17:00	30,9	30,1	23,0	23,7	0,331	0,000
18:00	28,2	28,4	22,5	23,2	0,129	0,010

8.3. MÉTODO DA CORRELAÇÃO DOS TURBILHÕES

A interação da atmosfera com a superfície resulta no aparecimento de turbilhões, que se movem aleatoriamente, mudando constantemente de posição, misturando-se com turbilhões de outros níveis. Esse processo de agitação contínua, de mistura, resulta em deslocamentos horizontais e verticais, com conseqüente transporte das propriedades atmosféricas de um ponto para outro. Se o escoamento está plenamente ajustado às características aerodinâmicas da superfície, então, os transportes são predominantemente no sentido vertical.

Um turbilhão ao se deslocar verticalmente induz o aparecimento de uma corrente vertical com velocidade **w**. Por convenção, adota-se o movimento para cima como positivo, e negativo no sentido contrário. Portanto, uma corrente ascendente tem velocidade positiva (**+w**), enquanto uma descendente tem velocidade negativa (**-w**). Como uma corrente ascendente deve ter uma contrapartida descendente ao final de um período, a velocidade vertical média («**w**») deve ser zero. Nessas condições, a densidade de fluxo vertical (**F**) de uma propriedade atmosférica qualquer (**P**), num dado instante, é dada por

$$\mathbf{F = - wP.} \qquad (8.34)$$

Para um intervalo de tempo, a densidade de fluxo média ($\overline{\mathbf{F}}$) é expressa por

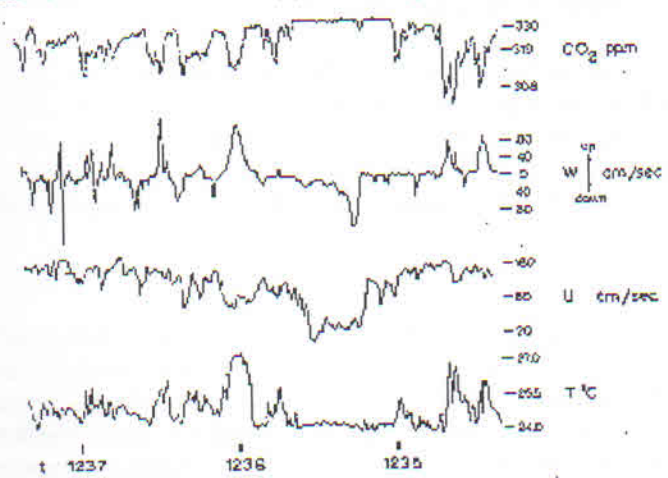
$$\text{«}\mathbf{F}\text{»} = - (\text{«}\mathbf{wP}\text{»}, \qquad (8.35)$$

ou seja, é dada pela média do produto («**wP**») e não pelo produto da média («**w**»«**P**«»). Como foi discutido, «**w**» = **0**; logo, «**w**»«**P**» = **0**. Isso significa que o produto **wP** deve ser obtido a cada instante antes de se obter o valor médio do produto, ou seja,

$$\text{«}\mathbf{wP}\text{»} = (\Sigma \mathbf{wiPi}) / \mathbf{N}, \qquad (8.36)$$

sendo **N** é o número de observações.

Num escoamento turbulento, em função da movimentação dos turbilhões, as propriedades atmosféricas variam a cada instante. A Figura mostra a variação da concentração de CO_2 , da velocidade vertical (**w**), da velocidade horizontal (**u**), e da temperatura (**T**), num período de 3 min de amostragem, a 2 m acima de uma cultura de milho em crescimento ativo. Nota-se a ocorrência de variações instantâneas e substanciais, mostrando o efeito da passagem de diferentes turbilhões pelo nível dos sensores. Quanto mais rápido for a resposta do sensor, melhor será a caracterização das flutuações.



Nesse período (Δt), obtêm-se uma velocidade média («**u**»), que é dada pela expressão

$$\text{«}\mathbf{u}\text{»} = (\Delta \mathbf{t})^{-1} \int \mathbf{u}\, \mathbf{dt}. \qquad (8.37)$$

Portanto, num dado instante, a velocidade horizontal (**u**) será dada por

$$\mathbf{u} = \langle\langle \mathbf{u} \rangle\rangle + \mathbf{u}', \qquad (8.38)$$

em que **u'** representa o desvio da média, sendo também chamado de ***perturbação*** ou ***flutuação***. Desse modo, pode-se imaginar que o escoamento seja composto por um escoamento médio sobreposto por um escoamento turbulento. Essa maneira de representar o escoamento dá origem à teoria da perturbação, sendo também conhecida como ***notação de Reynolds***.

A notação de Reynolds tem três regras básicas importantes. Suponha que **a** e **b** sejam quantidades flutuantes, isto é, que admitem média e desvio, e que **c** seja uma constante. A ***primeira regra*** diz que a média da soma é igual à soma das médias, isto é,

$$\langle\langle \mathbf{a} + \mathbf{b} \rangle\rangle = \langle\langle \mathbf{a} \rangle\rangle + \langle\langle \mathbf{b} \rangle\rangle. \qquad (8.39)$$

A ***segunda regra*** diz que a média do produto de uma constante por uma variável é igual ao produto da constante pela média da variável, ou seja,

$$\langle\langle \mathbf{c}\ \mathbf{a} \rangle\rangle = \mathbf{c}\ \langle\langle \mathbf{a} \rangle\rangle. \qquad (8.40)$$

A ***terceira regra*** diz que a média do produto entre a média de uma variável e outra variável é igual ao produto da média das duas variáveis, isto é,

$$\langle\langle \langle\langle \mathbf{a} \rangle\rangle\ \mathbf{b} \rangle\rangle = \langle\langle \langle\langle \mathbf{a} \rangle\rangle \rangle\rangle\ \langle\langle \mathbf{b} \rangle\rangle = \langle\langle \mathbf{a} \rangle\rangle\ \langle\langle \mathbf{b} \rangle\rangle. \qquad (8.41)$$

Aplicando-se essas regras à equação (8.38) obtêm-se

$$\langle\langle \mathbf{u} \rangle\rangle = \langle\langle \langle\langle \mathbf{u} \rangle\rangle + \mathbf{u}' \rangle\rangle = \langle\langle \langle\langle \mathbf{u} \rangle\rangle \rangle\rangle + \langle\langle \mathbf{u}' \rangle\rangle = \langle\langle \mathbf{u} \rangle\rangle + \langle\langle \mathbf{u}' \rangle\rangle, \qquad (8.42)$$

donde se conclui que $\langle\langle \mathbf{u}' \rangle\rangle = \mathbf{0}$, ou seja, a média dos desvios é igual a zero. Usando-se a notação de Reynolds na equação (8.35), resulta em

$$-\langle\langle \mathbf{F} \rangle\rangle = \langle\langle (\langle\langle \mathbf{w} \rangle\rangle + \mathbf{w}')\ (\langle\langle \mathbf{P} \rangle\rangle + \mathbf{P}') \rangle\rangle = \langle\langle \langle\langle \mathbf{w} \rangle\rangle\ \langle\langle \mathbf{P} \rangle\rangle + \langle\langle \mathbf{w} \rangle\rangle\ \mathbf{P}' + \mathbf{w}'\ \langle\langle \mathbf{P} \rangle\rangle + \mathbf{w}'\ \mathbf{P}' \rangle\rangle$$

$$-\langle\langle \mathbf{F} \rangle\rangle = \langle\langle \langle\langle \mathbf{w} \rangle\rangle\ \langle\langle \mathbf{P} \rangle\rangle \rangle\rangle + \langle\langle \langle\langle \mathbf{w} \rangle\rangle\ \mathbf{P}' \rangle\rangle + \langle\langle \mathbf{w}'\ \langle\langle \mathbf{P} \rangle\rangle \rangle\rangle + \langle\langle \mathbf{w}'\ \mathbf{P}' \rangle\rangle$$

$$-\langle\langle \mathbf{F} \rangle\rangle = \langle\langle \langle\langle \mathbf{w} \rangle\rangle \rangle\rangle\ \langle\langle \langle\langle \mathbf{P} \rangle\rangle \rangle\rangle + \langle\langle \langle\langle \mathbf{w} \rangle\rangle \rangle\rangle\ \langle\langle \mathbf{P}' \rangle\rangle + \langle\langle \mathbf{w}' \rangle\rangle\ \langle\langle \langle\langle \mathbf{P} \rangle\rangle \rangle\rangle + \langle\langle \mathbf{w}'\ \mathbf{P}' \rangle\rangle$$

$$-\langle\langle \mathbf{F} \rangle\rangle = \langle\langle \mathbf{w} \rangle\rangle\ \langle\langle \mathbf{P} \rangle\rangle + \langle\langle \mathbf{w}'\mathbf{P}' \rangle\rangle. \qquad (8.43)$$

Como visto anteriormente, bem próximo à superfície $\langle\langle \mathbf{w} \rangle\rangle = 0$ e $\langle\langle \mathbf{w}' \rangle\rangle = \langle\langle \mathbf{P}' \rangle\rangle = \mathbf{0}$. Portanto, a densidade média de fluxo turbulento é dada principalmente pela média do produto das flutuações da velocidade vertical (**w'**) e da propriedade atmosférica (**P'**) que está sendo transportada.

Se a propriedade transportada for o ***momento***, $F = \tau$ [dina/cm^2 = g/cm s^2], e $\mathbf{P}' = \rho\ \mathbf{u}'$ [g/cm^2 s], isto é,

$$\tau = -\rho\ \langle\langle \mathbf{w}'\mathbf{u}' \rangle\rangle. \qquad (8.44)$$

Um turbilhão ascendente (+**w'**) vai de um nível de menor para outro com maior momento; logo, há retardamento do escoamento, resultando em **u'** negativo. Inversamente, um turbilhão descendente (-**w'**) vai de um nível de maior para outro com menor momento; logo, há aceleração do escoamento no nível inferior dando **u'** positivo. Conseqüentemente, **u'** e **w'** são negativamente correlacionados, resultando sempre em transporte positivo de momento da atmosfera para a superfície. Daí, o nome do método de transporte.

No caso da propriedade transportada ser o ***calor sensível*** então, $\mathbf{F} = \mathbf{H}$ [cal/cm^2 s] e $\mathbf{P'} = \rho\ \mathbf{Cp}\ \mathbf{T'}$ [cal/cm^3], resultando em

$$\mathbf{H} = -\ \rho\ \mathbf{Cp} \ll \mathbf{w'T'} \gg. \qquad (8.45)$$

Similarmente, no caso de ***calor latente*** $\mathbf{P'} = \rho\ \lambda\ \mathbf{q'}$ [cal/ cm^3] e $\mathbf{F} = \lambda\mathbf{E}$ [cal/cm^2 s], ou seja,

$$\lambda\ E = -\rho\ \lambda \ll \mathbf{w'q'} \gg = -\rho\ \lambda\ (\varepsilon\ /\ \mathbf{p}) \ll \mathbf{w'e'} \gg. \qquad (8.46)$$

No caso de transporte de gases, $\mathbf{F} = \mathbf{Q}$ [g/cm^2 s], e $\mathbf{P'} = \rho\ \mathbf{C'}$ [g/cm^3], isto é,

$$\mathbf{Q} = -\rho \ll \mathbf{w'C'} \gg. \qquad (8.47)$$

Esse método só é aplicável com instrumental sofisticado, pois necessita de medidas das flutuações instantâneas da propriedades atmosféricas.