

# LECTURA COMPLEMENTARIA PARTE II. EL AIRE HÚMEDO Y CÁLCULO DE LAS VARIABLES QUE DETERMINAN SU ESTADO

## ÍNDICE

### 1- Nociones básicas

### 2- El aire saturado

### 3- Las variables que determinan el estado del aire húmedo

#### 3.1- Temperatura seca

#### 3.2- Temperatura húmeda

#### 3.3- Temperatura de punto de rocío

#### 3.4- Humedad absoluta real y a saturación

#### 3.5- Humedad específica real y a saturación

#### 3.6- Humedad relativa

#### 3.7- Déficit de saturación

#### 3.8- Entalpía total, sensible y latente

### 4. Equivalencia entre las variables del aire húmedo

### 5- Cálculo de las variables de estado del aire húmedo

#### 5.1- A partir del diagrama de Mollier

#### 5.2- A partir de fórmulas

### 1- Nociones básicas

El aire húmedo puede considerarse como una mezcla de gases ideales que comprende el aire seco (21% de O<sub>2</sub> y 79 % de N<sub>2</sub>), más una cantidad variable de vapor de agua no saturante. Para los valores de temperatura que existen en la atmósfera, el aire atmosférico se comporta prácticamente como un gas perfecto y, como tal, su ecuación de estado es:

$$P V = \frac{m}{M} R T$$

siendo:

P = presión, kPa

V = volumen (m<sup>3</sup>)

m = masa de gas (kg)

M = masa molar del gas (par el aire: M= 0,029 kg mol<sup>-1</sup>; para el vapor de agua: M = 0,018 kg mol<sup>-1</sup>)

R = constante de los gases perfectos (R = 0,008314 kPa m<sup>3</sup> mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>), lo que equivale a 0,008314 J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)

T = temperatura en K

A partir de la ecuación anterior, se deduce la densidad del gas,  $\rho$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ):

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{M P}{R T}$$

Para el aire seco, a una presión de 101.3 kPa (o 1013 mb), el valor de la densidad es: a 0 °C (273 K)  $\rho = 1.29 \text{ kg m}^{-3}$ ; a 25°C (298 K)  $\rho = 1.19 \text{ kg m}^{-3}$ .

Como se ha indicado, el aire seco y el vapor de agua no saturante se consideran como gases perfectos y su mezcla cumple la ley de Dalton de mezcla de gases. Así pues, para el aire atmosférico, la presión total,  $P_A$ , es igual a la suma de la presión parcial del aire seco,  $p_a$ , y de la presión parcial del vapor de agua,  $e$ . La presión parcial de un constituyente se define como la presión que ejercería si ocupase él solo todo el volumen V.

$$P_A = p_a + e$$

Esta ecuación es válida cuando el vapor de agua no es saturante.

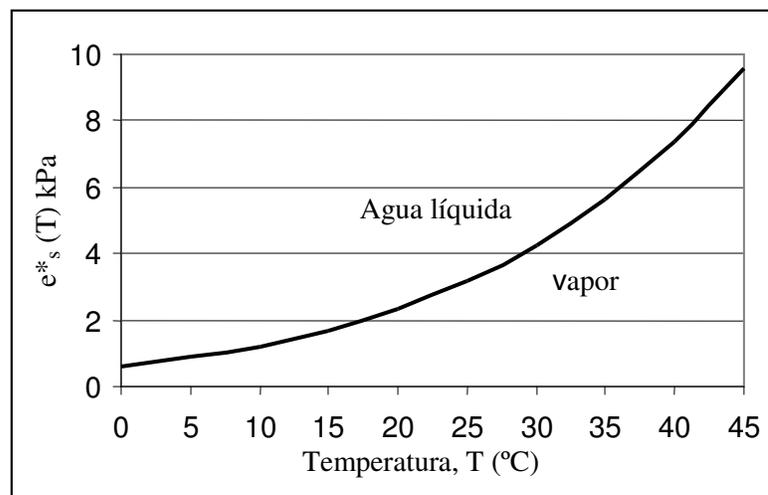
## 2- El aire saturado

Para hacer pasar el agua del estado líquido al estado vapor es preciso aplicar una cierta cantidad de energía por unidad de masa que se conoce como calor latente de vaporización del agua,  $\lambda$ . Para 0 °C,  $\lambda$  es igual 2501,3 kJ  $\text{kg}^{-1}$ . Esto implica que el proceso de evaporación (= transpiración para los vegetales) requiere cantidades importantes de energía, ya que se utiliza una fracción considerable de la radiación solar para hacer pasar el agua de líquido a vapor, lo que permite regular la temperatura de las superficies que evaporan. El calor latente de vaporización disminuye con la temperatura según la relación:

$$\lambda = 2501,3 - 2,42 T$$

con  $\lambda$  en kJ  $\text{kg}^{-1}$  y T = temperatura del aire en °C

Se ha demostrado experimentalmente que la tensión de vapor saturante,  $e^*_s(T)$ , (o tensión de vapor en equilibrio con el agua líquida) depende solamente de la temperatura (Figura 1).



**Figura 1.** Curva de presión de vapor saturante en función de la temperatura,  $e^*_s(T)$ .

### 3- Las variables que determinan el estado del aire húmedo

Son numerosas las propiedades que caracterizan el estado del aire y su grado de saturación con vapor de agua. En la mayoría de los casos, basta con conocer dos de estas propiedades para poder estimar todas las demás, ya sea a partir del diagrama de Mollier o a partir de fórmulas (ver Apartado 5).

#### 3.1- Temperatura seca, $T_s$ (temperatura de bulbo seco)

Se define como la temperatura del aire cuando está exento de vapor de agua y de contaminantes. Es la temperatura que se utiliza como referencia y corresponde a la temperatura que proporciona una sonda en equilibrio térmico con el aire cuando está protegida de la radiación solar (ver Unidad 2).

#### 3.2 - Temperatura húmeda, $T_h$ , (temperatura de bulbo húmedo)

La temperatura del aire disminuye cuando se utiliza parte de su energía para la evaporación de agua líquida. Cuando se enfría una masa de aire hasta el punto de saturación, *manteniendo su contenido energético*, se alcanza la temperatura húmeda, que representa la temperatura más baja a la que se puede enfriar el aire sin provocar el proceso de condensación.

#### 3.3- Temperatura de punto de rocío, $T_r$

Se define como la temperatura a la que hay que enfriar el aire, guardando su contenido en humedad absoluta, para que se produzca el proceso de condensación.

#### 3.4- Humedad absoluta real, $q_a$ , y a saturación, $q^*_s(T)$

La humedad absoluta real o actual representa la cantidad de vapor de agua por unidad de masa de aire. Por lo tanto, se expresa en  $g\ kg^{-1}$ ,  $kg\ kg^{-1}$ , etc. Bajo condiciones en las que el aire está saturado, la humedad absoluta a saturación,  $q^*_s(T)$ , depende solamente de la temperatura (ver Apartado 2, presión de vapor saturante).

#### 3.5- Humedad específica real, $x_a$ , y humedad específica a saturación, $x^*_s(T)$

La humedad específica real o actual representa la cantidad de vapor de agua por unidad de volumen de aire. Por lo tanto, se expresa en  $g\ m^{-3}$ ,  $kg\ m^{-3}$ , etc. Bajo condiciones en las que el aire está saturado, la humedad específica a saturación,  $x^*_s(T)$ , depende solamente de la temperatura.

#### 3.6- Humedad relativa, HR

Representa el cociente entre la cantidad de vapor de agua real del aire y la cantidad que tendría si estuviese saturado de humedad (HR=100 %). Se puede entonces calcular, en %, a partir de una de las tres relaciones siguientes:

$$HR = \frac{q_a}{q^*_s(T_s)} 100 = \frac{x_a}{x^*_s(T_s)} 100 = \frac{e_a}{e^*_s(T_s)} 100$$

#### 3.7- Déficit de saturación, $D_a$

Representa el contenido de vapor de agua que requiere el aire para alcanzar la saturación. Se calcula como la diferencia entre el contenido de vapor de agua a saturación y el contenido de vapor real o actual. Se puede definir respecto a  $q_a$  o respecto a  $x_a$  a partir de las relaciones siguientes:

$$D_a = q_a^*(T_s) - q_a \quad \text{con } D_a \text{ en } g\ kg^{-1}$$

$$D_a = x_a^*(T_s) - x_a \quad \text{con } D_a \text{ en } g\ m^{-3}$$

Se puede expresar también como la diferencia entre la tensión de vapor saturante y la tensión de vapor real o actual:

$$D_a = e_a^*(T_s) - e_a \quad \text{con } D_a \text{ en kPa}$$

### 3.8- Entalpía total del aire, $E_t$

Es la magnitud que caracteriza el contenido energético total del aire por unidad de masa. Se expresa en  $\text{J kg}^{-1}$  aire,  $\text{kJ kg}^{-1}$  aire, etc. La entalpía total integra:

#### Entalpía sensible, $E_s$

Representa la cantidad de calor sensible que gana o pierde el aire por unidad de masa debido a un cambio de temperatura. Cuanto mayor sea la variación de temperatura, mayor será la cantidad de calor que puede ganar o perder.

La entalpía sensible del aire tiene en cuenta el calor sensible contenido en el aire seco y el calor sensible contenido en el vapor de agua. Para una temperatura seca  $T_s$  y una humedad absoluta  $q_a$ , si definimos como origen de la entalpía  $E_s(0^\circ\text{C}) = 0$ ,  $E_s$  (en  $\text{kJ kg}^{-1}$  aire) se determina a partir de la relación:

$$E_s = C_{p,a} T_s + C_{p,ag} \frac{q_a}{1000} T_s$$

con:

$$C_{p,a} = \text{capacidad calorífica del aire definida a } 0^\circ\text{C} (= 1,006 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ aire } ^\circ\text{C}^{-1})$$

$$C_{p,ag} = \text{capacidad calorífica del agua definida a } 0^\circ\text{C} (= 1,805 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ agua } ^\circ\text{C}^{-1})$$

$$T_s = \text{temperatura seca del aire, } ^\circ\text{C}$$

$$q_a = \text{humedad absoluta actual o real del aire, g kg}^{-1}$$

#### Entalpía latente, $E_L$

Representa la cantidad de calor, por unidad de masa de aire, que requiere el cambio de estado del agua (paso de líquido a vapor). En este caso, se caracteriza por el calor latente de vaporización,  $\lambda$ , que corresponde a la energía que hay que aplicar por unidad de masa de agua para que pase del estado líquido al de vapor a temperatura constante. Si definimos como origen la entalpía del vapor de agua a  $0^\circ\text{C}$  ( $=2501,3 \text{ kJ kg}^{-1}$ ), la entalpía latente del aire,  $E_L$ , corresponde a:

$$E_L = \lambda \frac{q_a}{1000}$$

con  $E_L$  en  $\text{kJ kg}^{-1}$  aire,  $q_a$  en  $\text{g}_{\text{agua}} \text{ kg}^{-1}$  aire,  $\lambda$  definido a  $0^\circ\text{C}$  ( $= 2501,3 \text{ kJ kg}^{-1}$  agua).

## 4- Equivalencia entre las variables del aire húmedo

Una masa de aire se caracteriza por:

- La masa total,  $m$  (g, kg, etc.)
- La densidad,  $\rho$  ( $\text{kg m}^{-3}$ )
- El volumen total  $V$  ( $\text{cm}^3$ ,  $\text{m}^3$ , etc.)
- Los constituyentes de la mezcla (en este caso, el constituyente  $i$  = vapor de agua)
- $m_i$  = masa del constituyente  $i$
- $n_i$  = número de moles del constituyente  $i$
- $M_i$  = peso molecular del constituyente  $i$  ( $\text{g mol}^{-1}$ ,  $\text{kg mol}^{-1}$ , etc.)

Partiendo de estos datos se pueden utilizar las magnitudes siguientes para determinar la humedad del aire (ver Cuadro 1):

- Concentración molar ( $x_{mi}$ , mol m<sup>-3</sup>)
- Humedad específica o concentración másica ( $x_i$ , g m<sup>-3</sup>)
- Humedad absoluta o fracción másica ( $q_i$ , g kg<sup>-1</sup>)
- Presión parcial de vapor ( $e_i$ , g kg<sup>-1</sup>)

Magnitud	Equivalencia a 25 °C (i= vapor de agua)
<b>Concentración molar</b> $x_{mi}$ (mol vapor agua/m <sup>3</sup> aire)	<b>Presión de vapor parcial:</b> $x_{mi} = \frac{n_i}{V} = \frac{e_i}{RT}$ Ejemplo, $e_i = 1$ kPa equivale a: $= \frac{1}{(0,00831)(25 + 273)} = 0,4038 \text{ mol/m}^3$
<b>Humedad específica:</b> $x_i$ (g/m <sup>3</sup> aire)	<b>Concentración molar:</b> $x_i = x_{mi} M_i = \frac{e_i}{RT} M_i$ Ejemplo $x_{mi} = 0,4038$ mol/m <sup>3</sup> equivale a $0,4038 \times 18 = 7,26$ g/m <sup>3</sup>
<b>Humedad absoluta:</b> $q_i$ (g vapor agua /kg aire)	<b>Humedad específica:</b> $q_i = x_i / \rho$ Ejemplo $x_i = 1$ g/m <sup>3</sup> equivale a: $q_i = 1/1,19 = 0,8403$ g/kg
<b>Humedad absoluta:</b> $q_i$ (g vapor agua/kg aire)	<b>Presión de vapor parcial:</b> $q_i = \frac{e_i}{RT} \frac{M_i}{\rho}$ Ejemplo $e_i = 1$ kPa equivale a: $q_i = \frac{(1)}{(0,00831)(25 + 273)} \left( \frac{18}{1,19} \right) = 6,108 \text{ g / kg}$

## 5- Cálculo de las variables de estado del aire húmedo

El diagrama de Mollier que se da en lo que sigue permite caracterizar el aire húmedo cuando se conocen al menos dos variables de estado.

### 5.1- A partir del diagrama de Mollier

#### A- Determinación de las variables

En el diagrama se presenta un ejemplo para el caso más frecuente, es decir, cuando se conocen, como datos de partida, HR y T<sub>s</sub>. A partir de la intersección entre la curva HR= 50 % y la recta T<sub>a</sub> = 25 °C se puede determinar el estado actual del aire (punto 1 en el diagrama), es decir:

- La humedad absoluta, desplazándose a q<sub>a</sub> = cte. desde el punto (1) hasta el eje de humedad absoluta lo que da q<sub>a</sub> = 10 g kg<sup>-1</sup>, que equivale en el diagrama a una tensión de vapor actual de e<sub>a</sub> = 1,6 kPa.

- La humedad absoluta a saturación q<sup>\*</sup><sub>s</sub>(T) = 20 g kg<sup>-1</sup>, que depende, para una determinada presión, solamente de la temperatura. El valor de q<sup>\*</sup><sub>s</sub>(T) se obtiene desplazándose, a temperatura constante,

desde el punto (1) hasta la curva de saturación (HR= 100%). Su equivalencia en presión corresponde a  $e^*_s(T) = 3,2$  kPa.

- La entalpía total  $E_t = 50$  kJ kg<sup>-1</sup> que se obtiene desplazándose desde el punto (1) a entalpía constante hasta el eje que da  $E_t$ .

Partiendo de las definiciones de temperatura húmeda y de punto de rocío se determina:

-  $T_h$  desplazándose en el diagrama, a entalpía constante, desde el punto (1) hasta la curva de saturación. Luego, en este caso,  $T_h = 18$  °C.

-  $T_r$  desplazándose en el diagrama, a humedad absoluta constante, desde el punto (1) hasta la curva de saturación. Luego, en este caso,  $T_r = 14$  °C.

Se puede verificar que se obtiene el valor inicial de la humedad relativa:  $HR = (q_a/q^*_s(T))100 = 50$  %. El valor del déficit de saturación del aire se obtiene de la relación  $D_a = q^*_s(T) - q_a = 10$  g kg<sup>-1</sup>, lo que equivale a  $D_a = 1,5$  kPa.

Si tomamos otros datos de partida, por ejemplo la temperatura,  $T_s = 27$  °C, y el déficit de saturación del aire,  $D_a = 15,4$  g kg<sup>-1</sup>, se pueden determinar el resto de variables de estado como sigue:

- Por definición, el déficit de saturación es,  $D_a = q^*_s(T) - q_a$ .

- Conociendo la temperatura se determina, como en el caso anterior, la humedad absoluta a saturación  $q^*_s(T) = 22,2$  g kg<sup>-1</sup>, lo que equivale a  $e^*_s(T) = 3,6$  kPa.

- La humedad absoluta actual es  $q_a = 22,2 - 15,4 = 6,8$  g kg<sup>-1</sup>, lo que equivale a una presión parcial de vapor,  $e_a = 1,1$  kPa.

- Desplazándose a  $q_a = \text{cte}$  hasta alcanzar la curva de saturación se obtiene  $T_r = 9$  °C.

- Desplazándose a  $q_a = \text{cte}$  hasta alcanzar la recta que da la temperatura seca  $T_s = 27$  °C, se determina, como en el caso anterior, la humedad relativa  $HR = 30$  %.

- La entalpía total, que corresponde a la intersección entre la recta que da  $T_s = 27$  °C y  $HR = 30$  %, es  $E_t = 43,8$  kJ kg<sup>-1</sup>.

- Desplazándose a  $E_t = \text{cte}$  desde el punto (1) hasta la curva de saturación, se obtiene la temperatura húmeda,  $T_h = 15,8$  °C.

### **B- Relaciones que se derivan del diagrama de Mollier**

Del diagrama de Mollier se deduce que:

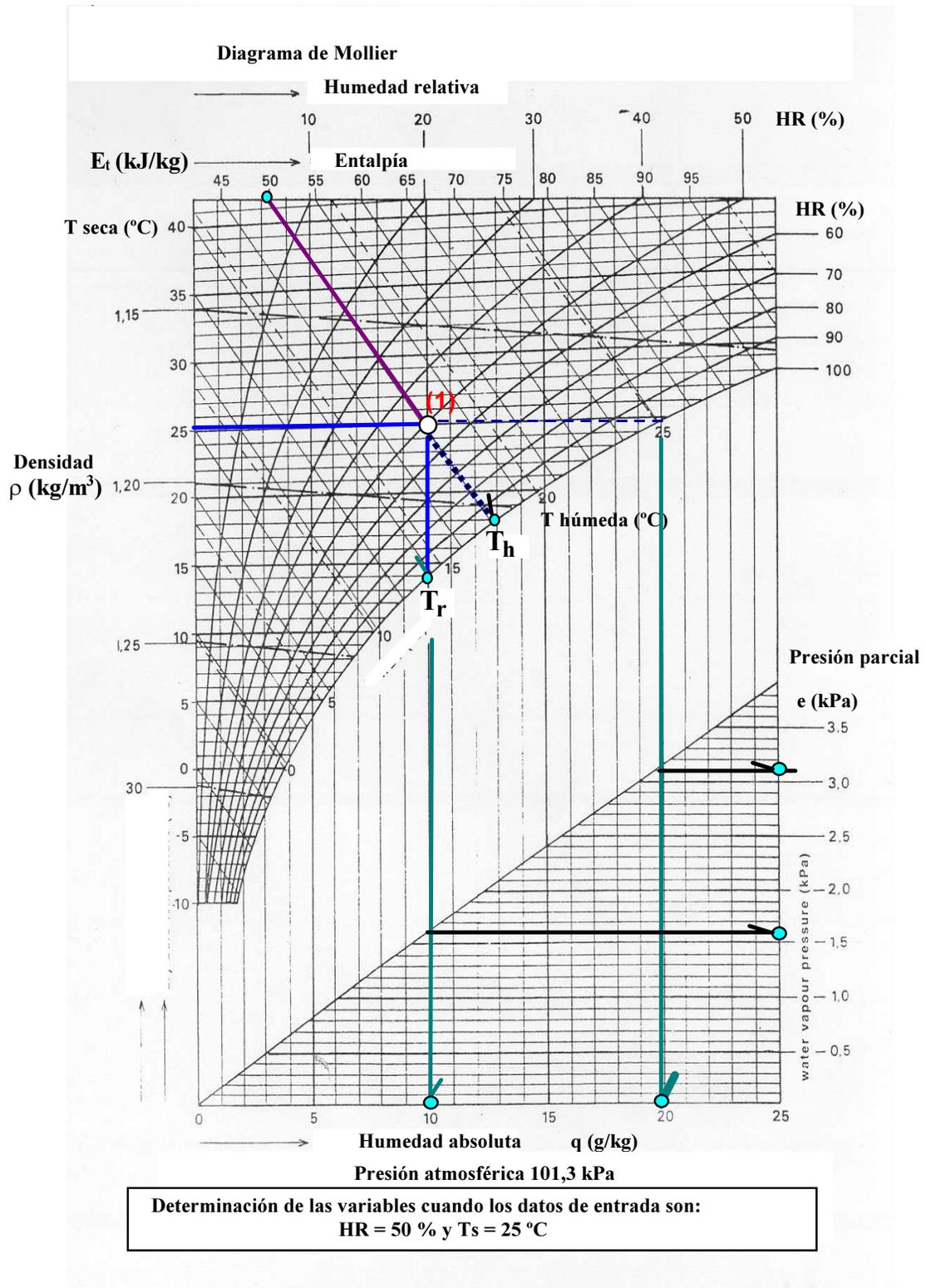
- La humedad absoluta actual es igual a la humedad absoluta a saturación a la temperatura de punto de rocío, luego:

$$e_a = e^*_s(T_r)$$

- Para que exista condensación sobre una superficie su temperatura,  $T_{su}$ , debe ser igual o inferior a la temperatura de punto de rocío del aire, luego hay condensación cuando:

$T_{su} \leq T_r$ , lo que equivale a decir que hay condensación cuando la tensión de vapor saturante a la temperatura de la superficie es inferior o igual a la temperatura de punto de rocío:

$$e^*_s(T_{su}) \leq e^*_s(T_r)$$



Si partimos de la consideración que la tensión de vapor actual es igual a la tensión de vapor saturante a la temperatura de punto de rocío ( $e_a = e^*_s(T_r)$ ), también se puede decir que hay condensación cuando se cumple que:

$$e^*_s(T_{su}) \leq e_a$$

- Cuando dos masas de aire tienen la misma humedad relativa y una temperatura diferente la humedad absoluta real (o tensión de vapor real) siempre será superior en la masa de aire que tiene mayor temperatura.

- No se debe utilizar la humedad relativa como indicador para comparar el contenido de humedad de dos masas de aire que tienen temperatura y HR diferentes. Por ejemplo, se deduce del diagrama de Mollier que:

- un invernadero (1) con:  $T_a = 20\text{ °C}$  y  $HR = 60\%$ , la humedad absoluta es  $q_a = 9\text{ g kg}^{-1}$

un invernadero (2) con:  $T_a = 10\text{ °C}$  y  $HR = 90\%$ , la humedad absoluta es  $q_a = 7\text{ g kg}^{-1}$

- Para alcanzar en el invernadero (1) una humedad absoluta de  $7\text{ g kg}^{-1}$  su humedad relativa debería ser  $HR = 48\%$ .

## 5.2- A partir de fórmulas

### A- Tensión de vapor saturante

Como ya hemos indicado, la tensión de vapor saturante del aire ( $P = 101,3\text{ kPa}$ ) depende solamente de la temperatura. Existen varias relaciones para calcular  $e^*_s(T)$ , una de ellas es la fórmula de Alt<sup>1</sup>:

$$e^*_s(T) = 0,6107 \left[ 1 + \sqrt{2} \sin\left(\frac{T}{3}\right) \right]^{8,827}$$

Por ejemplo, si tenemos los valores siguientes:  $HR = 50\%$  y  $T_s = 30\text{ °C}$ , la tensión de vapor saturante:

$$e^*_s(T_s) = 0,6107 \left[ 1 + \sqrt{2} \sin\left(\frac{30}{3}\right) \right]^{8,827} = 4,24\text{ kPa}$$

También se puede calcular  $e^*_s(T)$ , en kPa, a partir de la relación siguiente:

$$e^*_s(T) = 0,6107 \exp(17,27 T / (T + 237,3))$$

con  $T$  en  $^{\circ}\text{C}$ . Por ejemplo, para  $T = 30\text{ °C}$ ,  $e^*_s(30) = 4,24\text{ kPa}$

Conociendo  $HR$  y  $e^*_s(T)$  se puede determinar la tensión de vapor actual a partir de la relación:

$$HR = \frac{e_a}{e^*_s(T_s)}$$

$$e_a = (30)(4,24) / 100 = 1,27\text{ kPa}$$

### B- Temperatura de punto de rocío

La temperatura de punto de rocío se puede deducir por inversión de la fórmula de Alt considerando que la tensión de vapor actual es igual a la tensión de vapor saturante a la temperatura de punto de rocío (Apartado 5.1.B):

$$e_a = e^*_s(T_r)$$

sustituyendo esta igualdad en la fórmula de Alt, tenemos:

---

<sup>1</sup> En las hojas de cálculo Excel, utilizar el radian como unidad:  $e^*_s(T) = 0,6107 \left[ 1 + \sqrt{2} \sin\left(\frac{3,1416 T}{(3)(180)}\right) \right]^{8,827}$

$$e_a = 0,6107 \left[ 1 + \sqrt{2} \sin \left( \frac{T_r}{3} \right) \right]^{8,827}$$

Ecuación a partir de la cual se obtiene, por inversión,  $T_r$  (°C)

$$T_r = 3 \arcsin \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \left( \frac{e_a}{0,6107} \right)^{1/8,827} - 1 \right] \right\}$$

Si tenemos, por ejemplo,  $e_a = 1,3$  kPa,  $T_r$ <sup>2</sup> corresponde a:

$$T_r = 3 \arcsin \left\{ 0,7071 \left[ \left( \frac{1,3}{0,6107} \right)^{0,11328} - 1 \right] \right\} = 10,87 \text{ °C}$$

También se puede calcular  $T_r$ , en °C, por la fórmula de Bosen:

$$T_r = \frac{116,91 + 237,3 \ln(e_a)}{16,78 - \ln(e_a)}$$

con  $e_a$  en kPa. Para  $e_a = 1,3$  kPa, se obtiene  $T_r = 10,85$  °C

### C- Ecuación psicrométrica

La ecuación del psicrómetro se aplica para calcular la tensión de vapor actual a partir de los datos de temperatura húmeda y seca que da el psicrómetro (ver Unidad 2):

$$e_a = e^*(T_h) - \gamma (T_s - T_h)$$

donde:

-  $e^*(T_h)$  = tensión de vapor saturante a la temperatura húmeda:

$$e^*_s(T_h) = 0,6107 \left[ 1 + \sqrt{2} \sin \left( \frac{T_h}{3} \right) \right]^{8,827}$$

-  $\gamma$  = constante psicrométrica (kPa K<sup>-1</sup>), definida por la relación:

$$\gamma = \frac{P C_p}{0,622 \lambda}$$

donde, P= presión atmosférica (kPa),  $C_p$  = calor específico del aire (J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)  $\lambda$  = calor latente de vaporización (J kg<sup>-1</sup>).

El valor de  $\gamma$  a una temperatura de 20 °C y a nivel del mar es:

$$\gamma = \frac{(101,3)(1003,2)}{(0,622)(2,5)(10^6)} \approx 0,066 \text{ kPa K}^{-1}$$

Para calcular  $e_a$  con la ecuación psicrométrica, se parte de los datos de temperatura seca y húmeda. Por ejemplo, para  $T_s = 30$  °C y  $T_h = 20$  °C, se deduce primero la tensión de vapor saturante a la temperatura húmeda:

$$e^*_s(T_h) = 0,6107 \left[ 1 + \sqrt{2} \sin \left( \frac{20}{3} \right) \right]^{8,827} = 2,36 \text{ kPa}$$

siendo la tensión de vapor actual:

<sup>2</sup> En las hojas de cálculo Excel, el resultado se da en radianes:

$$T_r = 3 \arcsin \left\{ 0,7071 \left[ \left( \frac{1,3}{0,6107} \right)^{0,11328} - 1 \right] \right\} = 0,190 \text{ rad, luego } T_r = (0,190)(180/3,1416) = 10,87 \text{ °C}$$

$$e_a = 2,36 - 0,066(30 - 20) = 1,7 \text{ kPa}$$

Para calcular la humedad relativa, se calcula la tensión de vapor saturante a la temperatura seca:

$$e^*_s(T_s) = 0,6107 \left[ 1 + \sqrt{2} \sin\left(\frac{30}{3}\right) \right]^{8,827} = 4,24 \text{ kPa}$$

siendo la humedad relativa del aire:

$$\text{HR} = \frac{e_a}{e^*_s(T_s)} 100 = \frac{1,7}{4,24} 100 = 40 \%$$

#### D- Densidad del aire

La densidad del aire ( $\rho$ ,  $\text{kg m}^{-3}$ ) se calcula como sigue:

$$\rho = \frac{(1 + q_a / 1000)}{(1/P)(R)(T_a + 273)(1 + 1,6078q_a / 1000)}$$

donde:

$\rho$  = densidad aire húmedo ( $\text{kg m}^{-3}$ ),

P= presión atmosférica (101325 Pa a nivel del mar)

R (= 287,055) cte. gases perfectos expresada, *en este caso*, en  $\text{Pa m}^3 \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

$q_a$  = humedad absoluta en  $\text{g kg}^{-1}$ ,

$T_a$  = temperatura seca en  $^{\circ}\text{C}$ .

#### D- Temperatura húmeda

Se puede obtener una estimación correcta de la temperatura de bulbo húmedo,  $T_h$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), a partir de:

$$T_h = T_a - \left[ 0,2726T_a + q_a \left( -1,569 + 0,04316T_a - 0,000342T_a^2 \right) + 0,003606T_a^2 - 0,00006374T_a^3 + 5,864 \right]$$

donde  $T_a$  en  $^{\circ}\text{C}$  y  $q_a$  en  $\text{g kg}^{-1}$

#### E- Pendiente de la curva de saturación

El valor de la pendiente de la curva de saturación,  $\Delta$  en  $\text{kPa K}^{-1}$ , se determina a partir de la relación:

$$\Delta = \frac{4098 e^*_s(T_s)}{(T_s + 273)^2}$$

con  $e^*_s(T_s)$  en kPa y  $T_s$  en  $^{\circ}\text{C}$

