

## Movimentos Atmosféricos

### Objetivos:

1. Definir o vento e destacar a sua importância agronômica;
2. Explicar o processo de formação dos ventos;
3. Associar o vento aos centros de alta e baixa pressão;
4. Discriminar as distintas classes de ventos;
5. Representar graficamente as observações de vento à superfície;
6. Descrever os procedimentos de medição dos ventos.

### Desenvolvimento:

1. Generalidades
  2. Processo de Formação do Vento
  3. Influências Modificadoras do Vento
  4. Instrumentos e Medição do Vento
  5. Perfil da Velocidade do Vento
  6. Circulação do Ar na Atmosfera
  7. Conclusões
  8. Exercícios Propostos
  9. Bibliografia Citada e Recomendada
-

## 1. Generalidades

O vento “não nada mais é” que o ar em movimento. Esse movimento do ar atmosférico, especialmente quando ocorre próximo à superfície terrestre, tem sua importância agrônômica, conforme os itens a seguir:

- (a) meio de propagação de sementes, grãos de pólen e patógenos;
- (b) quando seco e quente, o vento intensifica a transferência de água para a atmosfera;
- (c) veículo de polinização das plantas (polinização anemófila);
- (d) agente causador de danos mecânicos às plantas (quebra-ventos em áreas agrícolas);
- (e) agente causador de erosão do solo (erosão eólica);
- (f) provoca desuniformidade na distribuição de água por sistemas de irrigação por aspersão;
- (g) pode provocar tombamento de árvores (p. ex., fruteiras) irrigadas por gotejamento;
- (h) provoca desuniformidade na aplicação de pesticidas, com pulverizadores em solo ou em avião;
- (i) o vento é fonte alternativa de energia (energia eólica).

## 2. Processo de Formação do Vento

- O vento não existiria se a temperatura da Terra fosse a mesma em todas as latitudes ao longo do tempo.

A variação da pressão com a distância horizontal define o gradiente horizontal de pressão ( $G_{HP}$ ), indicado pela equação 1:

$$G_{HP} = \frac{\partial P}{\partial x} \approx \frac{\Delta P}{\Delta x} = \frac{P_2 - P_1}{x_2 - x_1} \quad (1)$$

onde  $\Delta P$  = diferença de pressão na distância  $\Delta x$ . Os subscritos 1 e 2 indicam valor inicial e final, respectivamente. A derivada parcial indica que a pressão também varia em outras direções além da horizontal.

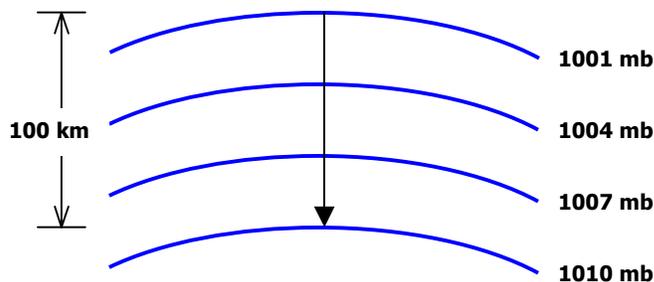


Figura 1 – Isóbaras e gradiente horizontal de pressão. (Fonte: TUBELIS e NASCIMENTO, 1984).

**Exemplo Prático 1)** Com base nas informações da Figura 1, checar o valor do  $G_{HP}$  como apresentado. Expressá-lo em termos de unidade de distância (km).

**Exemplo Prático 2)** Qual seria o valor do  $G_{HP}$  na Figura 1, se a distância entre as isóbaras fosse 50 km?

### 3. Influências Modificadoras do Vento

Se a força do gradiente de pressão fosse a única a atuar sobre uma dada massa de ar, a direção de deslocamento seria também aquela perpendicular às isóbaras. No entanto, a direção e a velocidade do vento sofrem influência de outras forças.

#### 3.1. Efeito da Rotação da Terra

A velocidade angular da Terra ( $2\pi \text{ dia}^{-1}$  ou  $15^\circ \text{ h}^{-1}$ ) é constante para qualquer ponto na superfície, exceto na latitude de  $90^\circ$ , onde a velocidade angular é zero.

A velocidade linear por outro lado varia com a latitude.

- Equador  $\rightarrow 465 \text{ m s}^{-1}$
- Latitude de  $45^\circ$   $\rightarrow 370 \text{ m s}^{-1}$
- Latitude de  $70^\circ$   $\rightarrow 159 \text{ m s}^{-1}$
- Latitude de  $90^\circ$   $\rightarrow 0 \text{ m s}^{-1}$  (pólos)

- Devido ao movimento de rotação da Terra, o vento é desviado da direção perpendicular às isóbaras, seu caminho teórico. O desvio é para a direita no HN e para a esquerda no HS, qualquer que seja a direção inicial de deslocamento da massa de ar. Esse desvio é causado pela ação da força defletora de rotação da Terra ou força de Coriolis.

O efeito defletor (D) da força de Coriolis aumenta com a latitude e com a velocidade do vento, podendo ser estimado pela equação 2:

$$D = 2 \cdot M \cdot V \cdot \Omega \cdot \sin \phi \quad (2)$$

onde: M = massa do ar; V = velocidade da massa de ar;  $\Omega$  = velocidade angular da Terra e  $\phi$  = latitude.

- Pela equação 2 percebe-se que D aumenta do Equador para os pólos.

#### 3.2. Efeito da Força Centrífuga

A ação dessa força surge em função da tendência de movimento curvilíneo da massa de ar, resultante da ação da força D. Assim a direção resultante do vento passa a ser dada pela ação de três forças: do gradiente horizontal de pressão atmosférica ( $\vec{G}_{HP}$ ), do efeito de rotação da Terra ( $\vec{D}$ ) e da força centrífuga ( $\vec{F}_c$ ).

#### 3.3. Efeito do Atrito com a Superfície

O efeito do atrito com a superfície é mais pronunciado até aproximadamente 500 m de altura, dependendo das condições topográficas e meteorológicas locais. A força de atrito resultante é oposta ao deslocamento do vento.

### 3.4. Direção Resultante do Vento

A direção resultante do vento devido à ação das quatro forças depende da distribuição da pressão atmosférica (zonas de alta e baixa pressão) e do hemisfério considerado, norte ou sul.

Hemisfério Sul: zona de baixa pressão → circulação ciclônica → sentido horário  
zona de alta pressão → circulação anticiclônica → sentido anti-horário

Hemisfério Norte: zona de baixa pressão → circulação ciclônica → sentido anti-horário  
zona de alta pressão → circulação anticiclônica → sentido horário

A Figura 2 e a Figura 3 ilustram os casos acima.

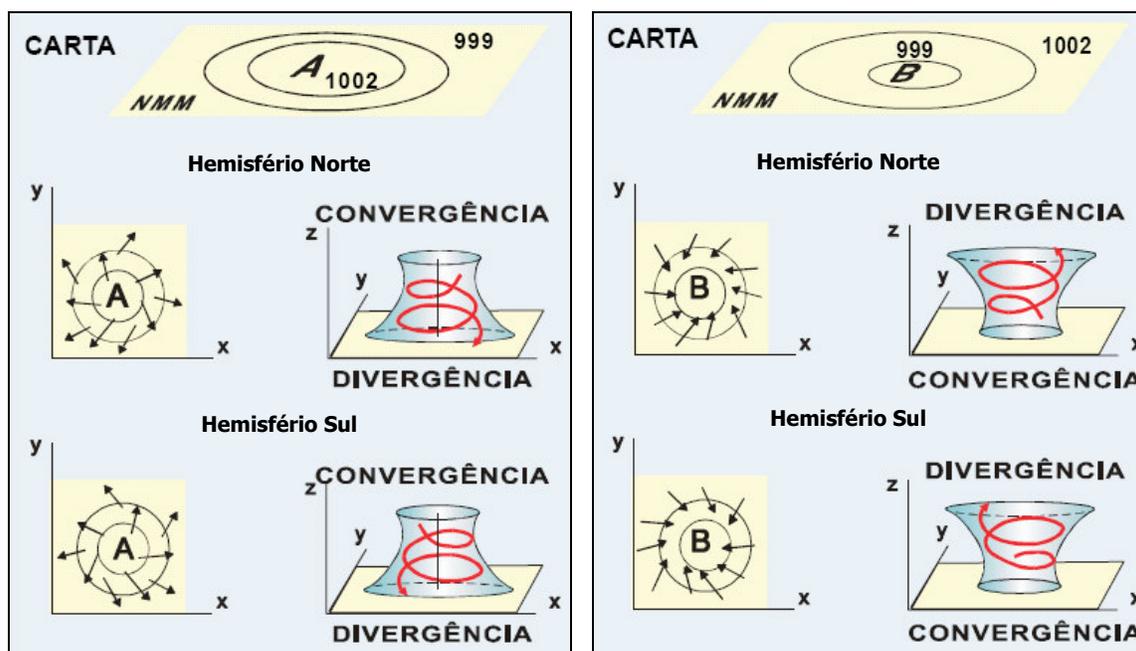


Figura 2 – Esquema de distribuição das Isóbaras num centro de alta pressão e circulação horizontal e vertical do ar.

Figura 3 – Esquema de distribuição das isóbaras num centro de baixa pressão e circulação horizontal e vertical do ar.

### 4. Instrumentos e Medição do Vento

Do vento pode-se medir a velocidade, direção e força. A direção do vento é aquela de onde o vento sopra. As direções-padrão são norte (N), nordeste (NE), leste (E), sudeste (SE), sul (S), sudoeste (SW), oeste (W) e noroeste (NW). Nos sensores digitais a direção é dada em graus, ou seja, N = 0° ou 360°; NE = 45°; E = 90°; SE = 135°; S = 180°; SW = 225°; W = 270° e NW = 315°.

A representação gráfica da direção do vento em valores (frequência) absolutos ou relativos é denominada rosa dos ventos (Figura 4). Na rosa dos ventos podem ser representadas dezesseis direções, ou seja, oito além daquelas mencionadas acima.

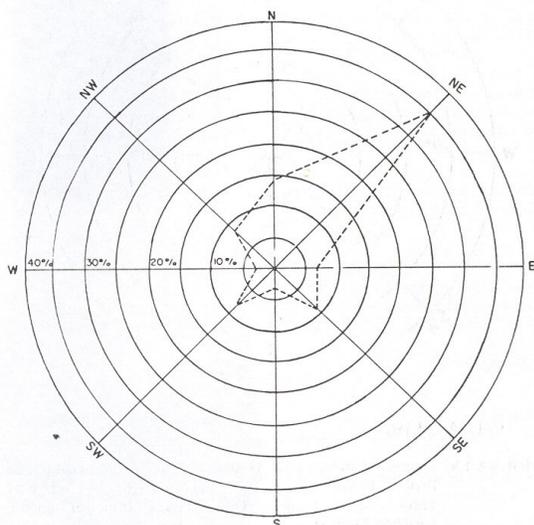


Figura 4 – Frequência relativa média mensal, Janeiro, em Viçosa-MG, no período 1970-1980 (Fonte: VIANELLO e ALVES, 1991).

**Exemplo Prático 3)** Considere as normais (frequências absolutas) de direção do vento apresentadas a seguir, e represente-as graficamente:

N	5	E	208	S	62	W	18
NNE	32	ESE	179	SSW	30	WNW	9
NE	63	SE	123	SW	25	NW	6
ENE	145	SSE	91	WSW	22	NNW	6
Calmas = 71							

- Passo 1) Obter o total de observações ( $N_{obs}$ );  
 Passo 2) Obter a frequência relativa (%) de cada direção:  $F = (n / N_{obs}) \cdot 100$   
 Passo 3) Construir as circunferências no eixo ortogonal da rosa dos ventos;  
 Passo 4) Indicar no gráfico a frequência de cada direção;  
 Passo 5) Determinar a direção predominante do vento.

A velocidade do vento é dada pela componente horizontal em  $m\ s^{-1}$  e  $km\ h^{-1}$ , lembrando que  $1\ m\ s^{-1} = 3,6\ km\ h^{-1}$ .

A força do vento é a força exercida pela massa de ar num obstáculo perpendicular a sua direção. É medida com a escala de Beaufort. Esta escala varia de 0 a 12, correspondendo o número 1 a vento calmo e o 12 a furacão. O número 0 na escala corresponde a uma calma perfeita, ou seja, ausência completa de vento. A cada valor na escala de Beaufort associa-se uma faixa de velocidade. Assim, vento calmo  $\rightarrow$  pino 1  $\rightarrow U < 1,6\ km\ h^{-1}$  e furacão  $\rightarrow$  pino 12  $\rightarrow U > 120\ km\ h^{-1}$ .

Entre os aparelhos destinados a medir propriedades do vento, tem-se:

Catavento tipo Wild  $\rightarrow$  direção e força; velocidade fornecida indiretamente, através da escala de Beaufort. Instalado a 10 m acima da superfície do solo. O catavento de Wild (Figura 5), com o passar do tempo, apresenta oxidação nos eixos e o atrito dela resultante introduz erros acentuados nas observações. É um instrumento obsoleto. A haste com os pinos de referência é utilizada para indicar a força do vento.

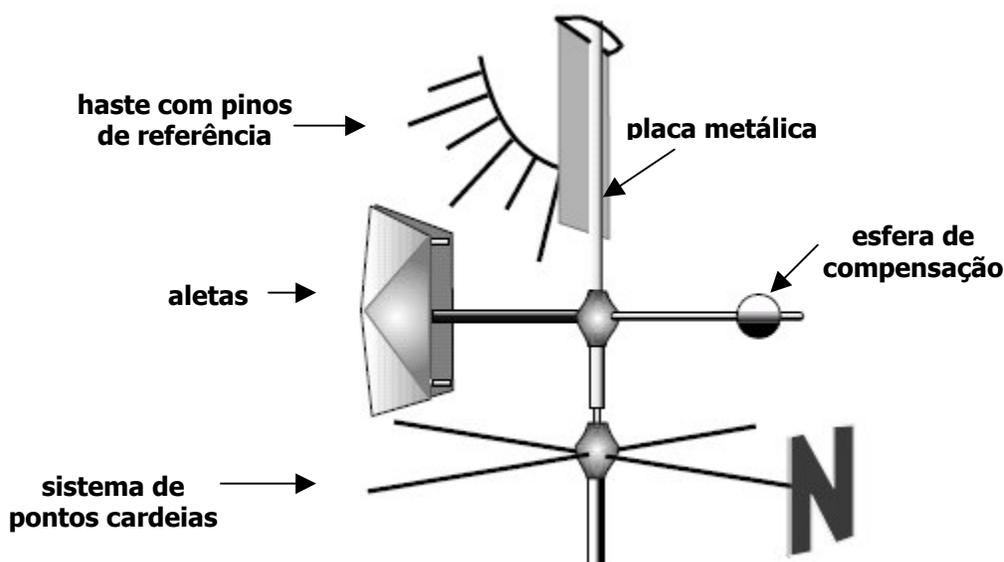


Figura 5 – Catavento de Wild (sem o mastro). (Fonte: VAREJÃO-SILVA, 2001).

Anemômetro totalizador de canecas → mede o vento percorrido (km) com o qual se obtém a velocidade média. Instalado a 2 m de altura, na parte sul do posto meteorológico. O aparelho (Figura 6) é constituído por um conjunto de três canecas (ou hélices) solidárias a um eixo vertical. O número de giros das canecas, sendo proporcional à velocidade, é transformado em deslocamento (distância percorrida) e indicado num odômetro. A velocidade média é obtida dividindo-se o deslocamento pelo intervalo de tempo (h).

Nos equipamentos digitais cada rotação gera um pulso elétrico, que é captado por um sistema eletrônico de aquisição de dados (*datalogger*) (PEREIRA et al., 2002). Como cada pulso corresponde à distância de um giro, contando-se o número de pulsos num intervalo de tempo tem-se o vento percorrido, com o que se calcula a velocidade média.

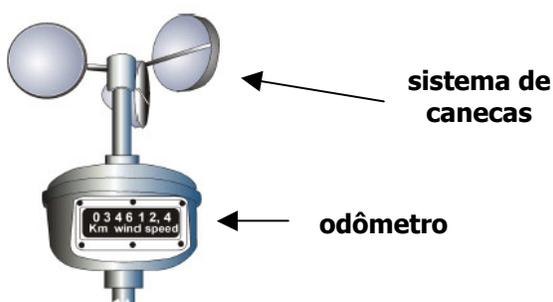


Figura 6 – Anemômetro de conchas do tipo totalizador. (Fonte: VAREJÃO-SILVA, 2001).

**EXEMPLO PRÁTICO 4)** Calcular a velocidade média do vento entre 07h00m dos dias 20 e 21 de janeiro, sabendo-se que as leituras efetuadas num anemômetro foram respectivamente, 08539,6 e 09739,6. Considere que cada unidade no odômetro correspondeu a 100 m de vento percorrido.

Anemógrafo universal → num gráfico denominado anemograma, é registrada a direção, a velocidade instantânea e a distância percorrida pelo vento. O aparelho (Figura 7) é instalado na parte sul do posto meteorológico, a 10 m de altura, e a unidade registradora em abrigo especial a 1,5 m de altura.

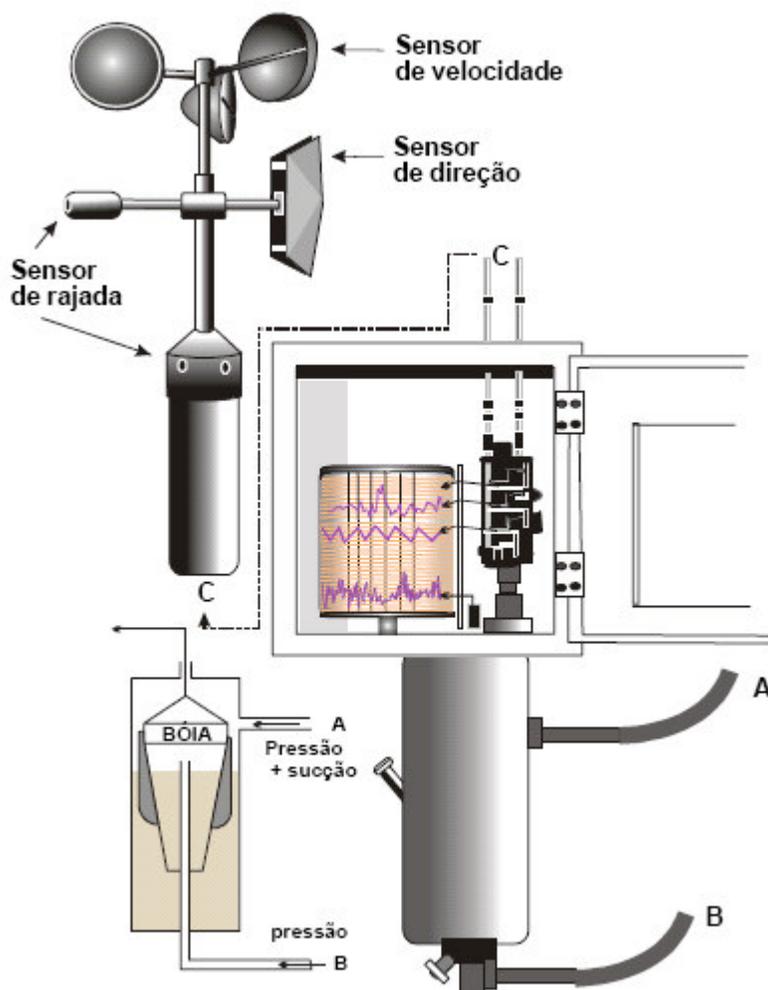


Figura 7 – Anemógrafo universal, vendo-se acima os sensores e abaixo detalhe do mecanismo de registro e da bóia do sistema de pressão-sucção. (Fonte: VAREJÃO-SILVA, 2001).

## 5. Perfil da Velocidade do Vento

Direção e velocidade são propriedades do vento muito sensíveis à influência de edifícios, árvores, montanhas e outros obstáculos, apresentando, portanto, grande variabilidade espacial. Segundo ZUÑIGA (1985), o vento raras vezes apresenta-se ordenado, ou seja, escoando segundo um regime ou fluxo laminar. O fluxo ou regime de escoamento predominante é o turbulento, desordenado, acompanhado de fortes oscilações de direção e velocidade.

A fricção entre o ar em movimento e a superfície (solo ou cultivo), retarda o movimento do ar sobre a mesma. A camada de ar sujeita aos efeitos da fricção é chamada camada de fricção. Dependendo das condições meteorológicas e topográficas esta camada pode estender-se de alturas de centenas de metros a 1 km (ZUÑIGA, 1985), acima da qual encontra-se a atmosfera livre da fricção.

A velocidade do vento é característica da altura em que a medição foi feita. Comumente é necessário converter-se a velocidade do vento medida uma dada altura para uma outra altura. Isso pode ser obtido pela equação 7.

$$U_2 = U_z \cdot \frac{4,87}{\text{Ln}(67,8 \cdot z - 5,42)} \quad (7)$$

onde  $U_2$  = velocidade do vento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ );  $U_z$  = velocidade do vento a z m acima da superfície do solo; z = altura de medição da velocidade do vento acima da superfície do solo (m).

**Exemplo Prático 5)** *Um aparelho medidor da velocidade do vento, instalado num posto meteorológico a 17 m de altura, registrou vento de  $15,1 \text{ km h}^{-1}$ . Qual teria sido a velocidade do vento na altura de referência de 2 m?*

Durante o dia a velocidade do vento tende a ser maior que durante a noite. A velocidade do vento durante o dia a 2 m de altura ( $U_{2d}$ ) pode ser estimada a partir da velocidade média diária do vento àquela altura ( $U_2$ ) e a relação de  $U_{2d}$  com a velocidade do vento à noite ( $U_{2n}$ ), pela equação 8.

$$U_{2d} = \frac{2 \cdot U_2 \cdot \left( \frac{U_{2d}}{U_{2n}} \right)}{\left( 1 + \frac{U_{2d}}{U_{2n}} \right)} \quad (8)$$

**Exemplo Prático 6)** *Assuma que a velocidade média diária do vento a 2 m de altura em Cruz das Almas é  $2,5 \text{ m s}^{-1}$  e que  $U_{2n} = 0,5 U_{2d}$  então determine a velocidade do vento no período diurno ( $U_{2d}$ ).*

## **6. Circulação do Ar na Atmosfera**

O ar atmosférico circula seguindo padrões gerais e locais, em resposta aos gradientes de pressão atmosférica.

### **6.1. Circulação Geral**

A Figura 8 ilustra padrões teóricos de circulação do ar atmosférico entre zonas de alta e baixa pressão e em alta altitude e baixa altitude. Observa-se a formação de células de circulação nas diferentes latitudes, como resultado de fenômenos de convergência e divergências das correntes de ar.

A configuração descrita a seguir não é exatamente o que se observa ao longo do ano. Claramente, a distribuição dos continentes e oceanos, combinada com o aquecimento diferenciado (em virtude da diferença no calor específico), origina configurações de pressão que diferem do verão para o inverno.

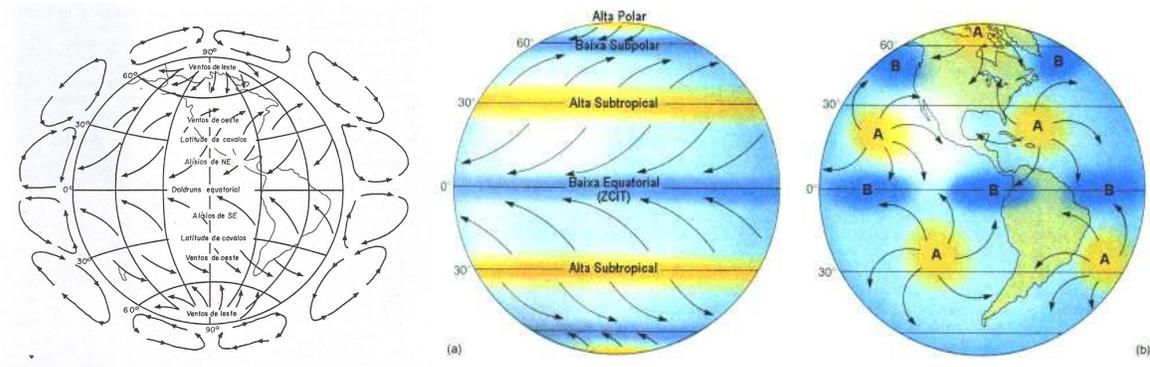


Figura 8 – Esquema representativo da circulação geral da atmosfera.

## 6.2. Circulação Local

Brisa de vale e de montanha → Durante o dia, devido à radiação solar, as encostas das montanhas se esquentam muito, o mesmo ocorrendo com o ar em contato com elas. Este aquecimento diferencial expande a massa de ar em contato, reduzindo sua densidade. O ar mais quente e mais leve é então forçado a elevar-se pela ação do ar mais frio e mais denso da circunvizinhança. Em altitude, a massa de ar que se elevou volta sobre o vale, produzindo uma sobrepressão que empurra o ar contra a encosta, originando assim um vento ascendente chamado brisa de vale. Durante a noite ocorre o processo inverso. As encostas se esfriam muito e também o ar em contato, que se contrai e aumenta sua densidade. Este ar frio e pesado inicia um movimento descendente em direção ao vale, caracterizando a brisa de montanha. O acúmulo de ar frio no vale origina uma corrente aérea ascendente que, em altitude, se move em direção a encosta. Fecha-se assim, a célula de circulação.

Brisa marítima e terrestre → O vento local do mar para terra e vice-versa, depende do grau de aquecimento tanto da massa sólida (terra) quanto da líquida (mar) e de acordo com a diferença de temperatura das duas massas, estabelece-se uma corrente de ar (Figura 9). Durante o dia a terra se esquentam mais rapidamente que o mar, produzindo sobre ela uma diminuição da pressão; em consequência, o vento soprará do mar para a terra; é a chamada brisa marítima. Durante à noite sucede o inverso. A terra se esfria mais rapidamente que o mar, e sobre ela se produz um aumento da pressão e o vento então sopra da terra para o mar; é a chamada brisa terrestre.

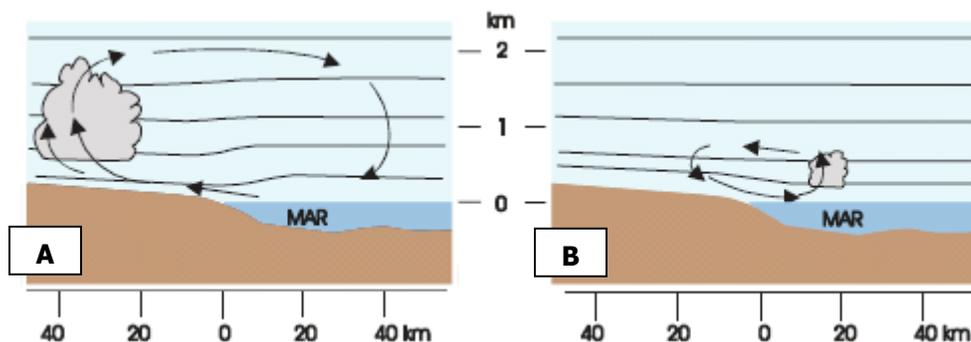


Figura 9 – Brisa marítima (A) e terrestre (B).

## 7. Conclusões

## 8. Exercícios Propostos

EP.01. A velocidade do vento a 2 m de altura em determinado local foi de  $1,8 \text{ m s}^{-1}$ . Qual teria sido a velocidade a 10 e 20 m de altura? Dobrando as alturas (de 10 para 20 m), a velocidade do vento também dobra? Em caso negativo qual a relação entre elas?

EP.02. Um anemômetro totalizador de canecas, instalado a 2 m de altura indicou no odômetro 57.329 às 09:00 h e 57.415 às 10:00 h. Calcular a velocidade média do vento no período, em m/s, sendo que a leitura do instrumento é em centenas de metros.

EP.03. Numa determinada localidade, leituras a cada duas horas, indicaram as seguintes frequências absolutas das direções do vento. Com base nos dados, representar graficamente (rosa dos ventos) a frequência relativa de cada direção. Obs.: Material necessário: papel milimetrado, transferidor e compasso.

<i>N</i>	<i>230</i>	<i>E</i>	<i>2</i>	<i>S</i>	<i>0</i>	<i>W</i>	<i>10</i>
<i>NNE</i>	<i>185</i>	<i>ESE</i>	<i>2</i>	<i>SSW</i>	<i>0</i>	<i>WNW</i>	<i>25</i>
<i>NE</i>	<i>75</i>	<i>SE</i>	<i>1</i>	<i>SW</i>	<i>3</i>	<i>NW</i>	<i>90</i>
<i>ENE</i>	<i>25</i>	<i>SSE</i>	<i>0</i>	<i>WSW</i>	<i>2</i>	<i>NNW</i>	<i>175</i>
<i>Calmas = 100</i>							

EP.04. Numa determinada localidade, a velocidade do vento é  $4,3 \text{ m s}^{-1}$  quando medida a 10 m de altura acima do solo. Converta esta velocidade para a altura de referência (2 m acima do solo). Qual a relação entre ambas velocidades em termos percentuais.

EP.05. Construir o gráfico do valor percentual da velocidade do vento, de 0,5 m a 20 m, em relação à altura de 6 m.

EP.06. O vento percorrido nas 24 horas de um dado dia foi de 216,7 km a 2 m de altura. Determinar a velocidade média diária do vento em  $\text{m s}^{-1}$ .

EP.07. Estime a velocidade do vento a 3 m do solo, sabendo-se que um aparelho instalado a 10 m indicou velocidade de  $18 \text{ m s}^{-1}$ .

## 9. Bibliografia Citada e Recomendada

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. P.; SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações. Guaíba: Agropecuária. 2002. 487p.

VIANELLO, R. L. e ALVES, A. R. *Meteorologia básica e aplicações*. Viçosa: UFV – Imprensa Universitária. 1991. 449 p.

TUBELIS, A. e NASCIMENTO, F. J. L. do. *Meteorologia descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras*. São Paulo: Nobel. 1984. 374 p.

VAREJÃO-SILVA, M. A. *Meteorologia e climatologia*. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia-Ministério da Agricultura. 2001. 515 p.

ZUÑIGA, A. C. *Agroclimatología*. San José: Editorial Universidad Estatal a Distancia. 1985. 520 p.