

CAPÍTULO 7. UMIDADE DO AR

Rafael Coll Delgado

7.1. Introdução

A **umidade do ar** é o termo geral usado para descrever a presença de vapor d'água no ar. Esta presença de vapor d'água pode ser descrita quantitativamente de várias maneiras. Entre elas estão a pressão de vapor, a umidade absoluta, a razão de mistura e a umidade relativa do ar. Em termos gerais, o vapor d'água da atmosfera é resultante da evaporação das superfícies aquáticas e do solo, da transpiração das plantas e das combustões. Cabe ressaltar que a água é a única substância que ocorre nas três fases da matéria (líquida, sólida e gasosa) na atmosfera.

Na atmosfera o teor de vapor d'água varia de 0 a 4% do volume de ar. Isso significa que em dada massa de ar, o máximo de vapor d'água que ela pode reter é 4% de seu volume, conforme os seguintes casos:

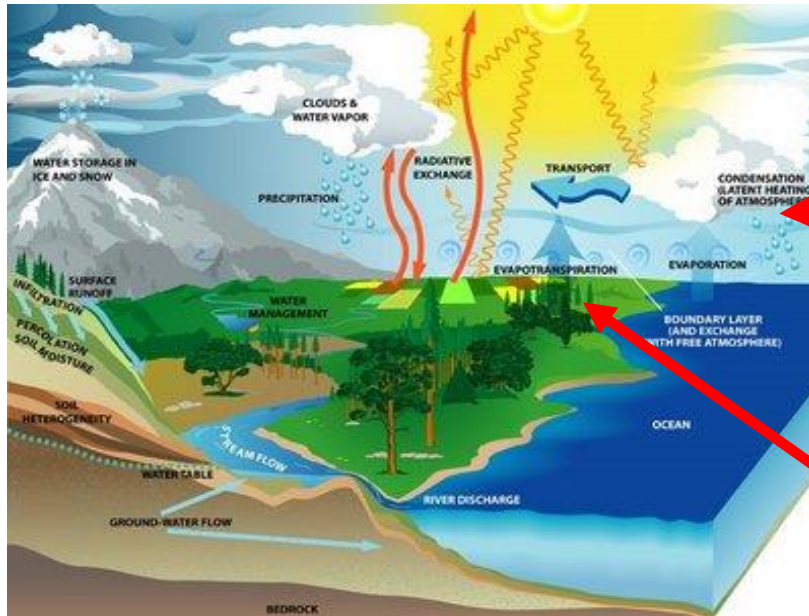
- I. Caso a umidade corresponda ao máximo (4% do volume de ar), definimos o ar como SATURADO;
- II. Caso a umidade corresponda a 0% do volume de ar, o definimos como ar SECO;
- III. Caso a umidade corresponda a um valor entre 0% e 4% do volume de ar, o ar é dito ÚMIDO.

Quando o ar está saturado, a taxa de transferência de moléculas de H₂O de uma superfície líquida para o ar se iguala à taxa de assimilação de moléculas de vapor H₂O do ar para a superfície líquida. Ou seja, o ar está na sua capacidade máxima de reter umidade.

Conseqüentemente, a água na atmosfera e suas mudanças de fase desempenham função importantíssima em diversos processos físicos naturais (Figura 7.1), como por exemplo:

- Transporte e distribuição de calor (ciclo hidrológico) na atmosfera;
- Absorção de comprimentos de onda das radiações solar e terrestre;

- Formação de nuvens e fenômenos hidrometeoros (chuva, geada, neve, granizo, entre outros);
- Evaporação/Evapotranspiração;
- Condensação/Orvalho.



Liberação de energia na atmosfera devido à condensação.

Consumo de energia na superfície para evaporação.

Figura 7.1. Ciclo hidrológico. **Fonte:** Sentelhas & Angelocci (2009).

Assim, a quantificação da umidade atmosférica é de grande importância para:

- Estudos de conforto térmico animal e humano;
- Dimensionamento de sistemas de condicionamento térmico para animais e plantas;
- Estimativa do tempo e da energia requerida para secagem de produtos agrícolas;
- Controle da umidade do ar dentro de uma unidade de armazenamento de frutas, hortaliças, ovos, cereais, entre outros;
- Estudos de doenças e pragas.

Desta maneira, os efeitos de valores extremos de umidade relativa, quando combinados com outras variáveis meteorológicas como baixas temperaturas do ar, chuvas fortes e ventos intensos, compõem um quadro desconfortável, principalmente para o ser humano. No caso dos incêndios florestais, dependendo das condições

climáticas, a umidade do ar se destaca na avaliação do comportamento do fogo, sobretudo por causa do dinamismo e da velocidade de suas variações, compondo quadros distintos a cada período de tempo, o que dificulta a sua análise (DELGADO, 2007).

Nas áreas agrícolas, de floresta ou na produção animal, a presença de vapor d'água na atmosfera é igualmente importante como condicionante de ocorrência de pragas e doenças em vegetais e animais, e sendo também determinante para a qualidade, armazenamento e conservação dos produtos agrícolas. Além disso, o vapor d'água atua na prevenção de riscos de incêndios em florestas.

Portanto, a umidade do ar é um dos principais elementos atmosféricos, com significativa influência sobre a biosfera e os ecossistemas naturais e agrícolas. A circulação do vapor d'água e sua condensação contribuem para estabilização da temperatura, equilibrando os níveis de umidade e energia calorífica entre as diferentes partes do Planeta.

Contudo, a quantificação da umidade do ar não é feita a partir de uma amostragem, diferentemente do procedimento muito utilizado para a quantificação da umidade do solo, de produtos agrícolas e de outros materiais higroscópicos. Esse método, embora possa ser utilizada, exigiria equipamentos especiais, de alto custo, que em alguns casos inviabilizariam a sua determinação. Na prática, a umidade do ar é determinada indiretamente por meio da pressão parcial exercida pelo vapor d'água na atmosfera, como veremos a seguir.

7.2. Pressão de Vapor D'Água

Todas as moléculas de uma parcela de ar contribuem para a pressão total exercida sobre essa parcela de ar. Pela lei de Dalton das pressões parciais, cada molécula dos gases que constituem a atmosfera (por exemplo: N₂, O₂ e H₂O) exerce uma pressão parcial ($P_{atm} = P_{N_2} + P_{O_2} + \dots + P_{CO_2} + P_{H_2O}$), que somadas resultam na pressão atmosférica (P_{atm}) (Figura 7.2). Em estudos da umidade do ar, a pressão atmosférica pode ser representada pelo somatório da pressão do ar seco ($P_{ArSeco} = P_{N_2} + P_{O_2} + \dots + P_{CO_2}$) + pressão do vapor d'água (P_{H_2O}) e assim, $P_{atm} = P_{ArSeco} + P_{H_2O}$. Em Meteorologia e Climatologia, usualmente a pressão do vapor d'água na atmosfera é representado pela letra *e*.

Desta forma, a pressão de vapor d'água é de grande importância para muitos fenômenos ligados à Meteorologia e Climatologia, pois, em conjunto com outros elementos como, por exemplo, temperatura do ar e vento, determina a taxa de evaporação da água líquida.

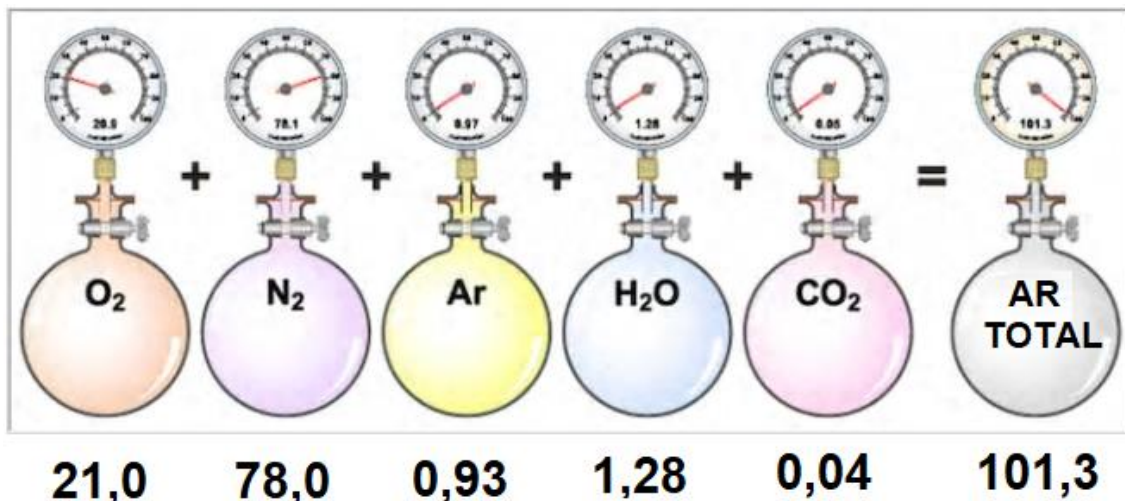


Figura 7.2. Representação das pressões parciais dos gases atmosféricos na definição da pressão atmosférica. **Fonte:** Adaptado de www.shutterstock.com/search/gas+law.

7.2.1. Pressão Máxima (Saturação) do Vapor D'água (e_s)

A teoria cinética dos gases indica que a evaporação ocorre quando as moléculas de um líquido superam a força de atração entre si e escapam de uma lâmina d'água, e assim passam à forma de vapor no espaço acima dessa lâmina. Neste processo, algumas moléculas atingem novamente a lâmina d'água e são recapturadas. No decorrer do tempo, será atingido um estado de equilíbrio dinâmico, onde o número de moléculas que escapam é igual ao número de moléculas recapturadas pela lâmina d'água. Neste instante, o ar está saturado de vapor d'água. Para cada temperatura, este equilíbrio ocorre a uma determinada pressão de vapor, denominada pressão de saturação do vapor d'água do ar ou pressão máxima de vapor (e_s) (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Existem na literatura várias expressões numéricas para o cálculo da pressão de saturação de vapor. Dentre elas, a equação de *Tetens* mostra ótimos resultados, pois apresenta simplicidade no cálculo e pode ser utilizada para as aplicações agrometeorológicas. Com esta equação, utilizando-se a temperatura do ar (t_s) em °C, obtêm-se a pressão máxima de vapor d'água, em kPa, da seguinte forma:

$$e_s = 0,61078 \times 10^{\left[\frac{(7,5t_s)}{(237,3+t_s)} \right]} \quad (7.1)$$

em que,

e_s = pressão de saturação do vapor d'água bulbo seco (e_s) (kPa);

t_s = temperatura do ar ou do bulbo seco (°C);

Segundo Varejão-Silva (2006) a equação de Tetens é válida para um intervalo de temperatura entre -50 e 100 °C. Na equação de *Tetens* fica evidente a relação direta entre a temperatura do ar (aumenta ou diminui) e a pressão de saturação do vapor d'água de forma exponencial (aumenta ou diminui) (Figura 7.3). Por isso, existe uma quantidade máxima de vapor d'água que um ambiente pode conter, onde esse valor máximo ocorre quando a evaporação e a condensação se equivalem.

A saturação de uma amostra de ar úmido pode ser alcançada por um dos processos abaixo:

i) Aumento da umidade da amostra de ar, a temperatura constante, até que a pressão real do vapor d'água do ar (e) se iguale a pressão de saturação (e_s);

ii) Outra maneira de saturar o ambiente é reduzir a temperatura, diminuindo a capacidade do ar atmosférico conter vapor d'água, ou seja, diminuindo e_s .

iii) Combinando, simultaneamente os dois procedimentos ao mesmo tempo.

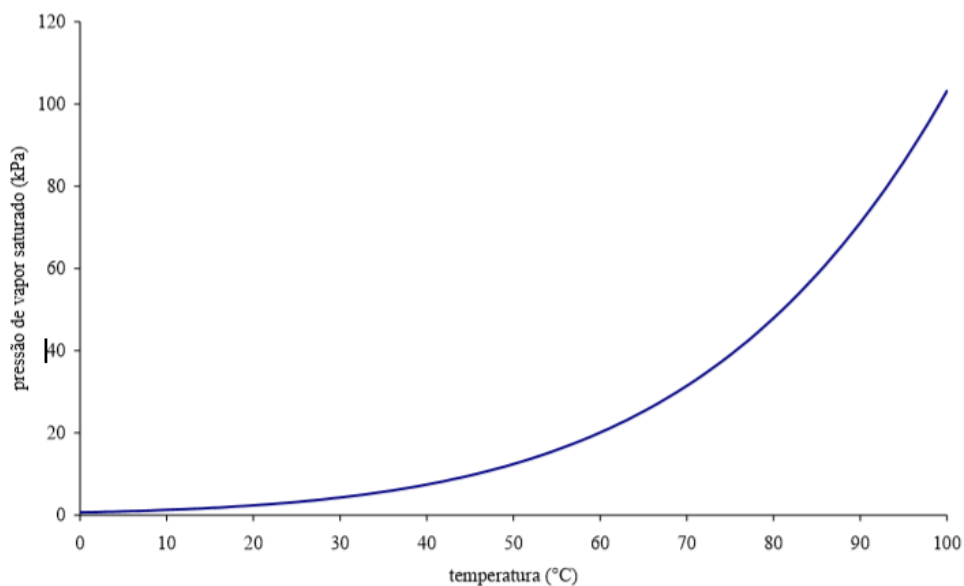


Figura 7.3. Representação gráfica da pressão de saturação do vapor d'água em função da temperatura do ar. **Fonte:** <http://www.leb.esalq.usp.br/leb/aulas/lce200/Cap6.pdf>

7.2.2. Pressão Real de Vapor D'água (e)

Em condições meteorológicas estáveis, o teor de água na atmosfera e, portanto, a pressão de vapor permanece aproximadamente constante ao longo do dia.

A pressão exercida pelo vapor d'água, como outros constituintes da atmosfera, ocorre em todas as direções e depende da concentração de vapor. Assim, a pressão real ou parcial do vapor d'água pode ser estimada pela equação psicrométrica, dada em kPa:

$$e = e_{su} - A \times P_{ATM} \times (t_s - t_u) \quad (7.2)$$

em que:

A = é a constante do psicrômetro: $6,7 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para psicrômetros aspirados; $7,9 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para os de ventilação natural;

e_{su} = pressão de saturação do vapor d'água a temperatura do bulbo úmido (e_{su}) (kPa);

$$e_{su} = 0,61078 \times 10^{\left[\frac{(7,5 \times t_u)}{(237,3 + t_u)} \right]} \quad (7.3)$$

P_{ATM} = é a pressão atmosférica do local (kPa);

t_s e t_u = temperaturas dos termômetros de bulbo seco e úmido, respectivamente ($^\circ\text{C}$).

Quando a pressão real do vapor d'água na atmosfera é igual a zero ($e = 0 \text{ kPa}$) o ar está **seco**, e quando a pressão real é igual a pressão de saturação ($e_s = e$) o ar está **saturado**. Qualquer outra condição, em que $0 > e > e_s$, o ar estará **úmido**.

Depressão Termométrica (Dt)

A temperatura do bulbo seco será sempre maior ou igual a do termômetro de bulbo úmido. Quanto menor o seu valor mais próximo da saturação está o ambiente. Assim, a depressão termométrica pode ser representada pela seguinte equação:

$$D_t = t_s - t_u \quad (^\circ\text{C}) \quad (7.4)$$

Déficit de Pressão de Saturação (DS)

É a quantidade de vapor de água necessária para chegar ao ponto de saturação. Quando o déficit é igual a zero ($e_s = e$), o ar está saturado e quanto maior o déficit menor a umidade atmosférica. O déficit pode se obtido pela seguinte equação:

$$DS = e_s - e \quad (\text{kPa}) \quad (7.5)$$

7.3. Psicrometria

O estudo da psicrometria (do grego *psicro*, **frio** e *metria*, medida) refere-se à quantificação do vapor d'água em determinado ambiente. Esse ambiente, que é o objeto de estudo nesta disciplina, é o ar atmosférico.

Pela lei de *Dalton* para gases ideais, se o conjunto de gases se comporta como um gás ideal, isto é, aquele em que não há interação entre os componentes, nem reações químicas e nem choques entre esses componentes, o caminho para o componente se deslocar será infinito. Conseqüentemente, a pressão total do sistema de gases e vapores será a soma da pressão parcial dos gases individualmente.

Admitindo-se que a atmosfera funcione como um gás ideal, a pressão atmosférica será a soma da pressão parcial de seus constituintes. Portanto, a quantificação do vapor d'água atmosférico pode ser feita basicamente por três métodos de estimativa:

- **Analítico** (cálculo, preciso, não visual);
- **Tabular** (na prática somente se utiliza para umidade relativa do ar);
- **Gráfico** (diagrama, aproximado, rápido, visual).

Para estimativa da pressão de vapor d'água, se faz uso e é necessário saber como funciona o equipamento básico da psicrometria (Figura 7.4).

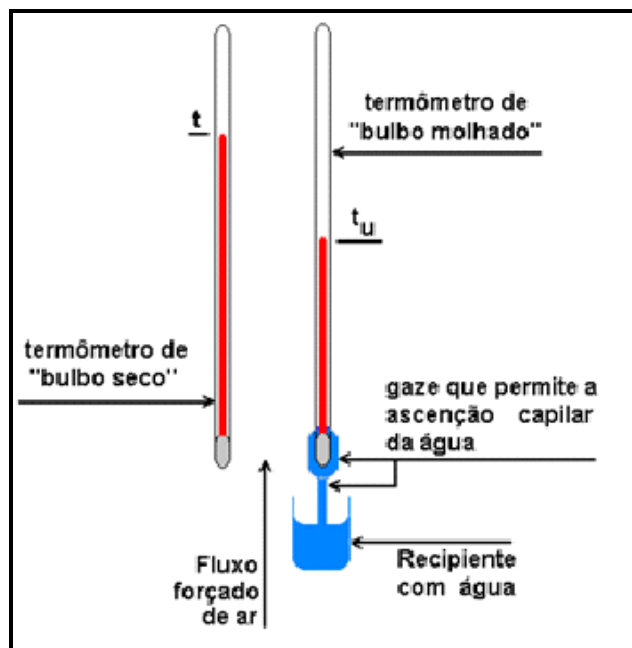


Figura 7.4. Exemplo de um esquema de Psicômetro. Fonte: Adaptado de <https://pt.scribd.com/document/100280344/Psicrometria-conceitos>.

7.3.1. Razão de mistura (r) e umidade específica (q)

A densidade de vapor d'água é a massa de vapor contida numa unidade de volume de ar (Equação 7.6). A temperatura “T” na equação 7.6 é referente ao bulbo seco t_s (temperatura do ar).

$$\rho_{\text{vapor d'água}} = 2168 \times \frac{e}{T} \quad (\text{g/m}^3) \quad (7.6)$$

A densidade do ar seco é a massa de ar seco contido numa unidade de volume de ar. De modo análogo ao ar seco a equação a ser usada é:

$$\rho_{\text{ar seco}} = 3484 \times \left(\frac{P_{\text{ATM}} - e}{T} \right) \quad (\text{g/m}^3) \quad (7.7)$$

A densidade do ar é a massa de VAPOR D'ÁGUA + AR SECO contido numa unidade de volume de ar, conforme a seguinte equação:

$$\rho_{\text{ar}} = \rho_{\text{vapor d'água}} + \rho_{\text{ar seco}} \quad (\text{g/m}^3) \quad (7.8)$$

A umidade específica (**q**) e a razão de mistura (**r**) são variáveis relacionadas à massa de vapor d'água por unidade de massa de ar ou massa de ar seco.

Define-se umidade específica como sendo a massa de vapor d'água contida em uma unidade de massa de ar úmido (ar seco + vapor d'água), descrita como segue.

$$q = 0,622 \times \frac{e}{[P_{\text{ATM}} - (0,378 \times e)]} \quad (\text{g}_{\text{vapor}}/\text{g}_{\text{ar}}) \quad (7.9)$$

Já razão de mistura é a massa de vapor d'água misturada em uma unidade de massa de ar seco (Equação 7.10).

$$r = 0,622 \times \frac{e}{(P_{\text{ATM}} - e)} \quad (\text{g}_{\text{vapor}}/\text{g}_{\text{ar seco}}) \quad (7.10)$$

7.3.2. Umidade Relativa do Ar (UR %)

A umidade relativa do ar é a relação entre a quantidade de água presente e aquela que prevaleceria em condições saturadas, à mesma temperatura do ar.

Em condições meteorológicas estáveis, o teor de água na atmosfera, e, portanto, a pressão de vapor, permanece aproximadamente constante ao longo do dia. Ao mesmo tempo, a temperatura do ar apresenta um ciclo diário, com um máximo no início da tarde e um mínimo na madrugada.

Assim, a pressão de saturação do vapor d'água do ar, função da temperatura do ar, apresenta um máximo e mínimo nos mesmos horários que a temperatura. A umidade relativa do ar, razão entre pressão de vapor atual e saturado, conseqüentemente tem seu mínimo quando a temperatura é máxima, e vice-versa.

A quantificação da umidade relativa do ar pode ser obtida por três formas:

- Aparelhos: Determinada diretamente (higrógrafo ou higrômetro) ou indiretamente (Psicrômetros ventilação natural e forçada);
- Tabular: Através da tabela psicrométrica, usando t_s ou t_u ou Dt ;
- Através de fórmula:

$$UR = \left(\frac{e}{e_s} \right) \times 100 \quad (\%) \quad (7.11)$$

7.3.3. Umidade Absoluta (UA)

Massa de vapor d'água contida na unidade de volume do ar expressa em massa (g) por volume (m^3). Obtida através da seguinte equação:

$$UA = 2168 \times \frac{e}{T} \quad (g/m^3) \quad (7.12)$$

7.3.4. Temperatura do Ponto de Orvalho (t_{po})

A temperatura do ponto de orvalho é a temperatura na qual a saturação ocorreria se o ar fosse resfriado adiabaticamente (sem troca de calor ou massa) e à pressão constante e sem adição ou remoção de vapor d'água. Ela é calculada conforme abaixo.

$$t_{po} = \left(\frac{237,3 \log (e / 0,61078)}{7,5 - \log (e / 0,61078)} \right) (^{\circ}\text{C}) \quad (7.13)$$

A outra forma de obtenção da t_{po} é calculando “e” com a equação 7.2, mencionada anteriormente. Em seguida entra-se com o valor encontrado de “e” dentro da tabela de pressão máxima de vapor (e_s), procurando o mesmo valor ou próximo a ele, obtendo conseqüentemente a temperatura que corresponde aquele valor de “e”. Assim, esse valor encontrado é a t_{po} .

7.4. Variação Temporal e Espacial da Umidade do Ar – Escala Diária e Mensal

Na escala diária praticamente não há variação da pressão atual de vapor (e) ao longo do dia, ao passo que a pressão de saturação (e_s) varia exponencialmente com a temperatura do ar. Isso faz com que a UR varie continuamente ao longo do dia, chegando ao valor mínimo no horário da temperatura do ar máxima e um valor máximo a partir do momento em que a temperatura do ponto de orvalho (t_{po}) é atingida (Figura 7.5).

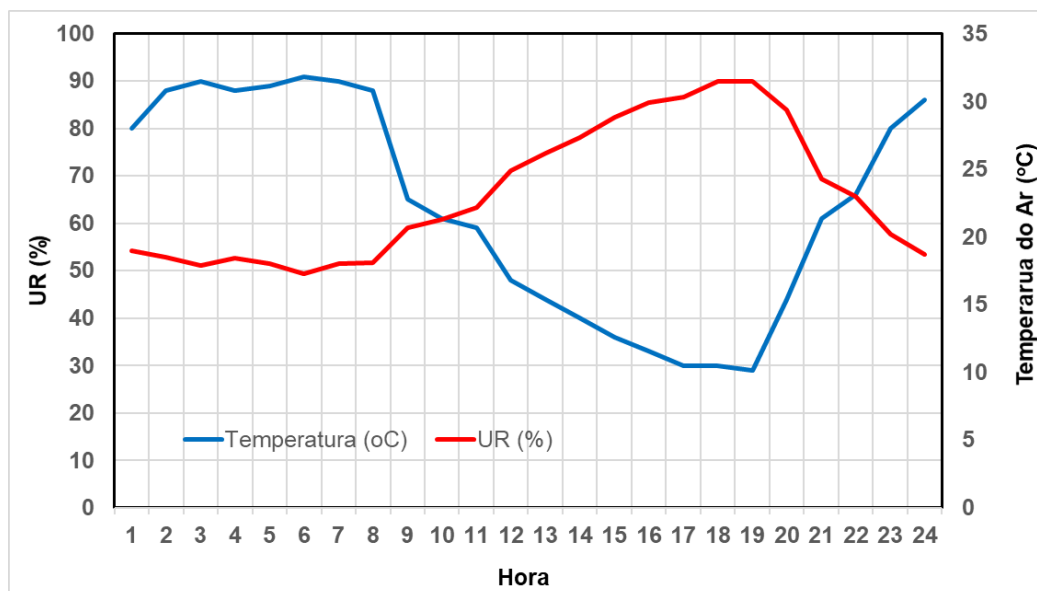


Figura 7.5. Variação diária da umidade relativa do ar comparada a da temperatura do ar na cidade de Seropédica/RJ. Fonte: Dados obtidos do INMET.

Desse modo, a UR tem uma variação inversa à da temperatura do ar (t), como se pode observar na figura acima.

A variabilidade temporal mensal da umidade relativa do ar pode ser observada na Figura 7.6, onde claramente se identifica o período úmido e seco de um determinado lugar.

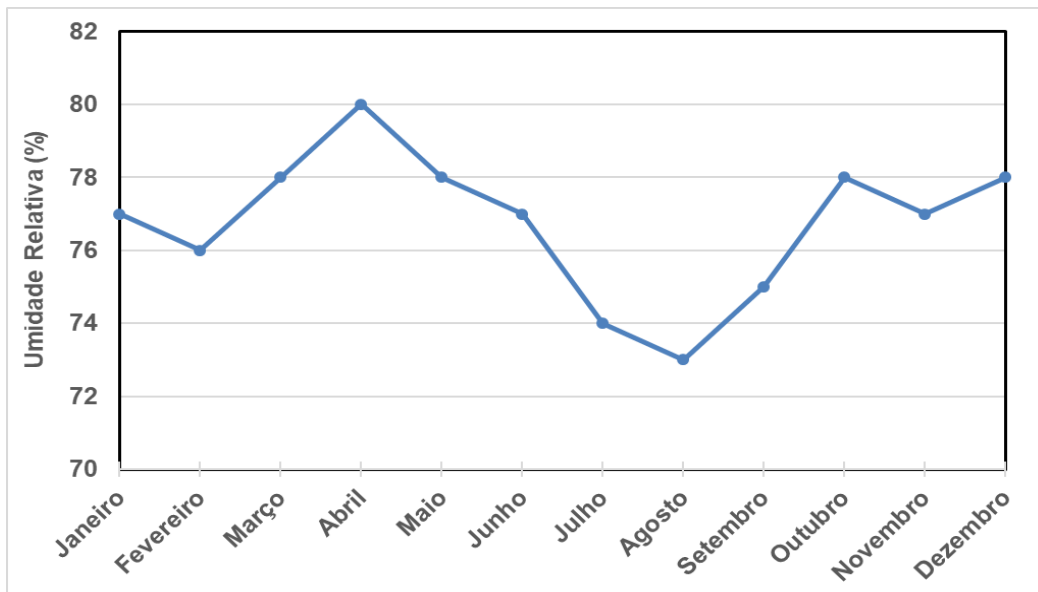


Figura 7.6. Variabilidade temporal mensal climatológica da umidade relativa do ar na cidade de Seropédica/RJ. **Fonte:** Dados obtidos do INMET.

Na escala anual e diária (Figura 7.7) a UR média acompanha basicamente o regime de chuvas, pois havendo água na superfície haverá vapor d'água no ar.

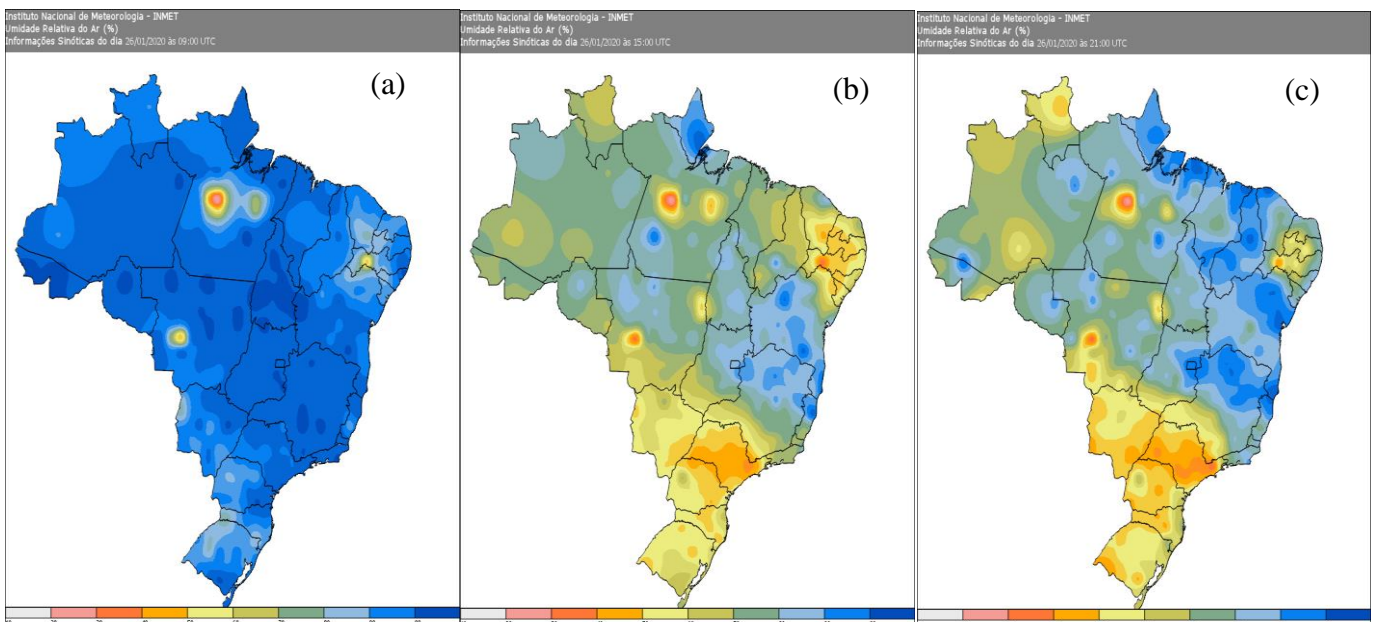


Figura 7.7. Variabilidade temporal diária da umidade relativa do ar no Brasil as 12 TMG (09:00 HL), (b) 18 TMG (15:00 HL) e (C) 00:00 TMG (21:00 HL). **Fonte:** <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/webService>.

7.5. Higrometria

A umidade relativa (UR) do ar pode ser medida ou estimada. Para se ter um valor apreciável, esta observação deve ser medida por meio de instrumentos especiais. Segundo Sentelhas & Angelocci (2009) para a determinação da umidade relativa do ar utilizam-se de equipamentos que têm alguma propriedade associada ao teor de vapor d'água (H₂O) contido na atmosfera. Os autores comentam que alguns instrumentos são extremamente simples, não necessitando mais que um par de termômetros, onde neste caso se teria a função de determinar a umidade relativa do ar.

Em estudos de Meteorologia a umidade relativa do ar é observada tanto em superfície (estações meteorológicas convencionais e automáticas) quanto em altitude (radiossonda). Os principais instrumentos utilizados estão descritos abaixo.

7.5.1. Medidores

Higrômetro

Finalidade: Medir a umidade relativa do ar no momento da observação.

Constituição:

a. Órgão Sensível: O órgão sensível do higrômetro se constitui por fios de cabelo humano de preferência claro e poucos oleosos.

b. Funcionamento: O cabelo quando livre de gordura sofre variação no seu comprimento de acordo com as variações da umidade do ar. É amplificada e indicada sobre uma escala graduada em (%) (Figura 7.8). Este instrumento baseia-se na variação do comprimento que o cabelo humano sofre com a variação da umidade do ar. Em geral, uma das extremidades do feixe é fixa e a outra acoplada a um sistema de alavancas. A variação do comprimento do feixe de cabelos faz movimentar esse sistema, que termina por deslocar um ponteiro sobre uma escala graduada (%).

Leitura: A leitura é feita diretamente em todas as observações.

Instalação: O higrômetro é instalado no abrigo meteorológico ou termométrico.



Figura 7.8. Higrômetro Bimetálico. Fonte: <http://www.lojatudo.com.br/medicao-meteorologia/higrometros/higrometro-bimetalico-com-fundo-azul-incoterm-7658-18-0-00.html>.

Psicrômetro

Finalidade: Determinar a umidade relativa do ar, baseada em medidas dos termômetros de bulbo molhado e seco.

Constituição: O psicrômetro é constituído por dois termômetros (bulbo seco e molhado ou úmido), sendo mais utilizado que o higrômetro. Isso ocorrer por ser mais prático, menor custo e suas observações serem mais precisas.

Segundo Varejão-Silva (2006) os modelos de psicrômetros são constituídos basicamente por dois termômetros comuns de mercúrio, sendo um com o bulbo descoberto e o outro com o bulbo revestido por um tecido fino (musselina ou gaze), que é molhado (preferencialmente com água destilada) imediatamente antes do uso do instrumento. Esses termômetros são chamados de termômetros de bulbo seco e úmido.

Os psicrômetros podem ser de dois tipos:

Ventilação Natural: Possui um reservatório com água no qual é colocada a musselina que envolve o bulbo. O reservatório deverá estar sempre cheio com água destilada e para o aparelho entrar em equilíbrio com o ar que o circunda, devemos esperar por algumas horas (Figura 7.9).



Figura 7.9. Psicrômetro de ventilação natural. Fonte: <http://www.ufjf.br/labcaa/equipamentos/>

Ventilação Forçada: Este não possui o reservatório com água permanente. O bulbo deve ser umedecido no momento da observação. Para que entre logo em equilíbrio com o ar que o circunda existe uma ventoinha que é acionada no momento da leitura. Essa ventoinha vai funcionar como um sugador de ar, e faz com que todo ar que rodeia o aparelho passe pelo bulbo e por isso pode-se logo entrar em equilíbrio após fazer a leitura.

Existem modelos mecânicos mais aperfeiçoados, onde uma ventoinha aspira o ar sobre os bulbos a uma velocidade constante, que não deve ser inferior a 5 m/s. Dentre os psicrômetros ventilados mais usados estão o do tipo *Assmann*, que é portátil (Figura 7.10), e o *August*.



Figura 7.10. Psicrômetro de funda (esquerda), cuja ventilação é obtida fazendo-se girar o suporte dos termômetros, e, psicrômetro Assmann (direita), com aspirador mecânico embutido na parte superior. **Fonte:** www.leb.esalq.usp.br/leb/aulas/leb495/Aula_4.pdf.

Para leitura do psicrômetro de ventilação forçada, os procedimentos abaixo devem ser seguidos na ordem:

- a. Umedecer o termômetro do bulbo úmido;
- b. Acionar a ventoinha;
- c. Aguardar 2 a 3 minutos para a estabilização;
- d. Ler o termômetro de bulbo úmido e o termômetro de bulbo seco.

Leitura: A leitura dos psicrômetros é feita diariamente em todas as observações (12h, 18h e 24 h GMT).

Feita as leituras dos termômetros pode-se aplicar três métodos de estimativa para quantificarmos o vapor d'água, como segue.

1. Método Tabular (Tabela 1): Entra-se com os valores da depressão termométrica (Δt) e temperatura do bulbo seco (t_s) e tem-se a umidade relativa do ar em %. Este método é utilizado somente para determinar a Umidade Relativa do ar;
2. Gráfico Psicrométrico: Este método é muito utilizado por ser prático e rápido “visual” (Figura 7.11). O Gráfico Psicrométrico pode ser utilizado para substituir as equações da umidade do ar;

3. Método Analítico: Método que usa as equações da umidade do ar. Ele é um método de cálculo preciso e não visual.

Tabela 1. Método Tabular para determinar a Umidade Relativa do ar.

| $t_s \backslash \Delta t$ | .5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10 |
|---------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 3 | 92 | 84 | 76 | 69 | 62 | 54 | 47 | 40 | 32 | 25 | 12 | * | * | * | * |
| 4 | 93 | 85 | 77 | 70 | 63 | 56 | 49 | 43 | 35 | 29 | 16 | * | * | * | * |
| 5 | 93 | 86 | 78 | 72 | 65 | 58 | 51 | 45 | 38 | 32 | 30 | * | * | * | * |
| 6 | 94 | 87 | 80 | 73 | 66 | 60 | 54 | 47 | 41 | 35 | 23 | 11 | * | * | * |
| 7 | 94 | 87 | 81 | 74 | 67 | 62 | 54 | 49 | 43 | 38 | 26 | 15 | * | * | * |
| 8 | 94 | 88 | 82 | 75 | 69 | 64 | 56 | 51 | 46 | 40 | 29 | 19 | * | * | * |
| 9 | 94 | 88 | 82 | 76 | 70 | 65 | 59 | 53 | 48 | 42 | 32 | 22 | 12 | * | * |
| 10 | 94 | 89 | 83 | 77 | 71 | 66 | 61 | 56 | 51 | 45 | 35 | 26 | 17 | * | * |
| 11 | 94 | 89 | 83 | 78 | 72 | 67 | 66 | 57 | 52 | 47 | 37 | 28 | 19 | * | * |
| 12 | 94 | 89 | 84 | 78 | 73 | 68 | 63 | 58 | 53 | 48 | 38 | 30 | 21 | * | * |
| 13 | 95 | 89 | 84 | 79 | 74 | 69 | 64 | 60 | 55 | 50 | 40 | 32 | 24 | 15 | * |
| 14 | 95 | 90 | 85 | 79 | 75 | 70 | 65 | 61 | 57 | 52 | 48 | 34 | 26 | 18 | * |
| 15 | 95 | 90 | 85 | 80 | 76 | 71 | 66 | 62 | 58 | 53 | 44 | 36 | 28 | 20 | 13 |
| 16 | 95 | 90 | 85 | 80 | 77 | 72 | 67 | 63 | 59 | 55 | 46 | 38 | 31 | 23 | 16 |
| 17 | 95 | 90 | 86 | 81 | 77 | 72 | 68 | 64 | 60 | 56 | 48 | 40 | 36 | 25 | 18 |
| 18 | 95 | 90 | 86 | 82 | 78 | 73 | 69 | 65 | 61 | 57 | 49 | 42 | 35 | 27 | 20 |
| 19 | 95 | 91 | 87 | 82 | 78 | 74 | 70 | 66 | 62 | 58 | 51 | 54 | 37 | 29 | 22 |
| 20 | 96 | 91 | 87 | 83 | 79 | 74 | 71 | 66 | 63 | 59 | 58 | 45 | 38 | 31 | 24 |
| 21 | 96 | 91 | 87 | 83 | 79 | 75 | 71 | 67 | 64 | 60 | 53 | 45 | 39 | 32 | 26 |
| 22 | 96 | 91 | 88 | 84 | 80 | 76 | 72 | 68 | 64 | 61 | 54 | 47 | 41 | 34 | 28 |
| 23 | 96 | 92 | 88 | 84 | 80 | 77 | 73 | 69 | 65 | 62 | 54 | 48 | 42 | 36 | 30 |
| 24 | 96 | 92 | 88 | 85 | 81 | 77 | 74 | 70 | 66 | 63 | 55 | 49 | 43 | 37 | 31 |
| 25 | 96 | 92 | 88 | 85 | 81 | 78 | 75 | 71 | 67 | 64 | 56 | 51 | 45 | 39 | 36 |
| 26 | 96 | 92 | 89 | 85 | 81 | 78 | 75 | 71 | 67 | 64 | 58 | 52 | 46 | 40 | 35 |
| 27 | 96 | 93 | 90 | 86 | 82 | 79 | 76 | 72 | 69 | 65 | 59 | 53 | 47 | 41 | 36 |
| 28 | 96 | 93 | 90 | 86 | 82 | 79 | 76 | 72 | 69 | 66 | 60 | 54 | 48 | 42 | 37 |
| 29 | 96 | 93 | 90 | 86 | 82 | 79 | 76 | 73 | 70 | 66 | 61 | 55 | 49 | 43 | 38 |
| 30 | 96 | 93 | 90 | 86 | 82 | 79 | 76 | 73 | 70 | 66 | 61 | 55 | 50 | 44 | 39 |
| 31 | 96 | 93 | 90 | 86 | 82 | 80 | 77 | 73 | 70 | 67 | 61 | 56 | 51 | 45 | 40 |
| 32 | 96 | 93 | 90 | 86 | 83 | 80 | 77 | 73 | 71 | 68 | 62 | 57 | 52 | 46 | 41 |
| 33 | 96 | 93 | 90 | 86 | 83 | 80 | 77 | 74 | 71 | 68 | 63 | 57 | 58 | 47 | 42 |
| 34 | 96 | 93 | 90 | 87 | 83 | 80 | 77 | 74 | 71 | 69 | 63 | 58 | 52 | 48 | 43 |
| 35 | 97 | 93 | 90 | 87 | 84 | 81 | 78 | 74 | 72 | 69 | 64 | 59 | 53 | 49 | 44 |
| 36 | 97 | 93 | 90 | 87 | 84 | 81 | 78 | 75 | 72 | 70 | 64 | 59 | 54 | 50 | 45 |
| 37 | 97 | 93 | 90 | 87 | 84 | 81 | 78 | 75 | 73 | 70 | 65 | 60 | 54 | 51 | 46 |
| 38 | 97 | 93 | 91 | 88 | 85 | 82 | 79 | 75 | 73 | 70 | 66 | 61 | 55 | 51 | 46 |
| 39 | 97 | 94 | 91 | 88 | 85 | 82 | 79 | 76 | 74 | 71 | 66 | 61 | 56 | 52 | 46 |
| 40 | 97 | 94 | 91 | 88 | 86 | 82 | 79 | 76 | 74 | 71 | 66 | 61 | 56 | 52 | 47 |
| 41 | 97 | 94 | 91 | 88 | 86 | 83 | 80 | 76 | 75 | 71 | 67 | 62 | 57 | 53 | 47 |
| 42 | 97 | 94 | 91 | 88 | 86 | 83 | 80 | 77 | 75 | 72 | 67 | 62 | 57 | 53 | 48 |
| 43 | 97 | 94 | 91 | 89 | 87 | 83 | 80 | 77 | 76 | 72 | 67 | 62 | 58 | 54 | 48 |
| 44 | 97 | 94 | 91 | 89 | 87 | 84 | 81 | 77 | 76 | 72 | 68 | 63 | 58 | 54 | 48 |
| 45 | 97 | 94 | 91 | 89 | 87 | 84 | 81 | 78 | 76 | 73 | 68 | 63 | 59 | 55 | 49 |

Fonte: Sentelhas & Angelocci (2009).

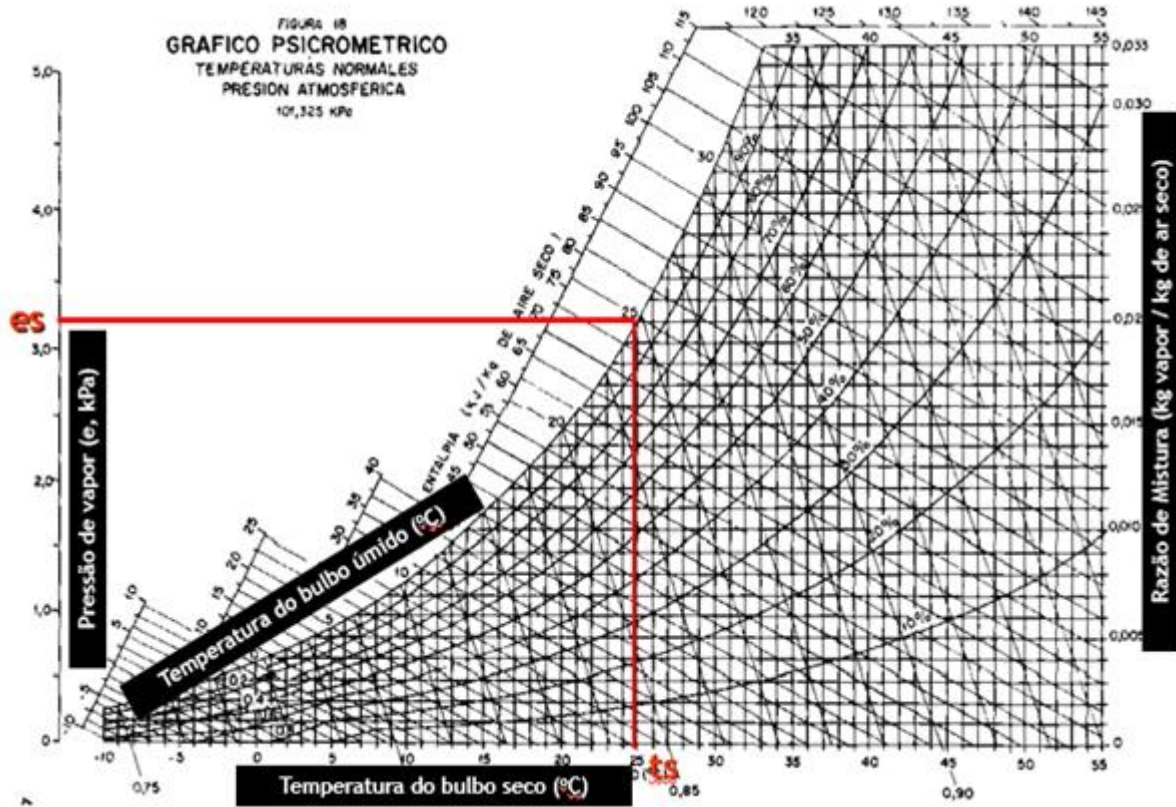


Figura 7.11. Gráfico Psicrométrico. Fonte: Sentelhas & Angelocci (2009).

Instalação: o psicrômetro é instalado no abrigo meteorológico ou termométrico.

7.5.2. Registradores

Higrógrafo

Aparelho mecânico que se baseia no princípio de modificação das dimensões (contração/expansão) de uma mecha de cabelo humano arranjado em forma de harpa, com a variação da umidade do ar (Figura 7.12).

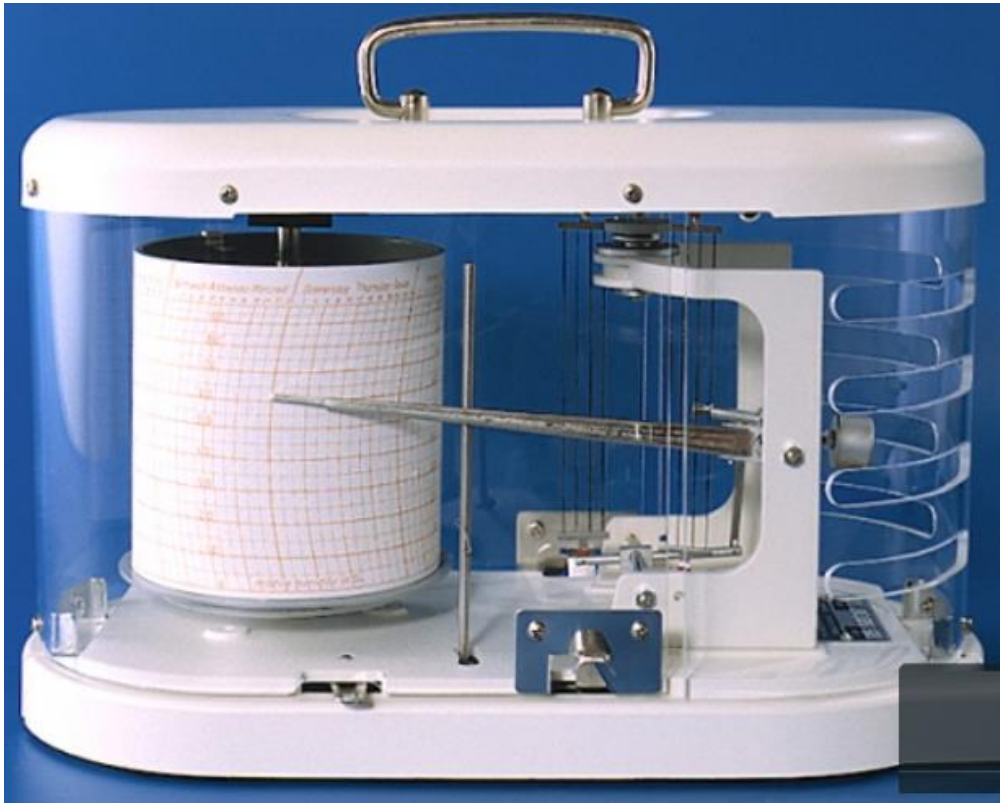


Figura 7.12. Higrógrafo. Fonte: <http://www.thinglink.com/scene/1054951793043177475>.

Finalidade: registrar a umidade relativa do ar, fornecendo a informação gráfica de todas as variações da umidade relativa do ar.

Órgão Sensível: o órgão sensível do higrógrafo se constitui por fios de cabelo humano de preferência claro e pouco oleoso. O cabelo quando livre de gordura sofre variação de comprimento de acordo com as variações da umidade do ar. Os fios de cabelo devem ser frequentemente lavados com uma escova macia molhada em água destilada a fim de retirar toda a poeira acumulada. Durante a limpeza não se deve, em hipótese alguma, tocar os fios de cabelo com os dedos.

Mecanismo de transmissão: vai transmitir até ao mecanismo de registro as variações da umidade do ar.

Mecanismo de registro: é composto de um tambor de relojoaria, de uma pena e de um diagrama. O diagrama do higrógrafo é chamado de higrograma.

O diagrama pode ser diário ou semanal em função da corda do tambor de relojoaria. Abaixo seguem os cuidados que se devem ser adotados com os diagramas:

Diagrama diário: trocar diariamente antes da 1ª observação (12h GMT);

Diagrama semanal: trocar às 2ª feiras, antes da 1ª observação (12h GMT).

Instalação: o higrógrafo é instalado no abrigo meteorológico ou termométrico.

A desvantagem deste instrumento é que ele precisa de calibração frequente, principalmente, pela perda de elasticidade dos fios de cabelo, e necessita também de limpeza de poeira que se fixa nos fios de cabelo. Ressalta-se que ele é utilizado somente em estações meteorológicas convencionais.

De acordo com Sentelhas & Angelocci (2009) como esse aparelho só registra a umidade relativa do ar, há necessidade de se registrar também a temperatura do ar para se ter um referencial da quantidade de vapor presente no ar. Sem a temperatura do ar, a umidade relativa tem pouco significado prático, pois valores iguais de UR significam valores diferentes de pressão atual de vapor (e), umidade absoluta (UA) e temperatura do ponto de orvalho (t_{po}), em condições de diferentes temperaturas do ar. Daí, a construção de instrumentos conjugado com sensores para temperatura e umidade do ar, isto é, termohigrógrafos ou higrótermógrafos (Figura 7.13).



Figura 7.13. Termohigrógrafo com sensores conjugados de temperatura e umidade do ar. Fonte: <http://www.nevasport.com/meteo/art/9467/El-Termohigrografo/>.

7.5.3. Sensores capacitivos

São sensores utilizados em estações automáticas. O sensor constitui-se de um filme de polímero (Figura 7.14), que absorve vapor d'água do ar alterando a capacitância de um circuito ativo.

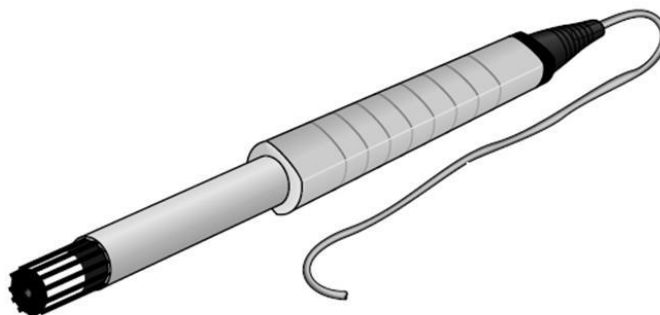


Figura 7.14. Sensor capacitivo de umidade relativa do ar associado à estação automática. **Fonte:** Sentelhas & Angelocci (2009).

Esse sensor deve ser instalado juntamente com o sensor de temperatura, num abrigo meteorológico da estação automática (Figura 7.15). É recomendável fazer calibrações periódicas e limpeza, principalmente em períodos muito secos (SENTELHAS & ANGELOCCI, 2009).



Figura 7.15. Abrigo meteorológico – estação automática. **Fonte:** Sentelhas & Angelocci (2009).

Estes dois sensores, da temperatura e da umidade relativa do ar, funcionam de forma conjugada e encontram-se protegidos por um filtro poroso o qual garante que ambos se encontrem nas mesmas condições e protegidos contra poeiras e poluição atmosférica. Assim, eles são protegidos por um abrigo de plástico ou de fibra de vidro, evitando assim, a exposição direta dos sensores à chuva e aos raios solares e também garantir que os elementos sensíveis recebam ventilação natural adequada para permitir o equilíbrio com a atmosfera à sua volta.

Finalidade: registrar a umidade relativa do ar instantânea, máxima e mínima.

Órgão Sensível: o órgão sensível da umidade relativa do ar é uma película higroscópica (polímero) colocada entre dois elétrodos, constituindo um condensador. A capacidade depende da umidade absorvida pela película higroscópica e representa a umidade relativa do ar.

Medições analógicas: medida da tensão. Amostragem a cada 5 segundos. O valor instantâneo usado em relatórios meteorológicos é a média de um minuto (de 12 valores de amostragem).

Referências do Capítulo

DELGADO, R. C. Avaliação de modelos físico-matemáticos para estimativa da umidade relativa do ar e déficit de pressão de vapor a partir de dados de temperatura do ar. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 107p, 2007.

SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R., 2009. Umidade do ar – Chuva – Vento. Slides de Aula da Disciplina LCE 306 – Meteorologia Agrícola, ESALQ/USP.

VAREJÃO-SILVA, M.A., 2006. Meteorologia e Climatologia. Versão Digital. Acesso: www.asasdaamazonia.com.br/.../Meteorologia_Climatologia.pdf. 552p.

Exercícios Resolvidos

Teóricos

- 1) Cite pelo menos três importantes processos para se quantificar o vapor d'água atmosférico.

Resposta: Estudos de conforto térmico, dimensionamento de sistemas de condicionamento térmico para animais e plantas, estimativa do tempo e da energia requerida para secagem de produtos agrícolas.

- 2) Em que se refere o estudo da psicrometria?

Resposta: Refere-se à quantificação do vapor d'água em determinado ambiente.

- 3) Quais métodos de estimativa são utilizados para quantificar o vapor d'água atmosférico?

Resposta: Analítico, tabular e o método gráfico.

- 4) O que é déficit de pressão de saturação?

Resposta: Quantidade de vapor d'água que falta para saturar o ambiente. Quando o déficit é igual a zero, o ar está saturado.

Práticos

- 5) Calcule as variáveis **e**, **$\rho_{\text{vapor d' água}}$** , **$\rho_{\text{ar seco}}$** , **q**, **r**, **UR**, **t_{po}** , a partir dos seguintes dados obtidos às 15h de um mesmo dia na condição externa (posto meteorológico $t_s = 27^\circ\text{C}$ e $t_u = 21^\circ\text{C}$). Considere um psicrômetro aspirado e a pressão atmosférica igual a 101,3 kPa.

Pressão real de vapor d' água (e) - (kPa)

$$e = e_{su} - A \times P_{ATM} \times (t_s - t_u)$$

$$A = 6,7 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ (Psicrômetro Aspirado)}$$

$$e_{su} = 0,61078 \times 10^{\left[\frac{7,5 \times t_u}{237,3 + t_u}\right]} = e_{su} = 0,61078 \times 10^{\left[\frac{7,5 \times 21}{237,3 + 21}\right]} = 0,61078 \times 4,1 = \mathbf{2,5 \text{ kPa}}$$

$$e = 2,49 - 6,7 \times 10^{-4} \times 101,3 \times (27 - 21) = 2,49 - 0,06787 \times 6 = \mathbf{2,08 \text{ kPa}}$$

Densidade de vapor d' água ($\rho_{\text{vapor d' água}}$) - (g/m^3)

$$\rho_{\text{vapor d' água}} = 2168 \times \frac{e}{T}$$

$$t_s = 27^\circ\text{C} \text{ --- Transformando para Kelvin --- } TK = t_s + 273,15 = 27 + 273,15 = \mathbf{300,15 \text{ K}}$$

$$e = \mathbf{2,08 \text{ kPa}}$$

$$\rho_{\text{vapor d' água}} = 2168 \times \frac{2,08}{300,15} = 2168 \times 0,00693 = \mathbf{15,02 \text{ g/m}^3}$$

Densidade do ar seco ($\rho_{\text{ar seco}}$) - (g/m^3)

$$\rho_{\text{vapor d' água}} = 3484 \times \left(\frac{P_{ATM} - e}{T} \right)$$

$$\rho_{\text{vapor d' água}} = 3484 \times \left(\frac{101,3 - 2,08}{300,15} \right) = 3484 \times 0,33057 = \mathbf{1151,7 \text{ g/m}^3}$$

Umidade específica (q) – (g_{vapor}/g_{ar})

$$q = 0,622 \times \frac{e}{[P_{ATM} - (0,378 \times e)]}$$

$$q = 0,622 \times \frac{2,08}{[101,3 - (0,378 \times 2,08)]} = 0,622 \times 0,02069 = \mathbf{0,013 \text{ (g}_{vapor}/\text{g}_{ar})}$$

Razão de mistura (r) - (g_{vapor}/g_{ar seco})

$$q = 0,622 \times \frac{e}{(P_{ATM} - e)}$$

$$q = 0,622 \times \frac{2,08}{(101,3 - 2,08)} = 0,622 \times 0,02096 = \mathbf{0,013 \text{ (g}_{vapor}/\text{g}_{ar seco})}$$

Umidade relativa do ar (UR) - (%)

$$UR = \frac{e}{e_s} \times 100$$

$$e_s = 0,61078 \times 10^{\left[\frac{7,5 \times t_s}{237,3 + t_s}\right]} = 0,61078 \times 10^{\left[\frac{7,5 \times 27}{237,3 + 27}\right]} = 0,61078 \times 5,84 = \mathbf{3,57 \text{ kPa}}$$

$$UR = \frac{2,08}{3,57} \times 100 = \mathbf{58,3\%}$$

Temperatura do ponto de orvalho (t_{po}) – (°C)

$$t_{po} = \left(\frac{237,3 \log\left(\frac{e}{0,61078}\right)}{7,5 - \log\left(\frac{e}{0,61078}\right)} \right)$$

$$= \left(\frac{237,3 \log\left(\frac{2,08}{0,61078}\right)}{7,5 - \log\left(\frac{2,08}{0,61078}\right)} \right) = \left(\frac{237,3 \log(3,41)}{7,5 - \log(3,41)} \right) = \left(\frac{126,42}{6,97} \right) = \mathbf{18,14 \text{ (}^\circ\text{C)}}$$

Exercícios Propostos

- 1) Explique a lei de Dalton das pressões parciais.

- 2) O que é umidade relativa do ar?

- 3) Explique a relação inversa da umidade relativa do ar com a temperatura.

- 4) Sabendo-se que a leitura do conjunto psicrométrico às 09 horas foi: temperatura do bulbo seco (t_s) de 27,5°C e temperatura do bulbo úmido (t_u) de 24°C, determine a umidade relativa do ar pelo método analítico (equação) e pelo método (tabular).

- 5) Sabendo-se que as dimensões desta sala são 8 x 5,5 x 3,3 metros, quantos litros de água existem neste momento, em forma de vapor no ar?