

# ESTUDO DA VARIABILIDADE POR ESCALA DOS FLUXOS DE MASSA E ENERGIA SOBRE UMA ÁREA DE FLORESTA TROPICAL ÚMIDA

Celso von Randow

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE)

Rod. Pres. Dutra, km 40, Cachoeira Paulista, SP, 12630-000

Email: [randow@cptec.inpe.br](mailto:randow@cptec.inpe.br)

Leonardo D.A. Sá

Divisão de Ciências Meteorológicas (DCM/INPE)

Av. dos Astronautas, 1758, São José dos Campos, SP, 12201-970

Email: [leo@met.inpe.br](mailto:leo@met.inpe.br)

G.S.S.D. Prasad

Divisão de Ciências Meteorológicas (DCM/INPE)

Av. dos Astronautas, 1758, São José dos Campos, SP, 12201-970

Email: [prasad@met.inpe.br](mailto:prasad@met.inpe.br)

## ABSTRACT

High frequency measurements (sampling frequency = 10.4 Hz) of vertical wind component ( $w$ ), air temperature ( $T$ ), specific humidity ( $q$ ) and  $CO_2$  concentration ( $c$ ), made over an undisturbed rain forest, at the Rebio Jaru site, in Ji-Paraná, Rondônia, during the diurnal period (from 9:00 to 16:00 hs) of 2 days, were decomposed in 15 scales, using the Haar wavelet transform. The data was separated in four different modes of variation denoted as FS (fine scale), TT (turbulent transport), LE (large eddies) and MS (mesoscale) and the relative contributions of each mode of variation to the variances and fluxes were assessed.

## INTRODUÇÃO

Os fluxos verticais de momentum, calor sensível, calor latente e de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) são dependentes da *frequência de corte*, ou da escala temporal (ou espacial) em que são calculadas as componentes médias e flutuações da velocidade vertical do vento e respectivamente, da velocidade horizontal do vento, da temperatura, da umidade específica e da concentração de  $CO_2$  do ar. A frequência de corte determina as escalas de movimento que contribuem para o fluxo calculado. Sun *et al.* (1996) mostraram esta dependência dos fluxos em relação à escala em que são calculadas as *médias* e as *flutuações* das variáveis escalares e em relação à escala em que são calculadas as médias dos *produtos* das perturbações. Baseando-se nas características dessas dependências por escala, eles particionaram o fluxo total de energia em termos de três *modos de variação*: (i) “fluxos turbulentos”, que são causados pelos movimentos de transporte turbulento propriamente ditos e contém a maior parte do fluxo total; (ii) “fluxos de grandes eddies” (“large eddies”), que envolvem movimentos com escalas horizontais (ou vertical) da ordem da altura da camada limite; e (iii) “fluxos de mesoescala”, que podem ser causados por movimentos em escalas horizontais relativamente grandes, por fatores como a heterogeneidade da superfície ou sistemas convectivos de mesoescala. Desenvolvendo um método adaptado da transformada em ondeletas de Haar, Howell e Mahrt (1994) utilizaram-na para também decompor os sinais turbulentos em 4 diferentes modos de variação, incluindo aos citados anteriormente, o modo de “escala fina”, que corresponde aos movimentos de escalas muito pequenas, em alta frequência, com características quase isotrópicas.

As séries de sinais turbulentos medidas sobre áreas de superfície heterogênea, como uma floresta tropical, geralmente consistem de modos de variação fisicamente distintos, que devem ser levados em consideração quando se calculam os fluxos através dos métodos convencionais (método de covariâncias, método de fluxo-variância, método de fluxo-gradiente, etc). Alguns destes métodos necessitam de condições específicas, e essas condições são observadas de maneira distinta em diferentes modos de variação, particularment, a validade da Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov na camada limite superficial.

Neste sentido, De Bruin *et al.* (1999) estudaram a relação entre o valor do coeficiente de correlação entre os sinais de temperatura ( $T$ ) e umidade do ar ( $q$ ) e a validade da Teoria da Similaridade. Segundo eles, não se deve esperar que tal teoria valha plenamente quando os valores de correlação entre  $T$  e  $q$  forem diferentes de 1. Vickers e Mahrt (1997), Mahrt (1998) e Affre *et al.* (2000) também mostram vários outros tipos de problemas que podem

ocorrer em dados de alta frequência medidos em torres ou aviões, desenvolvendo critérios de controle de qualidade dos dados, relacionados, por exemplo, à estacionaridade dos dados ou a descontinuidades nos sinais turbulentos.

Estudando-se o comportamento das variâncias e covariâncias dos sinais turbulentos em relação aos diferentes modos de variação observados, é possível obter informações sobre as escalas que contribuem para os fluxos turbulentos e os fatores físicos que determinam sua eventual variabilidade temporal.

O objetivo deste trabalho é particionar os fluxos de massa e energia em diferentes modos de variação, analisando a contribuição relativa de cada modo ao fluxo total, para um período de 7 horas, medidos sobre uma área de floresta não perturbada na Amazônia.

## MATERIAIS E MÉTODOS

São utilizados neste trabalho dados de alta frequência da velocidade vertical do vento ( $w$ ), da temperatura ( $T$ ), umidade específica ( $q$ ) e concentração de  $\text{CO}_2$  ( $c$ ) do ar, medidos a uma taxa de 10.4 Hz, em uma área de floresta tropical não perturbada (floresta amazônica), no sítio experimental da Reserva Biológica do Jaru ( $10^\circ 5' \text{ S}$ ,  $61^\circ 55' \text{ W}$ ), no município de Ji-Paraná, Rondônia. A velocidade vertical do vento ( $w$ ) e a temperatura do ar ( $T$ ) são medidas por um anemômetro sônico (Gill) instalado a 62.7 m de altura, no topo da torre micrometeorológica de floresta do Consórcio Brasil-União Européia de Torres do LBA (BR/EU LBA Tower Consortium). Amostras de ar são coletadas próximas ao sônico e levadas por um tubo até um analisador de gás por infra-vermelho (LICOR – LI-6262), que mede as concentrações de água ( $q$ ) e  $\text{CO}_2$  ( $c$ ). Uma descrição detalhada da instrumentação e do sistema de coleta de dados é encontrada em Moncrieff *et al.* (1997).

O método de decomposição dos sinais utiliza a projeção em ondeletas de Haar, que é detalhado em Howell e Mahrt (1994). O conjunto de dados selecionado constitui-se de duas séries de aproximadamente 7 horas de dados, cada uma compreendendo 262144 ( $=2^{18}$ ) registros, medidos nos dias 19/04 e 20/04 de 1999, entre 9:00 e 16:00 hs, horário local. As componentes  $w$ ,  $T$ ,  $q$  e  $c$  são projetadas, separadamente, em 15 escalas. A tabela 1 mostra o número de pontos e as escalas em que são projetados os sinais. As escalas espaciais são obtidas (aproximadas) utilizando-se a hipótese de Taylor para converter os valores de tempo em espaço.

| Escala | Número de pontos projetados ... | ... que representam movimentos na escala de tempo de ... | ... ou na escala espacial da ordem de ... |
|--------|---------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1      | 131072                          | 0.2 s                                                    | 0.4 m                                     |
| 2      | 65536                           | 0.4 s                                                    | 0.8 m                                     |
| 3      | 32768                           | 0.8 s                                                    | 1.6 m                                     |
| 4      | 16384                           | 1.5 s                                                    | 3.2 m                                     |
| 5      | 8192                            | 3.1 s                                                    | 6.5 m                                     |
| 6      | 4096                            | 6.1 s                                                    | 13 m                                      |
| 7      | 2048                            | 12.3 s                                                   | 26 m                                      |
| 8      | 1024                            | 24.6 s                                                   | 52 m                                      |
| 9      | 512                             | 49.2 s                                                   | 103 m                                     |
| 10     | 256                             | 1.6 min                                                  | 206 m                                     |
| 11     | 128                             | 3.3 min                                                  | 412 m                                     |
| 12     | 64                              | 6.5 min                                                  | 825 m                                     |
| 13     | 32                              | 13.1 min                                                 | 1650 m                                    |
| 14     | 16                              | 26.2 min                                                 | 3300 m                                    |
| 15     | 8                               | 52.4 min                                                 | 6600 m                                    |

**Tabela 1.** Escalas em que são projetados os sinais turbulentos (frequência de amostragem de 10.4 Hz) pela transformada em ondeletas de Haar.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

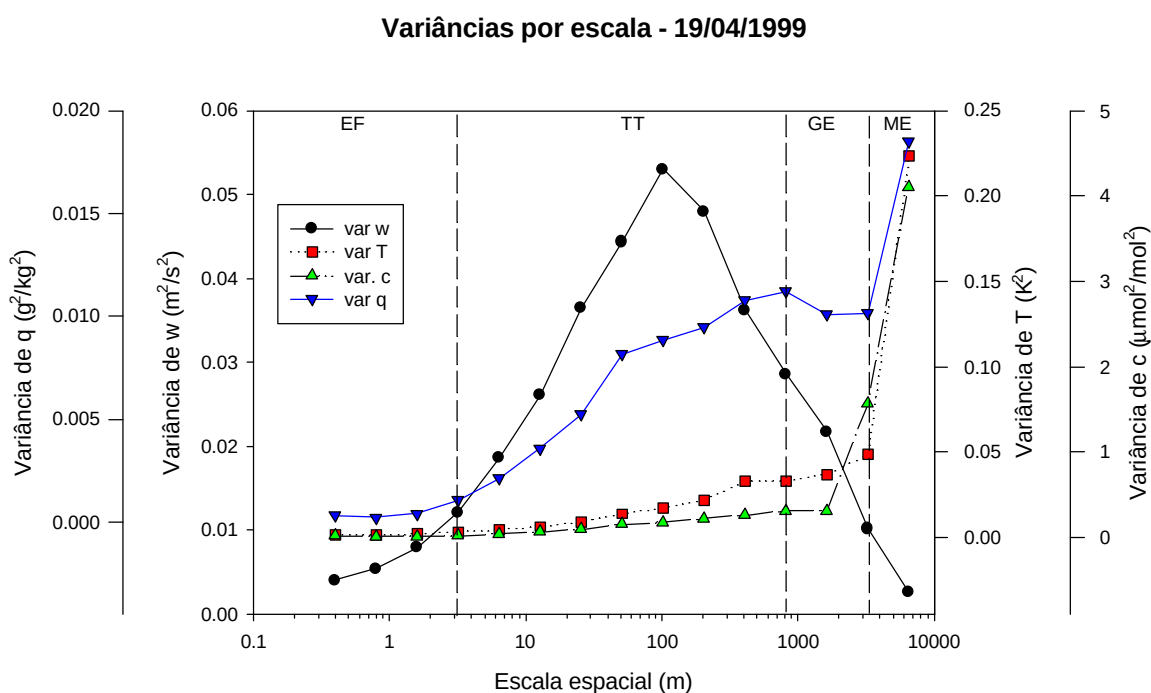
A projeção em ondeletas permite o cálculo das contribuições relativas de cada escala à variância total de um sinal (ou à covariância de dois sinais). A figura 1 mostra as variâncias de cada sinal, em cada escala, para o dia 19/04. As linhas tracejadas verticais indicam as escalas que dividem os 4 modos de variação:

- *Escala fina (EF)* – movimentos em escalas pequenas, com estruturas possivelmente isotrópicas;

- *Transporte turbulento (TT)* – envolvendo os vórtices que contribuem para a maior parte do transporte turbulento de massa e energia;
- *Grandes eddies (GE)* – movimentos de vórtices de escalas da ordem da altura da camada limite;
- *Mesoescala (ME)* – movimentos em escalas horizontais maiores que a altura da camada limite, não caracterizados como movimentos representativos de turbulência.

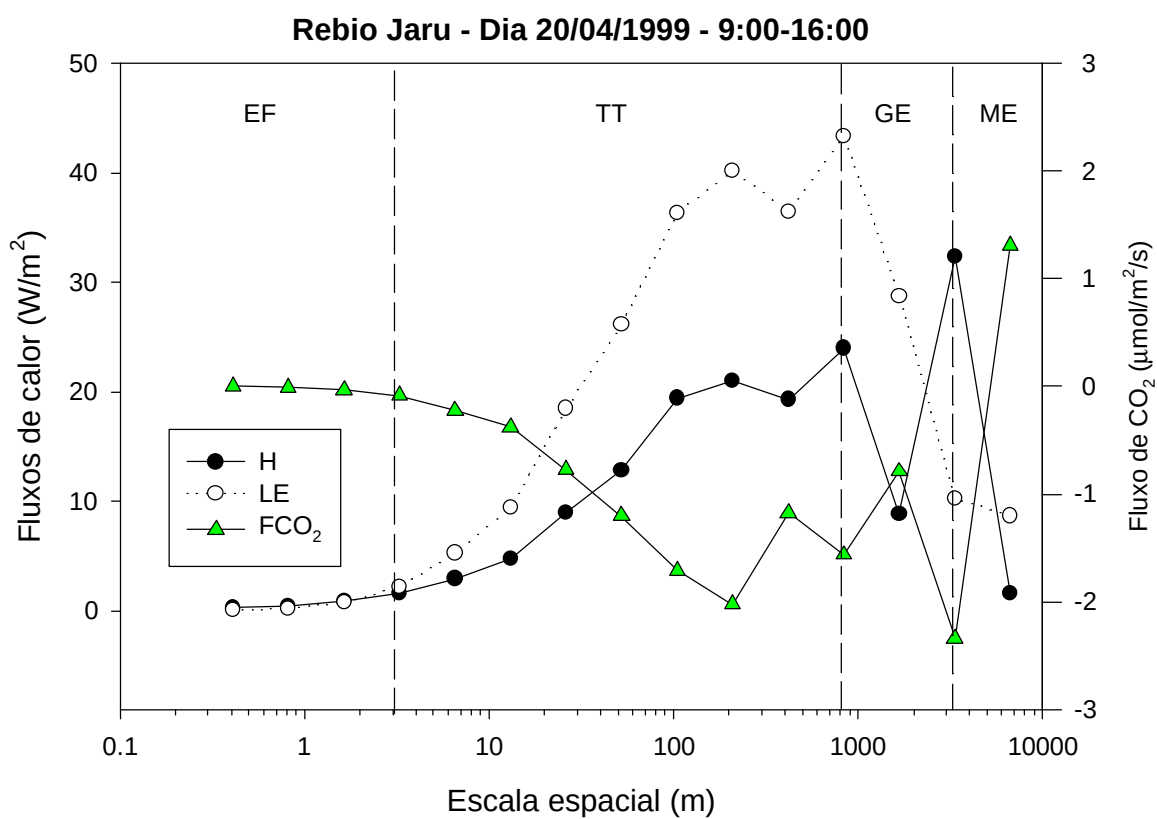
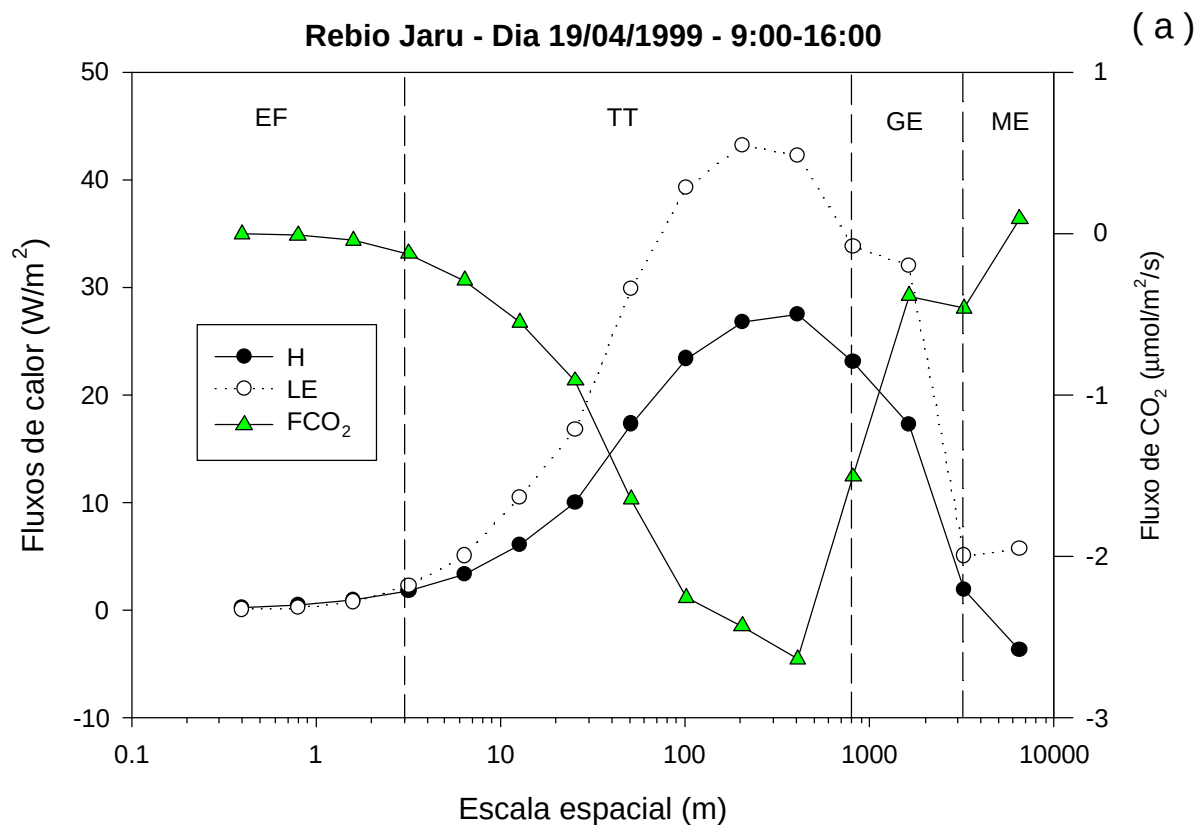
Devido à correlação entre os sinais de umidade ( $q$ ) e temperatura ( $T$ ) do ar aumentar abruptamente até a escala de 3 m (figura 3), esta escala, que corresponde à escala de tempo de aproximadamente 1.5 segundos, foi escolhida como a escala que divide os modos de escala fina e de transporte. Howell e Mahrt (1994) utilizaram um critério baseado na diferença de fase local entre as componentes de vento horizontal e vertical para separar estes dois modos, permitindo, assim, que o limite que divide os dois modos seja variável, dependendo da posição do registro. Neste estudo, escolheu-se este limite de 3 m fixo, por simplicidade. Nas escalas acima de 800 m, os fluxos diminuem (figura 2), e a correlação entre  $q$  e  $T$  também (figura 3), por causa desses fatores, a escala de 800 m, que corresponde à escala de tempo de aproximadamente 6.5 minutos, foi escolhida como a escala que divide os modos de transporte e de grandes eddies. Devido às variâncias de  $q$ ,  $T$  e  $c$  aumentarem abruptamente com a escala a partir de escalas superiores a 3 km, este limite é escolhido para separar os modos de grandes eddies e de mesoescala. A escala de 3 km corresponde aproximadamente à escala de 25 minutos.

Grande parte da variância de  $w$  apresenta-se em escalas de transporte turbulento, o que explica o fato da maior parte das trocas de massa e energia na vertical ocorrer nestas escalas. Apresenta um máximo na escala próxima a 100 m, resultado semelhante ao obtido por Howell e Mahrt (1994). As variâncias de  $T$ ,  $q$  e  $c$  apresentam as maiores variações na mesoescala. É importante salientar que o número de pontos utilizados nos cálculos referentes às escalas maiores (grandes eddies e mesoescalas) é relativamente pequeno. Então, é preciso cuidado ao interpretar os resultados referentes a estas escalas maiores.



**Figura 1.** Variâncias em função da escala espacial de movimento da: componente vertical do vento ( $w$ ); temperatura do ar ( $T$ ); umidade específica do ar ( $q$ ); e concentração de  $\text{CO}_2$  do ar ( $c$ ); para o dia 19/04, no período das 9:00 às 16:00 hs. As regiões entre as linhas verticais tracejadas são denominadas EF (Escala Fina), TT (Transporte turbulento), GE (Grandes eddies) e ME (Mesoescala), e correspondem aos quatro modos de variação.

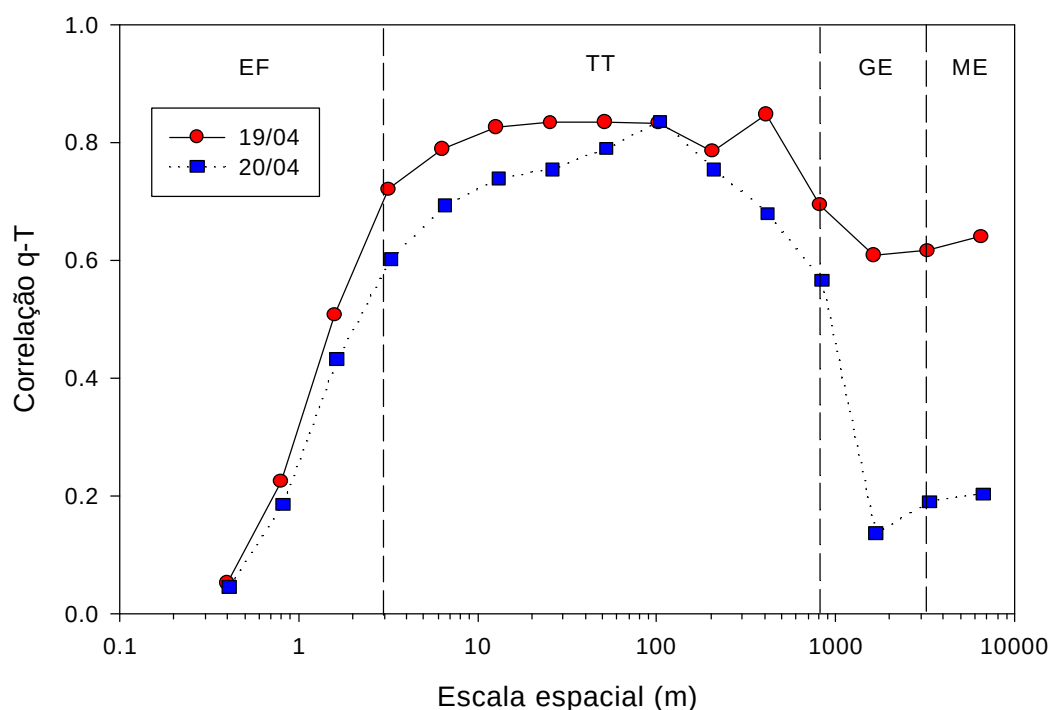
A figura 2 mostra os fluxos de calor e  $\text{CO}_2$  em função das escalas de movimento, para os dois dias estudados. Nas menores escalas, correspondentes a movimentos aproximadamente isotrópicos, os fluxos são muito pequenos. A partir da escala de 3 m, os transportes começam a aumentar significativamente, caracterizando bem a região de transportes turbulentos. Esse comportamento é bastante parecido nos dois dias. Porém a transição para os modos de grandes eddies e de mesoescala mostra-se mais complexa no dia 20/04.



**Figura 2.** Fluxos de calor sensível, calor latente e  $\text{CO}_2$ , em função da escala espacial de movimento, para o período das 9:00 às 16:00, dos dias: (a) 19/04 e (b) 20/04.

No dia 19/04, os fluxos de calor sensível e  $\text{CO}_2$  atingem um máximo próximo a 400 m e o de calor latente, um máximo próximo a 200 m, caindo, a partir destes máximos com o aumento da escala, na região de grandes eddies. Na mesoescala, o fluxo de calor sensível ( $\text{CO}_2$ ) apresenta valor negativo (positivo). No dia 20/04 o comportamento nas regiões de grandes eddies e mesoescala é bastante variável. Os fluxos de calor sensível mostram um pico positivo na escala de 3 km, e um pico negativo correspondente é observado nesta mesma escala para o fluxo de  $\text{CO}_2$ . Os fluxos de calor latente não mostram esse pico. Essa diferença de comportamento entre os fluxos de calor sensível e latente pode indicar um efeito de entranhamento de ar seco no topo da camada limite que atinge a superfície (Mahrt, 1991). Essa diferença entre os sinais de temperatura e umidade também é observada quando é apresentada a correlação entre estes sinais em função da escala, na figura 3. Pode-se observar que a correlação entre  $q$  e  $T$  diminui bruscamente nas escalas de grandes eddies, no dia 20/04, nas quais a similaridade Monin-Obukhov não é mais válida (De Bruin *et al.*, 1999), provavelmente devido à influência dos processos físicos que ocorrem na região de entranhamento.

As contribuições relativas de cada modo de variação para as variâncias e os fluxos totais, para os dois dias analisados, são apresentadas nas tabelas 2 e 3.



**Figura 3.** Idem à figura 2, porém para a correlação entre a umidade específica ( $q$ ) e a temperatura ( $T$ ) do ar em função da escala de movimento.

| Modo         | EF    | TT     | GE    | ME    | Total  |
|--------------|-------|--------|-------|-------|--------|
| H            | 2.42  | 126.62 | 29.70 | -2.79 | 155.94 |
| LE           | 2.15  | 204.88 | 51.42 | 8.23  | 266.68 |
| $\beta=H/LE$ | 1.13  | 0.62   | 0.58  | -0.34 | 0.58   |
| FCO2         | -0.12 | -11.55 | -1.37 | -0.14 | -13.19 |
| Var(w)       | 0.02  | 0.28   | 0.04  | 0.01  | 0.36   |
| Var(T)       | 0.01  | 0.12   | 0.08  | 0.25  | 0.46   |
| Var(q)       | 0.001 | 0.05   | 0.02  | 0.02  | 0.10   |
| Var(c)       | 0.05  | 1.18   | 1.25  | 4.89  | 7.38   |

**Tabela 2.** Contribuição relativa de cada modo de variação à variância e ao fluxo total, para o dia 19/04.

Tanto para o dia 19/04 (tabela 2), quanto para o dia 20/04 (tabela 3), a maior parte dos fluxos concentra-se na região de transporte turbulento. Os grandes eddies também contribuem significativamente em ambos os casos. Os fluxos de mesoescala, são baixos, comparados ao total (menos de 3 %), para o dia 19, porém contribuem consideravelmente para os valores totais no dia 20 (11 % para o calor sensível e 5 % para o calor latente). O fluxo de CO<sub>2</sub> positivo, como mostrado na figura 2, nas mesoescalas, é bastante significativo, apesar de o valor na tabela não apresentar uma contribuição alta (o valor apresentado na tabela é influenciado pelo pico negativo que ocorre na escala imediatamente anterior). Este pode ser um fator de suma importância na estimativa da assimilação líquida de carbono pela floresta (diferença entre a quantidade de carbono absorvida pela fotossíntese e liberada pela respiração do solo e da vegetação).

| Modo             | EF    | TT     | GE    | ME    | Total  |
|------------------|-------|--------|-------|-------|--------|
| H                | 2.41  | 101.97 | 36.98 | 17.78 | 159.14 |
| LE               | 2.09  | 195.17 | 55.53 | 13.79 | 266.59 |
| $\beta=H/LE$     | 1.15  | 0.52   | 0.67  | 1.29  | 0.60   |
| FCO <sub>2</sub> | -0.09 | -8.31  | -2.74 | 0.14  | -11.00 |
| Var(w)           | 0.02  | 0.24   | 0.04  | 0.01  | 0.31   |
| Var(T)           | 0.01  | 0.11   | 0.13  | 0.18  | 0.43   |
| Var(q)           | 0.002 | 0.07   | 0.02  | 0.01  | 0.10   |
| Var(c)           | 0.05  | 1.26   | 2.07  | 8.37  | 11.76  |

**Tabela 3.** Idem à tabela 2, porém para o dia 20/04.

## CONCLUSÕES

Medidas de alta frequência (10.4 Hz) da velocidade vertical do vento (w), temperatura (T), umidade específica (q) e concentração de CO<sub>2</sub> (c) do ar, realizadas sobre uma área de floresta não perturbada no sítio da Rebio Jaru, em Ji-Paraná, Rondônia, durante os períodos diurnos (9:00 às 16:00 hs) dos dias 19 e 20/04/1999, foram projetadas em 15 escalas de movimento, utilizando a transformada em ondeletas de Haar. Particionando-se os sinais desta maneira, foram analisadas as contribuições relativas de diferentes modos de variação, com características físicas específicas, às variâncias e covariâncias (ou fluxos) totais.

Os sinais turbulentos foram divididos em 4 modos de variação:

- *Escala fina (EF)* – movimentos em escalas pequenas, compreendendo escalas até 3 m, ou escala temporal de 1.5 segundos;
- *Transporte turbulento (TT)* – envolvendo os vórtices turbulentos propriamente ditos, com escalas de 3 a 800 m, ou 1.5 segundos a 6.5 minutos;
- *Grandes eddies (GE)* – movimentos em escalas da ordem da altura da camada limite, de 800 m a 3 km (6.5 a 25 min);
- *Mesoescala (ME)* – movimentos em escalas horizontais de mesoescala, acima de 3 km, ou escala temporal acima de 25 minutos.

As variâncias de w apresentaram os maiores valores na região de transporte turbulento, com um máximo em uma escala próxima a 100 m, o que pode explicar as maiores trocas turbulentas neste modo. As variâncias de T, q e c mostraram os maiores valores na mesoescala.

Os fluxos de calor sensível, calor latente e CO<sub>2</sub>, mostram comportamentos semelhantes em função da escala de movimento para o dia 19/04, aumentando (valores absolutos) até atingir um máximo nas escalas de transporte e depois diminuindo para valores quase nulos nas regiões de escalas maiores. Para o dia 20/04, porém, os fluxos de calor sensível e CO<sub>2</sub> apresentaram um máximo relativo em escalas próximas a 3 km (ou escala temporal de 25 min), enquanto que o calor latente não apresenta este máximo. Os fluxos de CO<sub>2</sub> ainda apresentam um valor positivo relativamente alto na escala de 6 km (escala de tempo próxima de 50 min).

A diferença de comportamento entre os fluxos de calor sensível e latente nas escalas de grandes eddies e mesoescala é bastante notável quando é examinado o coeficiente de correlação entre q e T. Os valores de correlação entre q e T diminuem drasticamente nas escalas de grandes eddies, o que pode indicar algum efeito de entranhamento de ar seco das camadas superiores na camada limite atmosférica, e que pode atingir a superfície através dos movimentos de grandes vórtices (Mahrt, 1991).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFFRE, C., LOPEZ, A., CARRARA, A., DRUILHET, A., FONTAN, J. The analysis of energy and ozone flux data from the LANDES 94 experiment. **Atmos. Environ.**, v. 34, p. 803-821, 2000
- DE BRUIN, H.A.R., VAN DEN HURK, B.J.J.M., KROON, L.J.M. On the temperature-humidity correlation and similarity. **Bound.-Layer Meteor.**, v. 93, p. 453-468, 1999.
- HOWELL, J.F. AND MAHRT, L. An adaptative decomposition: application to turbulence. in **Wavelets in Geophysics**. eds. Efi Foufoula-Georgiou and Praveen Kumar, Academic Press, Inc., p. 107-128, 1994.
- MAHRT, L. Boundary-layer moisture regimes. **Quart. J. Roy. Meteor. Soc.**, v.117, p. 151-176, 1991.
- MAHRT, L. Flux sampling errors for aircraft and tower data. **J. Atmos. Ocean. Tec.**, v. 15, p. 416-429, 1998.
- MONCRIEFF, J.B., MASSHEDER, J.M., DE BRUIN, H.A.R., ELBERS, J., FRIBORG, T., HEUSINKVELD, B., KABAT, P., SCOTT, S., SOEGAARD, H., VERHOEF, A. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. **J. Hydrol.**, v. 188-189, p. 589-611, 1997.
- SUN, J., HOWELL, J.F., ESBENSEN, S.K., MAHRT, L., GREB, C.M., GROSSMAN, R., LEMONE, M.A. Scale dependence of air-sea fluxes over the Western Equatorial Pacific. **J. Atmos. Sci.**, v. 53, n. 21, p. 2997-3012, 1996.
- VICKERS, D. AND MAHRT, L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. **J. Atmos. Ocean. Tec.**, v. 14, p. 512-526, 1997.