presión de saturación a la misma temperatura

## HUMEDAD RELATIVA

La determinación de la humedad relativa de la atmósfera se hace mediante los psicrómetros y los higrómetros.



HIGROMETROS



PSICROMETROS

## HUMEDAD RELATIVA: $T_{bs}$ - $T_{bh}$

Temperatura de un termómetro seco °C	Diferencia de temperatura entre los termómetros seco y húmedo (en °C) (El valor de la lectura medida especifica la humedad relativa en %)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	100	82	64	47	31	14				
1	100	83	66	60	34	18				
2	100	84	68	52	37	22				
3	100	84	69	54	40	25	12			
4	100	85	70	56	42	28	18			
5	100	86	72	58	45	32	19	7		
6	100	86	73	60	47	35	23	11		
7	100	87	75	61	49	37	26	14		
8	100	87	75	62	51	40	29	18	7	
9	100	88	76	64	53	42	31	21	11	
10	100	88	77	65	55	44	34	24	14	5
11	100	88	77	66	56	46	36	26	17	8
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11
13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14
14	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17
15	100	90	80	71	61	53	44	36	27	20
16	100	90	81	71	62	54	46	37	30	22
17	100	90	81	72	63	56	47	39	32	24
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27
19	100	91	82	74	65	58	50	43	36	29
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	31
21	100	91	83	75	67	60	52	45	39	32
22	100	92	83	75	68	61	54	47	40	34
23	100	92	84	76	69	62	55	48	42	36
24	100	92	84	77	70	62	56	49	43	37
25	100	92	85	77	70	63	57	51	44	39
26	100	92	85	78	71	64	58	51	45	40
27	100	93	85	78	71	65	59	53	47	41
28	100	93	86	79	72	65	59	53	48	42
29	100	93	86	79	72	66	60	54	49	43
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44

19/55

## GRADO DE SATURACIÓN

Es la relación existente entre la humedad absoluta del aire  $X$ , y la humedad absoluta correspondiente al aire saturado a la misma temperatura.

$$GS \text{ o } \phi = \frac{X}{X_s}$$

**X:** humedad absoluta en el aire húmedo

**$X_s$ :** humedad absoluta de saturación en el aire húmedo

## RELACIÓN ENTRE GRADO DE SATURACIÓN Y HUMEDAD RELATIVA

$$GS = \frac{X}{X_s} = \frac{0.622 * \frac{P_v}{P - P_v}}{0.622 * \frac{P_{vs}}{P - P_{vs}}} = \frac{P_v}{P_{vs}} * \frac{(P - P_{vs})}{(P - P_v)}$$

Por ser  $P_v$  y  $P_{vs} \ll P$  :

$$GS = \frac{X}{X_s} = \frac{P_v}{P_{vs}} * [\approx 1] = HR$$

$$GS \cong HR$$

La Humedad Relativa es prácticamente igual al Grado de Saturación para las condiciones atmosféricas

## ENTALPÍA DEL AIRE HÚMEDO

La entalpía de una mezcla de aire y vapor de agua es la suma de las entalpías del aire seco y la del vapor de agua.

Se considera como estado de referencia ( $0\text{ °C}$  y  $1\text{ atm}$ ) : *agua líquida y aire seco*

Una mezcla de aire-vapor, con  $x$  kg de agua, a una temperatura de  $t\text{ °C}$  y  $1\text{ atm}$ , la entalpía puede calcularse como:

$$H_{ah} = H_{aire} + H_{vapor} \quad [kJ]$$

$$h_{ah} = C_p \text{ aire} * T + X * (h_{L-V} + C_p \text{ vapor} * T) \quad [kJ / kg \text{ aire seco}]$$

Pueden aceptarse como valores medios constantes:

$C_p \text{ aire}$ : calor específico del aire	= 0.24 kcal/(kg°C) o 1 kJ/(kg°C)
$C_p \text{ vapor}$ : calor específico del vapor	= 0.45 kcal/(kg°C) o 1.88 kJ/(kg°C),
$r_o = h_{L-V}$ : calor latente de vaporización [ $T=0\text{ °C}$ ]	= 2500 kJ/kg o 597 kcal/kg

# ENTALPÍA DEL AIRE HÚMEDO SATURADO

$$h_{ah} = C_p \text{ aire} * T_s + X_s * (h_{L-V} + C_p \text{ vapor} * T_s) \quad [\text{kJ} / \text{kg as}]$$

donde:

T<sub>s</sub> : Temperatura de saturación

X<sub>s</sub>: humedad absoluta de saturación

# ENTALPÍA DEL AIRE HÚMEDO NIEBLA

$$h_{ah} = C_{pa} * T + X * (h_{L-V} + C_{pv} * T) + (X-X_s) * C_{p \text{ liq}} * T$$

donde:

C<sub>p liq</sub> : Calor específico del agua en estado líquido

X- X<sub>s</sub> : cantidad de agua en estado líquido

Tabla A.12. Propiedades del agua en saturación: tabla de temperatura

Temp. °C T	Pres. bar p	Volumen específico		Energía interna		Entalpía			Entropía	
		Líquido sat. v <sub>f</sub> × 10 <sup>3</sup>	Vapor sat. v <sub>g</sub>	Líquido sat. u <sub>f</sub>	Vapor sat. u <sub>g</sub>	Líquido sat. h <sub>f</sub>	Evap. h <sub>fg</sub>	Vapor sat. h <sub>g</sub>	Líquido sat. s <sub>f</sub>	Vapor sat. s <sub>g</sub>
0	0,00611	1,0002	206,278	-0,03	2,375,4	-0,02	2,501,4	2,501,3	0,0001	9,1565
4	0,00813	1,0001	157,232	16,77	2,380,9	16,78	2,491,9	2,508,7	0,0610	9,0514
5	0,00872	1,0001	147,120	20,97	2,382,3	20,98	2,489,6	2,510,6	0,0761	9,0257
6	0,00915	1,0001	137,734	25,18	2,383,6	25,20	2,487,2	2,512,4	0,0912	9,0003
8	0,01072	1,0002	120,917	33,59	2,386,4	33,60	2,482,5	2,516,1	0,1212	8,9501
10	0,01228	1,0004	106,379	42,00	2,389,2	42,01	2,477,7	2,519,8	0,1510	8,9008
11	0,01312	1,0004	99,857	46,20	2,390,5	46,20	2,475,4	2,521,6	0,1658	8,8765
12	0,01402	1,0005	93,784	50,41	2,391,9	50,41	2,473,0	2,523,4	0,1806	8,8524
13	0,01497	1,0007	88,124	54,60	2,393,3	54,60	2,470,7	2,525,3	0,1953	8,8285
14	0,01598	1,0008	82,848	58,79	2,394,7	58,80	2,468,3	2,527,1	0,2099	8,8048
15	0,01705	1,0009	77,926	62,99	2,396,1	62,99	2,465,9	2,528,9	0,2245	8,7814
16	0,01818	1,0011	73,333	67,18	2,397,4	67,19	2,463,6	2,530,8	0,2390	8,7582
17	0,01938	1,0012	69,044	71,38	2,398,8	71,38	2,461,2	2,532,6	0,2535	8,7351
18	0,02064	1,0014	65,038	75,57	2,400,2	75,58	2,458,8	2,534,4	0,2679	8,7123
19	0,02198	1,0016	61,293	79,76	2,401,6	79,77	2,456,5	2,536,2	0,2823	8,6897
20	0,02339	1,0018	57,791	83,95	2,402,9	83,96	2,454,1	2,538,1	0,2966	8,6672
21	0,02487	1,0020	54,514	88,14	2,404,3	88,14	2,451,8	2,539,9	0,3109	8,6450
22	0,02645	1,0022	51,447	92,32	2,405,7	92,33	2,449,4	2,541,7	0,3251	8,6229
23	0,02810	1,0024	48,574	96,51	2,407,0	96,52	2,447,0	2,543,5	0,3393	8,6011
24	0,02985	1,0027	45,883	100,70	2,408,4	100,70	2,444,7	2,545,4	0,3534	8,5794
25	0,03169	1,0029	43,360	104,88	2,409,8	104,89	2,442,3	2,547,2	0,3674	8,5580
26	0,03363	1,0032	40,994	109,06	2,411,1	109,07	2,439,9	2,549,0	0,3814	8,5367
27	0,03567	1,0035	38,774	113,25	2,412,5	113,25	2,437,6	2,550,8	0,3954	8,5156
28	0,03782	1,0037	36,690	117,42	2,413,9	117,43	2,435,2	2,552,6	0,4095	8,4946
29	0,04008	1,0040	34,733	121,60	2,415,2	121,61	2,432,8	2,554,5	0,4231	8,4739
30	0,04246	1,0043	32,894	125,78	2,416,6	125,79	2,430,5	2,556,3	0,4369	8,4533
31	0,04496	1,0046	31,165	129,96	2,418,0	129,97	2,428,1	2,558,1	0,4507	8,4329
32	0,04759	1,0050	29,540	134,14	2,419,3	134,15	2,425,7	2,559,9	0,4644	8,4127
33	0,05034	1,0053	28,011	138,32	2,420,7	138,33	2,423,4	2,561,7	0,4781	8,3927
34	0,05324	1,0056	26,571	142,50	2,422,0	142,50	2,421,0	2,563,5	0,4917	8,3728
35	0,05628	1,0060	25,216	146,67	2,423,4	146,68	2,418,6	2,565,3	0,5053	8,3531
36	0,05947	1,0063	23,940	150,85	2,424,7	150,86	2,416,2	2,567,1	0,5188	8,3336
38	0,06632	1,0071	21,602	159,20	2,427,4	159,21	2,411,5	2,570,7	0,5458	8,2950
40	0,07384	1,0078	19,523	167,56	2,430,1	167,57	2,406,7	2,574,3	0,5725	8,2570
45	0,09593	1,0099	15,258	188,44	2,436,8	188,45	2,394,8	2,583,2	0,6387	8,1648

Tabla A.12. (Continuación)

Temp. C T	Pres. bar P	Volumen específico		Energía interna		Entalpía		Entropía		
		Líquido sat. $v_f \times 10^3$	Vapor sat. $v_g$	Líquido sat. $u_f$	Vapor sat. $u_g$	Líquido sat. $h_f$	Evap. $h_{fg}$	Vapor sat. $h_g$	Líquido sat. $s_f$	Vapor sat. $s_g$
50	0.1235	1.0121	12.032	209.32	2.443.5	209.33	2.382.7	2.592.1	0.7038	8.0763
55	0.1576	1.0146	9.568	230.21	2.450.1	230.23	2.370.7	2.600.9	0.7679	7.9913
60	0.1994	1.0172	7.671	251.11	2.456.6	251.13	2.358.5	2.609.6	0.8312	7.9096
65	0.2503	1.0199	6.197	272.02	2.463.1	272.06	2.346.2	2.618.3	0.8935	7.8310
70	0.3119	1.0228	5.042	292.95	2.469.6	292.98	2.333.8	2.626.8	0.9549	7.7553
75	0.3858	1.0259	4.131	313.90	2.475.9	313.93	2.321.4	2.635.3	1.0155	7.6824
80	0.4739	1.0291	3.407	334.86	2.482.2	334.91	2.308.8	2.643.7	1.0753	7.6122
85	0.5783	1.0325	2.828	355.84	2.488.4	355.90	2.296.0	2.651.9	1.1343	7.5445
90	0.7014	1.0360	2.361	376.85	2.494.5	376.92	2.283.2	2.660.1	1.1925	7.4791
95	0.8455	1.0397	1.982	397.88	2.500.6	397.96	2.270.2	2.668.1	1.2500	7.4159
100	1.0133	1.0435	1.673	418.94	2.506.5	419.04	2.257.0	2.676.1	1.3069	7.3549
110	1.433	1.0516	1.210	461.14	2.518.1	461.30	2.230.2	2.691.5	1.4185	7.2387
120	1.985	1.0603	0.8919	503.50	2.529.3	503.71	2.202.6	2.706.3	1.5276	7.1296
130	2.701	1.0697	0.6685	546.02	2.539.9	546.31	2.174.2	2.720.5	1.6344	7.0269
140	3.613	1.0797	0.5089	588.74	2.550.0	589.13	2.144.7	2.733.9	1.7391	6.9299
150	4.738	1.0905	0.3928	631.68	2.559.5	632.20	2.114.3	2.746.5	1.8418	6.8379
160	6.178	1.1020	0.3071	674.86	2.568.4	675.55	2.082.6	2.758.1	1.9427	6.7502
170	7.917	1.1143	0.2428	718.33	2.576.5	719.21	2.049.5	2.768.7	2.0419	6.6663
180	10.02	1.1274	0.1941	762.09	2.583.7	763.22	2.015.0	2.778.2	2.1396	6.5857
190	12.54	1.1414	0.1565	806.19	2.590.0	807.62	1.978.8	2.786.4	2.2359	6.5079
200	15.54	1.1565	0.1274	850.65	2.595.3	852.45	1.940.7	2.793.2	2.3309	6.4323
210	19.06	1.1726	0.1044	895.53	2.599.5	897.76	1.900.7	2.798.5	2.4248	6.3585
220	23.18	1.1900	0.08619	940.87	2.602.4	943.62	1.858.5	2.802.1	2.5178	6.2861
230	27.95	1.2088	0.07158	986.74	2.603.9	990.12	1.813.8	2.804.0	2.6099	6.2146
240	33.44	1.2291	0.05976	1.033.2	2.604.0	1.037.3	1.766.5	2.803.8	2.7015	6.1437
250	39.73	1.2512	0.05013	1.080.4	2.602.4	1.085.4	1.716.2	2.801.5	2.7927	6.0730
260	46.88	1.2755	0.04221	1.128.4	2.599.0	1.134.4	1.662.5	2.796.6	2.8838	6.0019
270	54.99	1.3023	0.03564	1.177.4	2.593.7	1.184.5	1.605.2	2.789.7	2.9751	5.9301
280	64.12	1.3321	0.03017	1.227.5	2.586.1	1.236.0	1.543.6	2.779.6	3.0668	5.8571
290	74.36	1.3656	0.02557	1.278.9	2.576.0	1.289.1	1.477.1	2.766.2	3.1594	5.7821
300	85.81	1.4036	0.02167	1.332.0	2.563.0	1.344.0	1.404.9	2.749.0	3.2534	5.7045
320	112.7	1.4988	0.01549	1.444.6	2.525.5	1.461.5	1.238.6	2.700.1	3.4480	5.5362
340	145.9	1.6379	0.01080	1.570.3	2.464.6	1.594.2	1.027.9	2.622.0	3.6594	5.3357
360	186.5	1.8925	0.006945	1.725.2	2.351.5	1.760.5	720.5	2.481.0	3.9147	5.0526
374.14	220.9	3.155	0.003155	2.029.6	2.029.6	2.099.3	0	2.099.3	4.4298	4.4298

FUENTE: J. H. Keenan, F. G. Keyes, P. G. Hill y J. G. Moore, «Steam Tables», Wiley, New York, 1969.

25

## PUNTO DE ROCÍO

### ➤ Temperatura de rocío:

Es la Temperatura a la cual aparece la primer gota de agua líquida cuando **disminuye la temperatura del aire húmedo manteniendo la humedad absoluta constante**.

Si continúa el enfriamiento, sigue la condensación del vapor de agua, separándose del aire húmedo.

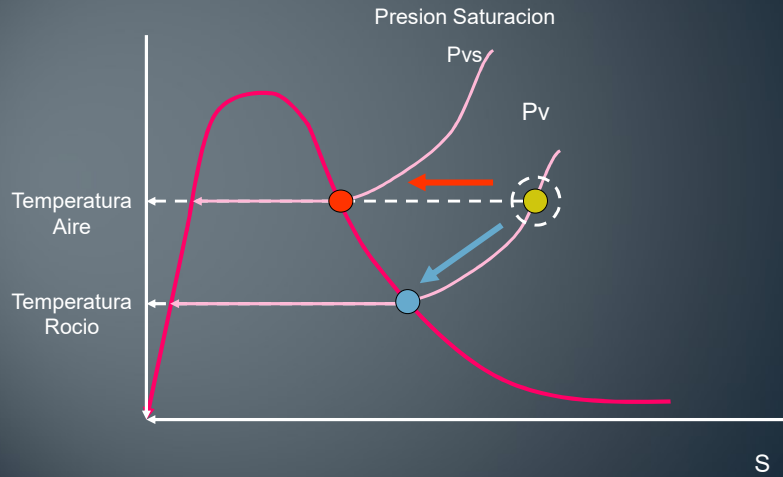
Temperatura —→ enfriamiento a humedad absoluta constante  $x = \text{cte.}$   
Rocío

Diferente al concepto de Saturación

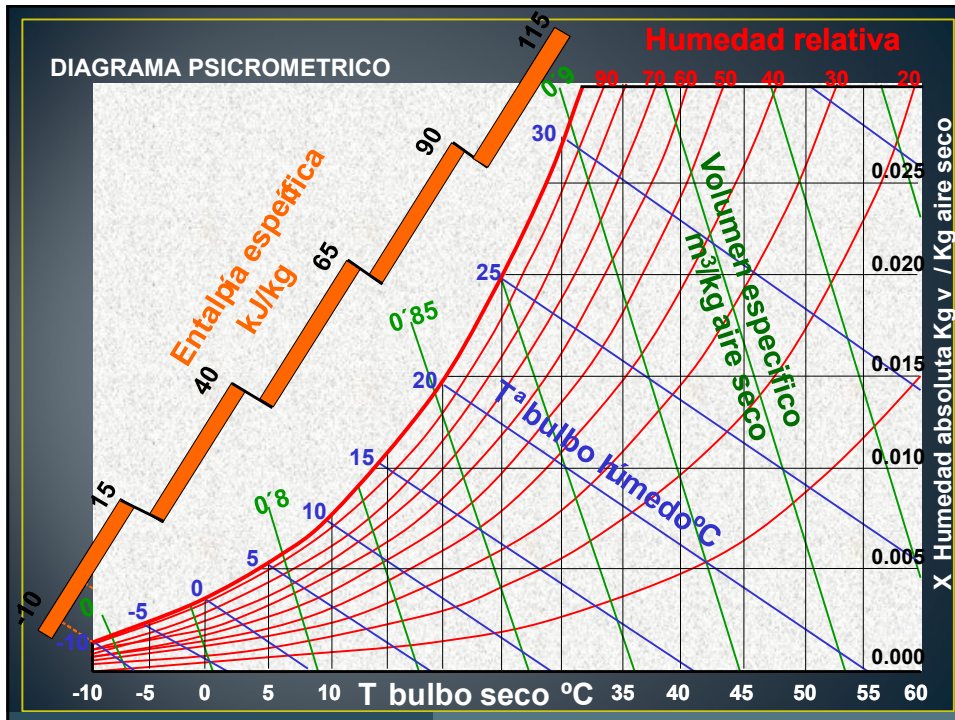
Saturación —→ humidificación a Temperatura constante  $T = \text{cte.}$

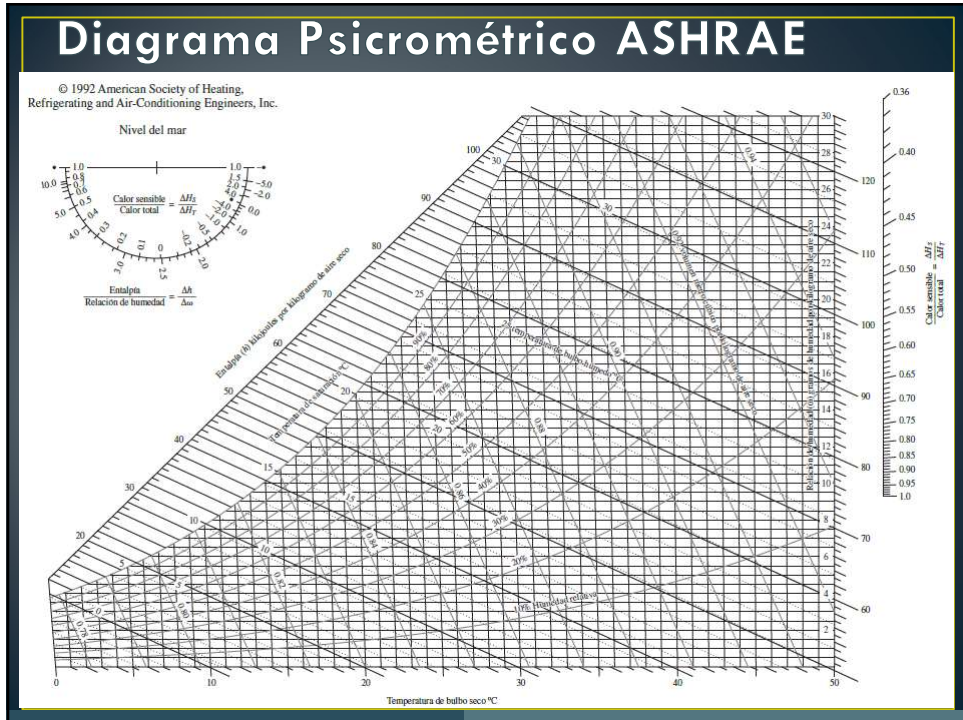
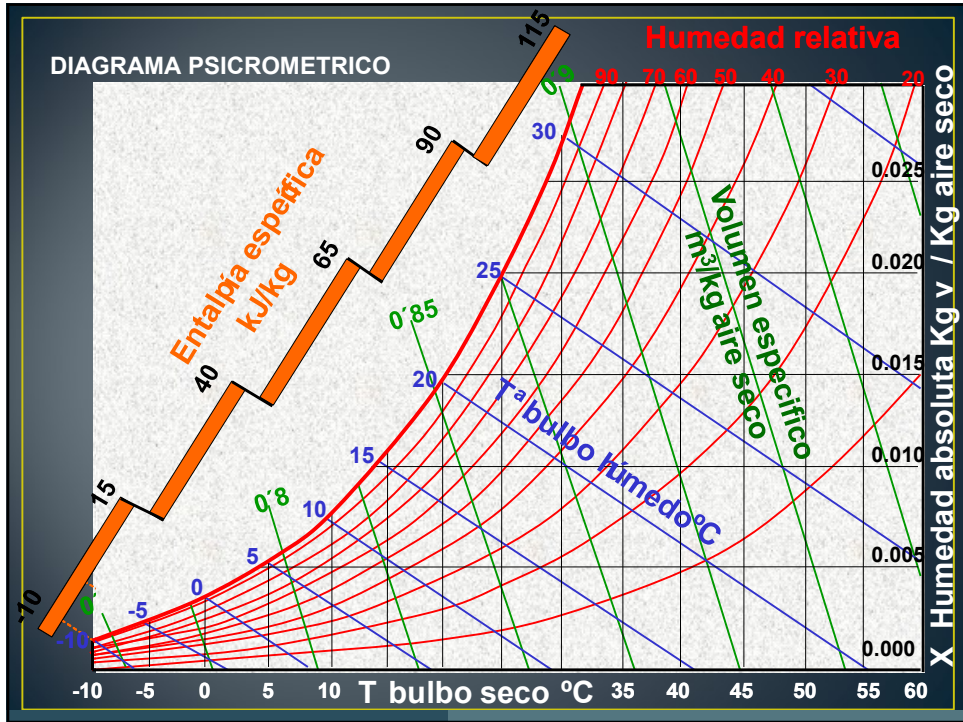
26

## Representación gráfica de la fase vapor de agua en el aire



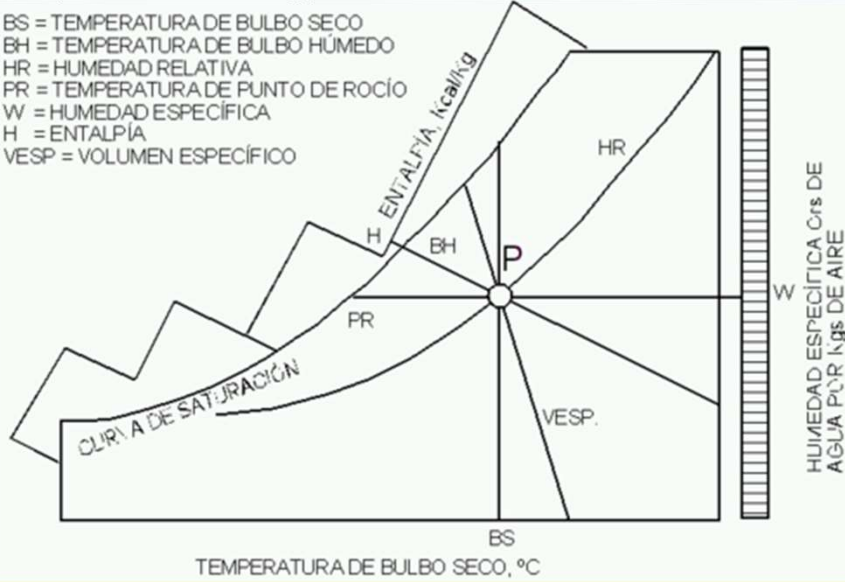
27





## Esquema Diagrama Psicrométrico

BS = TEMPERATURA DE BULBO SECO  
 EH = TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO  
 HR = HUMEDAD RELATIVA  
 PR = TEMPERATURA DE PUNTO DE ROCÍO  
 W = HUMEDAD ESPECÍFICA  
 H = ENTALPIA  
 VESP = VOLUMEN ESPECÍFICO

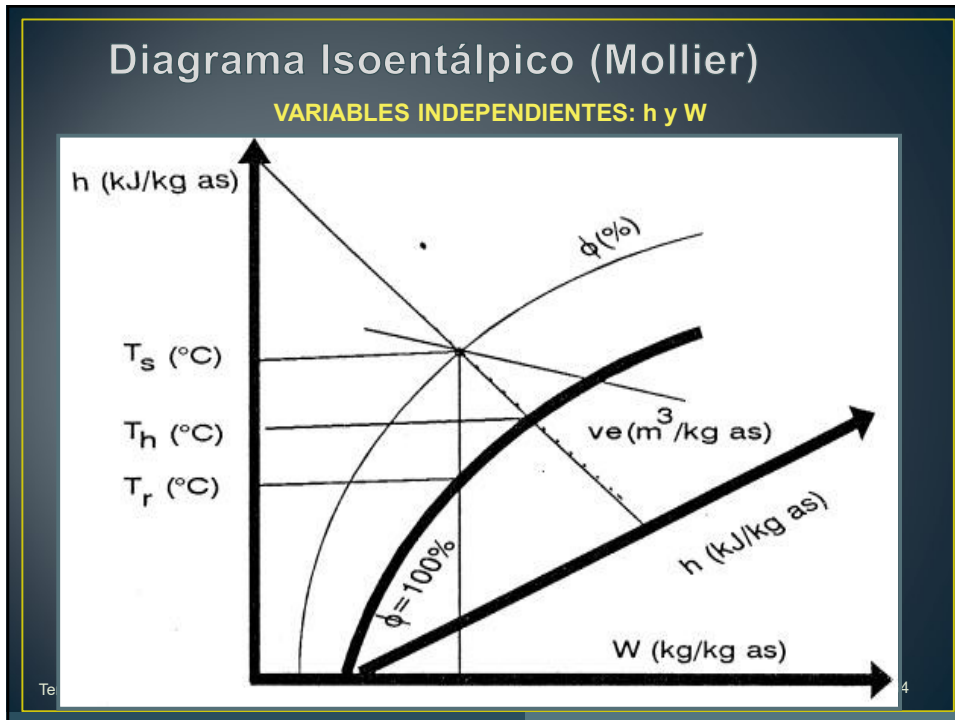


### PROPIEDADES AIRE HUMEDO A PRESION ATMOSFERICA

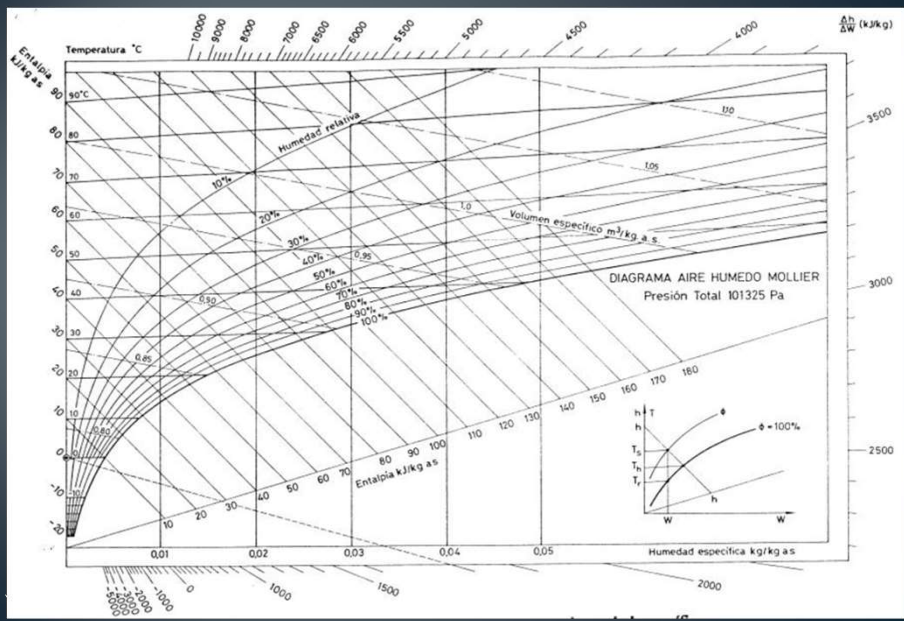
Temperatura Saturación ts °C	Humedad específica Ws kg/kg	volumen específico				Entalpia del aire			Entalpia vapor saturado			Presión Saturación ps kPa	Temperatura saturación ts °C
		va m³/kg	vas m³/kg	vs m³/kg	va m³/kg	ha kJ/kg	has kJ/kg	hs kJ/kg	hf (kJ/kg)	hfg (kJ/kg)	hg (kJ/kg)		
0	0.00378	0.7740	0.0047	0.7787	0.00	9.44	9.44	0.0	2.501.0	2.501.0	0.6112	0	
1	0.00406	0.7768	0.0051	0.7819	1.01	10.16	11.17	4.2	2.499.0	2.503.0	0.6571	1	
2	0.00437	0.7796	0.0065	0.7851	2.01	10.93	12.95	8.4	2.496.0	2.505.0	0.7060	2	
3	0.00469	0.7825	0.0069	0.7884	3.02	11.75	14.77	12.6	2.494.0	2.506.0	0.7581	3	
4	0.00504	0.7863	0.0064	0.7917	4.03	12.63	16.66	16.8	2.491.0	2.508.0	0.8135	4	
5	0.00540	0.7881	0.0068	0.7950	5.03	13.56	18.60	21.0	2.489.0	2.510.0	0.8725	5	
6	0.00580	0.7910	0.0074	0.7983	6.04	14.56	20.60	25.2	2.487.0	2.512.0	0.9353	6	
7	0.00621	0.7938	0.0079	0.8017	7.04	15.62	22.66	29.4	2.484.0	2.514.0	1.0020	7	
8	0.00666	0.7966	0.0085	0.8052	8.05	16.75	24.80	33.6	2.482.0	2.516.0	1.0729	8	
9	0.00713	0.7995	0.0092	0.8086	9.06	17.95	27.01	37.8	2.480.0	2.517.0	1.1482	9	
10	0.00763	0.8023	0.0098	0.8121	10.06	19.23	29.29	42.0	2.477.0	2.519.0	1.2281	10	
11	0.00817	0.8051	0.0106	0.8157	11.07	20.59	31.66	46.2	2.475.0	2.521.0	1.3129	11	
12	0.00873	0.8080	0.0113	0.8193	12.08	22.03	34.11	50.4	2.472.0	2.523.0	1.4027	12	
13	0.00934	0.8108	0.0122	0.8230	13.08	23.57	36.65	54.6	2.470.0	2.525.0	1.4980	13	
14	0.00997	0.8136	0.0130	0.8267	14.09	25.20	39.29	58.8	2.468.0	2.527.0	1.5989	14	
15	0.01065	0.8165	0.0140	0.8304	15.10	26.93	42.03	63.0	2.465.0	2.528.0	1.7057	15	
16	0.01137	0.8193	0.0150	0.8343	16.10	28.77	44.87	67.2	2.463.0	2.530.0	1.8187	16	
17	0.01213	0.8221	0.0160	0.8382	17.11	30.72	47.83	71.4	2.461.0	2.532.0	1.9382	17	
18	0.01294	0.8250	0.0172	0.8421	18.12	32.79	50.90	75.5	2.458.0	2.534.0	2.0646	18	
19	0.01380	0.8278	0.0184	0.8462	19.12	34.98	54.10	79.7	2.456.0	2.536.0	2.1981	19	
20	0.01470	0.8306	0.0196	0.8503	20.13	37.31	57.44	83.9	2.454.0	2.537.0	2.3392	20	
21	0.01566	0.8335	0.0210	0.8545	21.14	39.77	60.90	88.1	2.451.0	2.539.0	2.4881	21	
22	0.01668	0.8363	0.0224	0.8587	22.14	42.38	64.52	92.3	2.449.0	2.541.0	2.6452	22	
23	0.01775	0.8391	0.0239	0.8631	23.15	45.14	68.29	96.5	2.446.0	2.543.0	2.8110	23	
24	0.01889	0.8420	0.0256	0.8675	24.16	48.07	72.22	100.7	2.444.0	2.545.0	2.9857	24	
25	0.02009	0.8448	0.0273	0.8721	25.16	51.16	76.33	104.8	2.442.0	2.547.0	3.1698	25	
26	0.02136	0.8476	0.0291	0.8767	26.17	54.44	80.61	109.0	2.439.0	2.548.0	3.3638	26	
27	0.02271	0.8505	0.0310	0.8815	27.18	57.91	85.08	113.2	2.437.0	2.550.0	3.5690	27	
28	0.02413	0.8533	0.0331	0.8864	28.18	61.57	89.76	117.4	2.435.0	2.552.0	3.7830	28	
29	0.02563	0.8561	0.0353	0.8914	29.19	65.45	94.64	121.6	2.432.0	2.554.0	4.0091	29	



PROPIEDADES AIRE HUMEDO A PRESION ATMOSFERICA												
Temperatura Saturación	Humedad específica	volumen específico			Entalpia del aire			Entalpia vapor saturado			Presión Saturación	Temperatura saturación
$t_s$ °C	$W_s$ kgv/kgas	$v_a$ m <sup>3</sup> /kg	$v_{as}$ m <sup>3</sup> /kg	$v_s$ m <sup>3</sup> /kg	$h_a$ kJ/kg	$h_{as}$ kJ/kg	$h_s$ kJ/kg	$h_f$ (kJ/kg)	$h_g$ (kJ/kg)	$h_g$ (kJ/kg)	$p_s$ kPa	$t_s$ °C
30	0.02722	0.8590	0.0376	0.8966	30.20	69.55	99.75	125.7	2.430.0	2.556.0	4.2469	30
31	0.02866	0.8618	0.0400	0.9018	31.20	73.89	105.09	129.9	2.427.0	2.557.0	4.4969	31
32	0.03066	0.8646	0.0426	0.9073	32.21	78.48	110.89	134.1	2.425.0	2.559.0	4.7596	32
33	0.03254	0.8675	0.0454	0.9128	33.22	83.32	116.54	138.3	2.423.0	2.561.0	5.0354	33
34	0.03451	0.8703	0.0483	0.9186	34.22	88.44	122.66	142.5	2.420.0	2.563.0	5.3251	34
35	0.03660	0.8731	0.0514	0.9245	35.23	93.85	129.08	146.6	2.418.0	2.565.0	5.6291	35
36	0.03880	0.8760	0.0546	0.9306	36.24	99.57	135.81	150.8	2.416.0	2.566.0	5.9480	36
37	0.04112	0.8788	0.0581	0.9369	37.24	105.61	142.86	155.0	2.413.0	2.568.0	6.2824	37
38	0.04358	0.8816	0.0618	0.9434	38.25	112.00	150.25	159.2	2.411.0	2.570.0	6.6330	38
39	0.04617	0.8845	0.0657	0.9501	39.26	118.74	158.00	163.4	2.408.0	2.572.0	7.0003	39
40	0.04891	0.8873	0.0698	0.9571	40.26	125.87	166.14	167.5	2.406.0	2.574.0	7.3851	40
41	0.05180	0.8901	0.0741	0.9643	41.27	133.40	174.68	171.7	2.404.0	2.575.0	7.7880	41
42	0.05485	0.8930	0.0788	0.9717	42.28	141.36	183.64	175.9	2.401.0	2.577.0	8.2098	42
43	0.05808	0.8958	0.0836	0.9795	43.28	149.78	193.06	180.1	2.399.0	2.579.0	8.6511	43
44	0.06148	0.8986	0.0888	0.9875	44.29	158.67	202.96	184.3	2.396.0	2.581.0	9.1127	44
45	0.06508	0.9015	0.0943	0.9958	45.30	168.07	213.36	188.4	2.394.0	2.582.0	9.5953	45
46	0.06888	0.9043	0.1001	1.0045	46.31	178.00	224.31	192.6	2.392.0	2.584.0	10.0998	46
47	0.07290	0.9071	0.1063	1.0135	47.31	188.51	235.82	196.8	2.389.0	2.586.0	10.6269	47
48	0.07714	0.9100	0.1129	1.0228	48.32	199.63	247.94	201.0	2.387.0	2.588.0	11.1775	48
49	0.08163	0.9128	0.1198	1.0326	49.33	211.39	260.71	205.2	2.384.0	2.590.0	11.7524	49
50	0.08638	0.9156	0.1272	1.0428	50.33	223.83	274.16	209.3	2.382.0	2.591.0	12.3525	50
51	0.09140	0.9185	0.1350	1.0534	51.34	237.01	288.35	213.5	2.380.0	2.593.0	12.9786	51
52	0.09671	0.9213	0.1433	1.0646	52.35	250.96	303.31	217.7	2.377.0	2.595.0	13.6318	52
53	0.10234	0.9241	0.1521	1.0762	53.35	265.74	319.09	221.9	2.375.0	2.597.0	14.3129	53
54	0.10830	0.9270	0.1614	1.0884	54.36	281.41	335.77	226.1	2.372.0	2.598.0	15.0229	54
55	0.11462	0.9298	0.1713	1.1012	55.37	298.03	353.39	230.3	2.370.0	2.600.0	15.7628	55
56	0.12132	0.9326	0.1819	1.1146	56.38	315.65	372.03	234.4	2.367.0	2.602.0	16.5337	56
57	0.12842	0.9355	0.1932	1.1286	57.38	334.37	391.75	238.6	2.365.0	2.604.0	17.3365	57
58	0.13597	0.9383	0.2051	1.1434	58.39	354.25	412.64	242.8	2.363.0	2.605.0	18.1723	58
59	0.14399	0.9411	0.2179	1.1590	59.40	375.39	434.79	247.0	2.360.0	2.607.0	19.0422	59
60	0.15251	0.9440	0.2315	1.1754	60.40	397.87	458.28	251.2	2.358.0	2.609.0	19.9474	60
61	0.16158	0.9468	0.2460	1.1928	61.41	421.82	483.23	255.4	2.355.0	2.611.0	20.8889	61
62	0.17123	0.9496	0.2614	1.2111	62.42	447.33	509.74	259.6	2.353.0	2.612.0	21.8680	62
63	0.18153	0.9525	0.2780	1.2305	63.43	474.54	537.96	263.7	2.350.0	2.614.0	22.8859	63
64	0.19252	0.9553	0.2957	1.2510	64.43	503.60	568.03	267.9	2.348.0	2.616.0	23.9437	64
65	0.20426	0.9581	0.3147	1.2728	65.44	534.66	600.10	272.1	2.345.0	2.618.0	25.0427	65
66	0.21681	0.9610	0.3350	1.2960	66.45	567.90	634.35	276.3	2.343.0	2.619.0	26.1843	66
67	0.23026	0.9638	0.3568	1.3206	67.45	603.52	670.98	280.5	2.340.0	2.621.0	27.3697	67

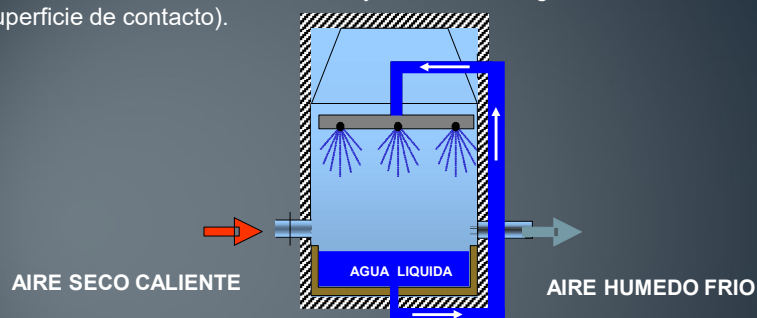


## Diagrama Isoentálpico (Mollier)



## SATURACIÓN ADIABÁTICA

Proceso en el que se incorpora humedad al aire, haciéndole atravesar una cámara aislada térmicamente en cuyo interior cae agua en forma de lluvia (gran superficie de contacto).

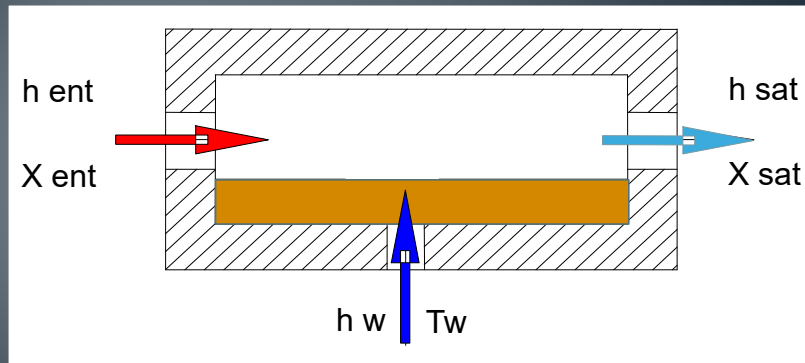


Al pasar el aire por la lluvia de agua, parte de ella se *evapora* produciendo una *disminución de la temperatura del aire y un incremento de la humedad*.

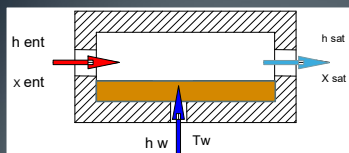
Este proceso se considera que es **adiabático** (no hay pérdidas de calor hacia el exterior del sistema).

Cuando la energía térmica cedida por el aire al agua es igual a la que ésta necesita para vaporizarse, se habrá alcanzado el **equilibrio térmico**.

## PROCESO DE SATURACIÓN ADIABÁTICA



## PROCESO DE SATURACIÓN ADIABÁTICA



Balace de masa

Aire seco  $\dot{m}_{a \text{ seco entrada}} = \dot{m}_{a \text{ seco salida}}$

Agua  $\dot{m}_w \text{ entrada} + \dot{m}_{\text{agua}} = \dot{m}_w \text{ salida}$

$$\dot{m}_{as \text{ ent}} x_{ent} + \dot{m}_{\text{agua}} = \dot{m}_{as \text{ sal}} x_{sal}$$

$$\dot{m}_{\text{agua}} = \dot{m}_{as} (x_{sal} - x_{ent})$$

Balace de energía

$$H_{ent} + H_{\text{agua}} = H_{sal}$$

$$\dot{m}_{as \text{ ent}} h_{ent} + \dot{m}_{\text{agua}} h_{\text{agua}} = \dot{m}_{as \text{ sal}} h_{sal}$$

$$\dot{m}_{as} h_{ent} + \dot{m}_{as} (x_{sal} - x_{ent}) h_{\text{agua}} = \dot{m}_{as} h_{sal}$$

Div por  $m_{as}$   $h_{ent} + (x_{sal} - x_{ent}) h_{\text{agua}} = h_{sal}$   $\left[ \frac{KJ}{Kg \text{ aire seco}} \right]$

## SATURACIÓN ADIABÁTICA: Balance de Energía

$$h_{ent} + (x_{sal} - x_{ent}) h_{agua} = h_{sal} \quad \left[ \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}_{\text{aire seco}}} \right]$$

donde:

$$\text{Entalpia de entrada} \quad h_e = C_{pa} * T_e + X_e * (h_{L-V} + C_{pv} * T_e)$$

$$\text{Entalpia de salida} \quad h_s = C_{pa} * T_s + X_s * (h_{L-V} + C_{pv} * T_s)$$

$$\text{Entalpia del agua} \quad h_w = (X_s - X_e) * C_{p \text{ liq.}} * T_s$$

## SATURACIÓN ADIABÁTICA

$$h_e \approx h_s$$

$$C_{pa} * T_e + X_e * (h_{LV} + C_{pv} * T_e) = C_{pa} * T_s + X_s * (h_{LV} + C_{pv} * T_s)$$

Sacando factor común  $T_e$  y  $T_s$ :

$$T_e * (C_{pa} + X_e * C_{pv}) = T_s * (C_{pa} + X_s * C_{pv}) + (X_s - X_e) * h_{LV}$$

$$\begin{aligned} (C_{pa} \gg X_e * C_{pv}) & \therefore (C_{pa} + X_e * C_{pv}) \cong C_{pa} \\ (C_{pa} \gg X_s * C_{pv}) & \therefore (C_{pa} + X_s * C_{pv}) \cong C_{pa} \end{aligned}$$

$$T_e * (C_{pa}) = T_s * (C_{pa}) + (X_s - X_e) * (h_{LV})$$

$$(T_e - T_s) * C_{pa} = (X_s - X_e) * h_{LV}$$

$$T_s = T_e - \frac{h_{L-V}}{C_{pa}} * (X_s - X_e)$$

**TEMPERATURA DE SATURACIÓN ADIABÁTICA**

$$h_{ent} + (X_{sal} - X_{ent}) * h_{w_{sal}} = h_{sal}$$

$$h = c_{p_a} * T + X * (h_{LV_0^c} + c_{p_v} * T) \quad h_{v_{T^c}} \approx (h_{LV_0^c} + c_{p_v} * T)$$

$$c_{p_a} * T_{ent} + X_{ent} * h_{v_{ent}} + (X_{sal} - X_{ent}) * h_{w_{sal}} = c_{p_a} * T_{sal} + X_{sal} * h_{v_{sal}}$$

$$c_{p_a} * (T_{ent} - T_{sal}) + X_{ent} * (h_{v_{ent}} - h_{w_{sal}}) = X_{sal} * (h_{v_{sal}} - h_{w_{sal}})$$

$$(h_{v_{sal}} - h_{w_{sal}}) = h_{LV_{sal}}$$

$$c_{p_a} * (T_{ent} - T_{sal}) + X_{ent} * (h_{v_{ent}} - h_{w_{sal}}) = X_{sal} * h_{LV_{sal}}$$

Si consideramos el cálculo de la Temperatura de bulbo húmedo:

$$T_{ent} = T_{bs} \quad y \quad T_{sal} = T_{bh}$$

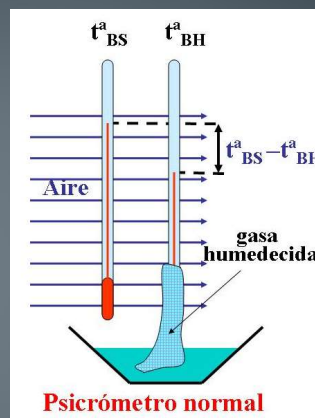
$HR_{sal} = 1$  " el aire húmedo sale saturado "

$$c_{p_a} * (T_{bs} - T_{bh}) + X_{ent} * (h_{v_{ent}} - h_{w_{sal}}) = X_{sal} * h_{LV_{sal}}$$

$$T_{bh} = T_{bs} - \frac{X_{sal} * h_{LV_{sal}} - X_{ent} * (h_{v_{ent}} - h_{w_{sal}})}{c_{p_{aire}}}$$

41

## TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO



Equilibrio térmico

$$dQ_{evap} = dQ_{aire}$$

## TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO

$$dQ_{evap} = h_{L-V} * dW \quad \text{Calor requerido por la evaporación del agua}$$

Agua evaporada

$$dW = \sigma * S * (X_S - X) d\tau$$

$\sigma = \text{constante proporcionalidad} \left[ \frac{Kg}{m^2 * h} \right]$

$S = \text{superficie intercambio paño} [m^2]$   
 $\tau = \text{tiempo} [h]$

$K = \text{Transmitancia} \left[ \frac{Kcal}{m^2 * C} \right]$

Reemplazando:  $dQ_{evap} = h_{L-V} * \sigma * S * (X_S - X) d\tau$

Calor extraído del aire y transferido por conductividad hacia el paño húmedo

$$dQ_{aire} = K * S * (T - T_{bh}) d\tau$$

$$dQ_{evap} = dQ_{cond} \quad \text{Equilibrio térmico}$$

## TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO

$$dQ_{evap} = dQ_{cond} \quad \text{Equilibrio térmico}$$

$$K * S * (T - T_{bh}) d\tau = h_{L-V} * \sigma * S * (X_S - X) d\tau$$

despejando:

$$T = T_{bh} + \frac{h_{L-V} * \sigma}{K} * (X_S - X)$$

Para la temperatura  $t_{bh}$

**TEMPERATURA  
DE BULBO  
HUMEDO**

$$T_{bh} = T - \frac{h_{L-V} * \sigma}{K} * (X_S - X)$$

## COMPARACION ENTRE LA T<sub>bh</sub> Y LA T<sub>sat</sub> adiab.

Temperatura de bulbo húmedo

$$T_{bh} = T - \frac{h_{L-V} * \sigma}{K} * (X_S - X)$$

Temperatura de saturación  
adiabática

$$T_s = T_e - \frac{h_{L-V} * (X_S - X_e)}{C_{pa}}$$

Lewis demostró la siguiente igualdad  
para el aire húmedo en condiciones  
atmosféricas:

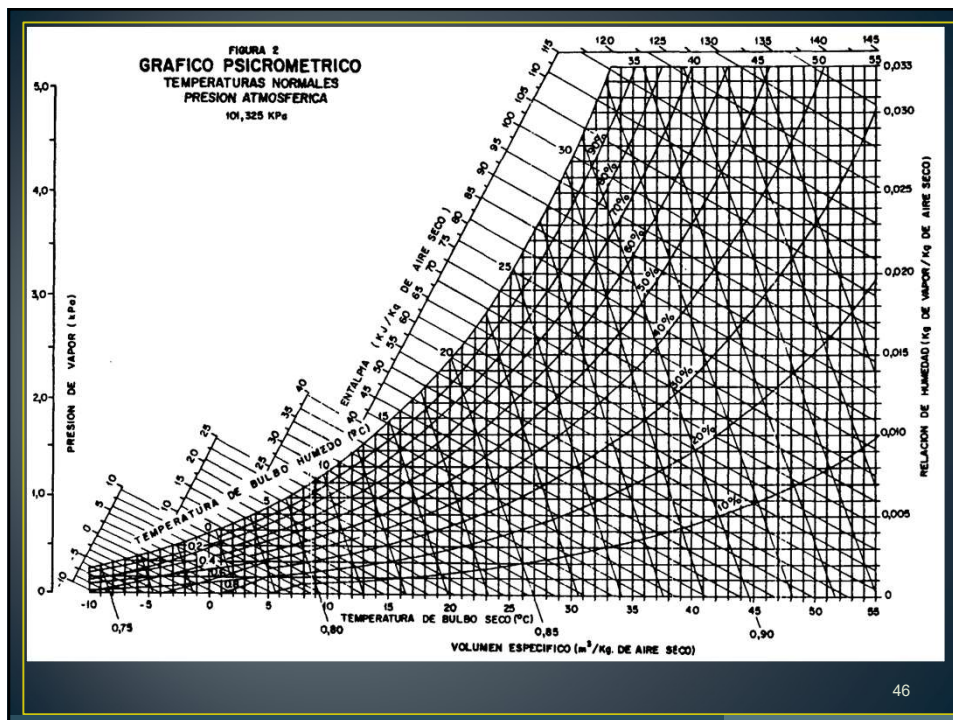
$$\frac{C_{pa} * \sigma}{K} = 1 \quad \rightarrow \quad \frac{\sigma}{K} = \frac{1}{C_{pa}}$$

despejando:

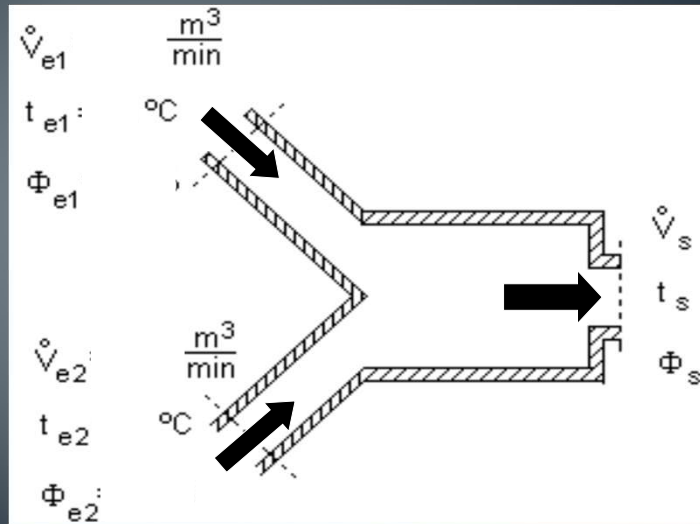
$$T_s \cong T_{bh}$$

Se demuestra que la Temperatura de Saturación Adiabática es similar a la  
Temperatura de Bulbo Húmedo

45



## Mezcla de flujos



## Mezcla de flujos

### Balance de masa

- ⊙ Por la ley de la conservación de la masa debe cumplirse que la masa de agua contenida en las corrientes de entrada se debe mantener a la salida (mezcla).

$$M_I \cdot x_I + M_{II} \cdot x_{II} = M_m \cdot x_m$$

$$\left[ \text{kg as / hora} \cdot \text{kg agua / kg as} \right]$$

siendo:

- $M_I$
  - $M_{II}$
  - $M_m$
- } gasto de aire seco en ( I ), ( II ) y mezcla
- $x_I$
  - $x_{II}$
  - $x_m$
- } agua por kg de aire seco en ( I ), ( II ) y mezcla



## Mezcla de flujos

### Balance de energía

- Por el 1er. Ppio. Sistemas Abiertos se cumple que la energía en las corrientes de entrada se debe mantener a la salida (mezcla).

$$M_I h_I + M_{II} \cdot h_{II} = M_m \cdot h_m \quad \left( \text{kg as / hora} \cdot \text{KJ / kg as} \right)$$

siendo:

▪ $M_I$	} gasto de aire seco en ( I ), ( II ) y mezcla
▪ $M_{II}$	
▪ $M_m$	
▪ $h_I$	} KJ por kg de aire seco en ( I ), ( II ) y mezcla
▪ $h_{II}$	
▪ $h_m$	

## Mezcla de flujos

### Balance de masa

$$\frac{M_I \cdot x_I + M_{II} \cdot x_{II}}{M_m} = x_m \quad \left( \text{kg agua / hora} \cdot \text{kg as} \right)$$

### Balance de energía

$$\frac{M_I \cdot h_I + M_{II} \cdot h_{II}}{M_m} = h_m \quad \left( \text{KJ / hora} \cdot \text{kg as} \right)$$

## Mezcla de corrientes

### Entalpía de la mezcla

$$h_m = C_p \cdot T_m + x_m \cdot (C_v \cdot T_m + h_{LV}) \quad \left[ \begin{array}{l} \text{KJ / hora} \cdot \text{kg as} \\ \text{Kcal / hora} \cdot \text{kg as} \end{array} \right]$$

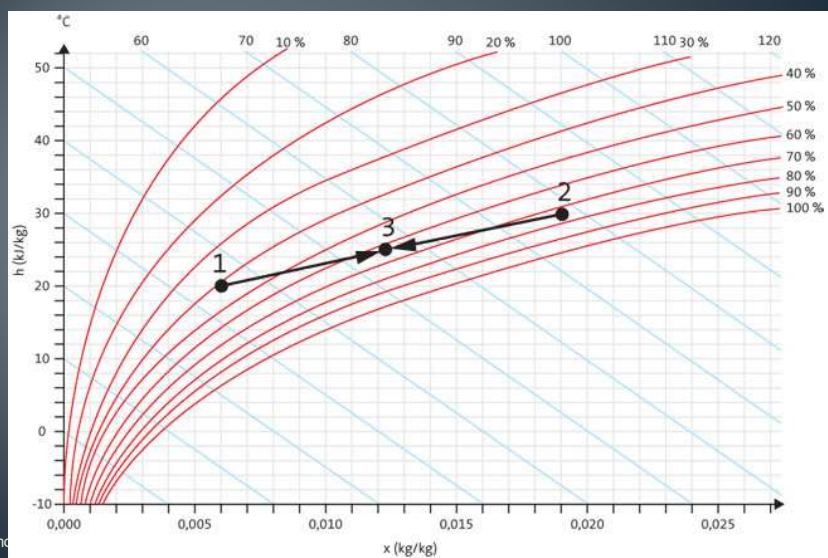
$$h_m = 0.24 T_m + x_m (0.47 T_m + h_{LV}) \quad \left[ \text{Kcal / hora} \cdot \text{kg as} \right]$$

### Temperatura de la mezcla

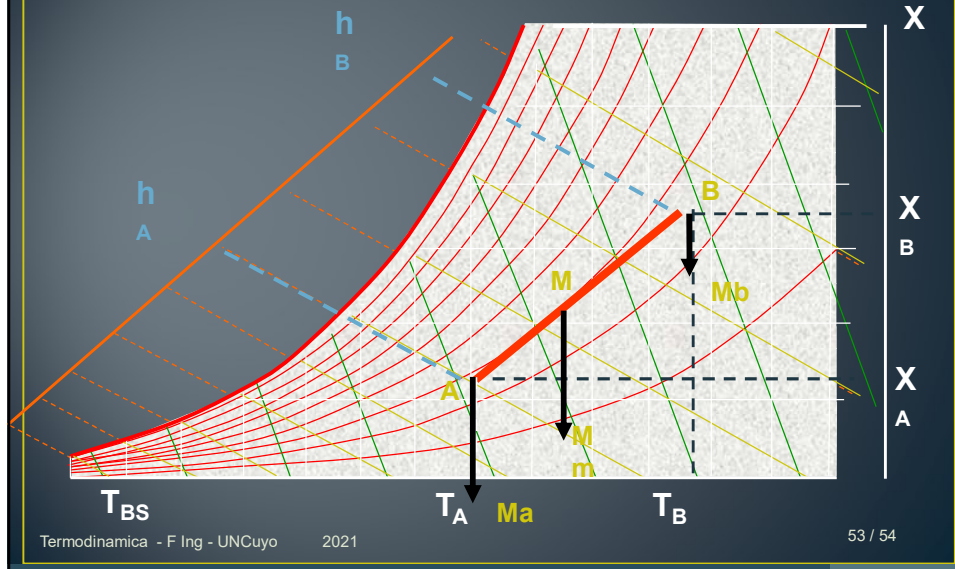
$$T_m = \frac{h_m - h_{LV} \cdot x_m}{C_p + x_m \cdot C_v} \quad \left[ ^\circ\text{C} \right]$$

## Diagrama Isoentálpico (Mollier)

### Mezcla de flujos



## Mezcla de 2 caudales de aire húmedo

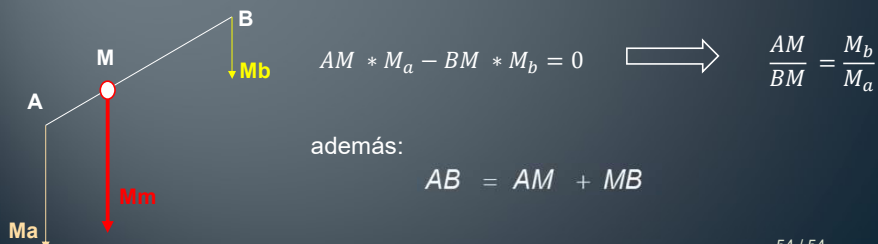


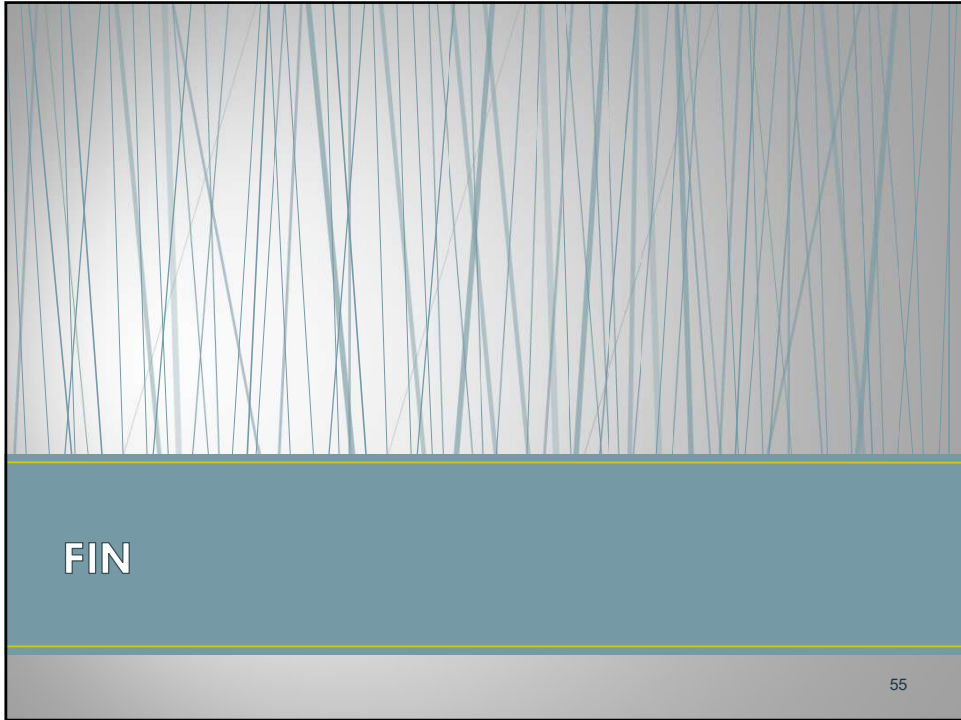
## MEZCLAS DE AIRE HUMEDO

- Corriente A:  $M_a$  [kg aire] \*  $X_a$  [kg agua / kg aire seco]
- Corriente B:  $M_b$  [kg aire] \*  $X_b$  [kg agua / kg aire seco]
- Corriente M (A + B):  $M_m$  [kg aire] \*  $X_m$  [kg agua / kg aire seco]

$$X_m = \frac{M_a X_a + M_b X_b}{M_m} \quad \text{además:} \quad M_m = M_a + M_b$$

**Resolución gráfica:** se plantea un equilibrio de fuerzas





FIN