



VARIABILIDADE TEMPORAL DOS FLUXOS NOTURNOS DETERMINADOS A PARTIR DE DUAS DIFERENTES METODOLOGIAS NO NÍVEL DE 325 M ACIMA DA FLORESTA AMAZÔNICA

Diego Jatobá dos Santos¹, Celso von Randow², Pablo E.S. Oliveira³

^{1,2}Centro de Ciência do Sistema Terrestre, CCST-INPE

³Departamento de Física, UFSM

Resumo

O presente estudo teve como objetivo analisar e comparar a variabilidade temporal dos fluxos noturnos de CO₂, calor sensível e calor latente, calculados a partir de duas diferentes metodologias: uma com janela temporal de 5 minutos (através da técnica de covariância de vórtices), e outra com 109 minutos (a partir da decomposição em multirresolução). Para tanto, foram utilizadas séries noturnas de 25 noites no período entre outubro e novembro de 2015. As análises foram feitas para dois grupos de padrões distintos de turbulência: um de regime intermitente e outro de turbulência homogênea. Os resultados evidenciaram que os fluxos obtidos pelo método clássico de covariância dos vórtices se mostraram dependentes da intensidade da turbulência. Por outro lado, os fluxos calculados a partir da técnica de decomposição em multirresolução apresentaram flutuações significativas na evolução temporal de todos os escalares analisados. As maiores diferenças percentuais entre as duas abordagens ocorreram no grupo de regime de turbulência homogênea, o qual teve como característica preponderante uma fraca atividade turbulenta ao longo das noites. Na comparação realizada, a metodologia empregada na janela de 109 minutos apresentou uma maior eficiência nas estimativas das trocas a 325 m na torre ATTO, principalmente durante condições de baixa atividade turbulenta.

Palavras-chave: fluxos noturnos; covariância dos vórtices; multirresolução

Abstract

The present study aimed to analyze and compare the temporal variability of the nocturnal fluxes of CO₂, sensitive and latent heat, calculated from two different methodologies: one with a 5-minute temporal window (using the eddy covariance technique), and another with 109 minutes (from multiresolution decomposition). For this, night series of 25 nights were used between October and November 2015. The analyzes were made for two groups of distinct turbulence patterns: one with intermittent regime and the other with homogeneous turbulence. The results showed that the fluxes obtained by the classical method of eddy covariance were dependent on the intensity of the turbulence. On the other hand, the fluxes calculated from the multiresolution decomposition technique showed significant fluctuations in the temporal evolution of all scalars analyzed, with the largest percentage differences between the two approaches occurring in the homogeneous turbulence regime group, which was characterized by predominantly weak turbulent activity throughout the night. In the comparison made, the methodology employed in the 109-minute window showed greater efficiency in the estimates of exchanges at 325 m in the ATTO tower, especially during conditions of low turbulent activity.

Keywords: nocturnal fluxes; eddy covariance; multiresolution

1 Introdução

A floresta Amazônica interage com a atmosfera através das trocas turbulentas de energia e de diversas substâncias que influenciam o clima regional e global. Entretanto, algumas questões importantes, como por exemplo, quais os fatores que influenciam as trocas turbulentas e os aspectos da complexidade do escoamento de ar acima da floresta, ainda carecem de estudos para serem totalmente compreendidas.

Nos trabalhos realizados com o objetivo de se obter a melhor maneira de se calcular os fluxos verticais turbulentos, uma atenção especial é dada aos processos físicos que ocorrem durante o período noturno, especialmente porque a intensidade da turbulência diminui

consideravelmente e se restringe a escalas temporais e espaciais muito pequenas. Em condições de forte estabilidade atmosférica e inibição da turbulência, os processos turbulentos podem ficar restritos a escalas de poucos segundos apenas (ACEVEDO et al., 2007), e processos não turbulentos, ocorrendo em escalas maiores, podem desempenhar um papel relevante no desenvolvimento e estrutura da Camada Limite Noturna (CLN). Estes processos não turbulentos ocorrem em escalas espaciais da ordem de centenas de metros a 1 ou 2 quilômetros, e, em escalas temporais maiores que alguns minutos, mas ainda assim menores do que os processos tradicionalmente chamados de 'mesoescala', e tem sido referenciados na literatura como processos de 'submeso' escala (MAHRT, 2009; ACEVEDO et al., 2014).

De modo geral, diversos pesquisadores afirmam que a presença desses fenômenos na CLN pode contribuir de forma significativa na variabilidade espacial e temporal dos escalares noturnos, de modo que as estimativas das trocas entre a superfície e atmosfera se tornam dependentes desses eventos (ACEVEDO et al., 2006; ZERI; SÁ, 2011; OLIVEIRA et al., 2018). Entretanto, há, ainda, a necessidade de novos estudos para um entendimento mais apurado das implicações que esses processos desempenham no comportamento das grandezas escalares ao longo da CLN, e com isso tornar possível o desenvolvimento de novas metodologias capazes de prover melhores estimativas nos cálculos dos fluxos de massa e energia principalmente para os ecossistemas florestais, devido a sua enorme relevância no contexto das mudanças do clima.

Diante do exposto, o presente estudo objetivou analisar e comparar a variabilidade temporal dos fluxos noturnos de calor sensível, calor latente e CO_2 , no nível de 325 m na torre ATTO, calculados através de duas janelas temporais diferentes, 5 e 109 minutos, através da técnica de covariância dos vórtices e de decomposição em multirresolução, respectivamente. As análises foram feitas para noites classificadas em dois grupos distintos de regime de turbulência: um de turbulência intermitente e outro de turbulência homogênea. Os dados foram medidos em alta frequência entre outubro e novembro em uma área de floresta Tropical na Amazônia central.

2 Material e Métodos

2.1 Área de estudo

O sítio experimental está localizado na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Uatumã ($2^{\circ}08'45.13''$ S, $59^{\circ}00'20.12''$ O) na Amazônia central, onde está instalada uma torre de monitoramento meteorológico – torre ATTO (*Amazon Tall Tower Observatory*) desde agosto de 2015. A torre possui uma altura de 325 m, e foi construída através de uma cooperação científica entre o Brasil e a Alemanha.

A elevação da área de estudo é de 130 m acima do nível do mar, estando aproximadamente 150 km a nordeste de Manaus e a 12 km do rio Uatumã. A região é caracterizada por uma estação chuvosa mais intensa entre fevereiro a maio e uma estação mais seca de junho a outubro, possuindo florestas densas não alagadas nas áreas mais altas, enquanto que florestas de Igapó dominam ao longo do canal principal do rio Uatumã e seus afluentes (ANDREAE et al., 2015).

2.2 Instrumentos e dados

As análises desta pesquisa foram realizadas usando um conjunto de dados coletados na transição do período seco para chuvoso durante a campanha científica ATTO-IOP1 (*Intensive Operating Period*). Medidas de alta frequência das componentes do vento nas três dimensões (u , v e w), temperatura virtual e concentrações escalares de CO_2 e vapor d'água foram realizadas através de um sistema composto por um anemômetro sônico tridimensional (CSAT3, Campbell Scientific Inc.) e um analisador de gás de caminho aberto (EC150, Campbell Scientific Inc.) a uma taxa de amostragem de 20 Hz, instalados na torre ATTO no nível de 325 m de altura.

O conjunto dos dados de alta frequência foi submetido a um controle de qualidade, causando a remoção de algumas séries nas quais havia falhas ou múltiplos picos. No total, foram analisadas séries temporais de 25 noites coletadas de 08 de outubro a 14 de novembro de 2015. Para evitar amostragens de eventos associados com as características de transição entre a Camada Limite Diurna e a Camada Limite Noturna, o período noturno entre o pôr do Sol e 20h não foi utilizado. Por essa razão, no presente estudo o período noturno considerado ficou restrito ao intervalo das 20 às 05h (Hora local).

2.3 Fator de intermitência

Para a caracterização dos regimes de turbulência no nível analisado foi utilizado o método proposto por Howell e Sun (1999), denominado Fator de Intermitência (FI). O método consiste em determinar os fluxos totais de cada noite em intervalos regulares, tipicamente de 5 minutos, para todo o período noturno considerado. A seguir, a série deve ser ordenada do valor maior para o menor. O FI se refere à fração do tempo em que se corresponde o ponto de 50% do somatório do fluxo total de uma dada noite. Deste modo, em casos em que a turbulência é mais homogênea ao longo da noite, o fluxo tende a ser igualmente distribuído sobre o período noturno, e desta forma os valores de FI se aproximam de 0,5. Por outro lado, nas noites com turbulência intermitente, eventos de fluxo intenso tendem a ocorrer durante períodos de curta duração e de forte turbulência, fazendo com que os valores de FI se aproximem de zero nas noites sob essas condições (COULTER; DORAN, 2002; ACEVEDO et al., 2006).

A partir dessa abordagem, no presente estudo, 11 noites foram classificadas como sendo de regime intermitente, e 14 como de turbulência homogênea.

2.4 Covariância dos vórtices

A covariância dos vórtices é uma técnica micrometeorológica usada para estimar os fluxos de momento, energia e massa entre a superfície e a atmosfera. O método proporciona a determinação direta dos fluxos, através da covariância entre os desvios temporais de alta frequência da velocidade vertical do vento com os desvios temporais das variáveis: velocidade dos ventos horizontais (fluxo de momento), concentração de vapor de água (fluxo de calor latente), temperatura do ar (fluxo de calor sensível) e concentração de dióxido de carbono (fluxo de CO₂). Deste modo, o fluxo turbulento de uma grandeza Q qualquer pode ser escrito como:

$$F = \overline{\rho_a w' Q'} \quad (1)$$

na qual, $Q = \rho_w / \rho_a$ é a razão de mistura da grandeza Q, ρ_w é a sua densidade, ρ_a é a densidade do ar seco, e w é a componente vertical da velocidade do vento.

Para o cálculo dos fluxos através do método clássico de covariância dos vórtices, nesta pesquisa foi utilizada uma janela temporal de 5 minutos, a fim de se obter uma melhor amostragem dos transportes turbulentos.

2.5 Decomposição em multirresolução

Os procedimentos da decomposição em multirresolução apresentados nesta pesquisa (Howell e Mahrt, 1997, Vickers e Mahrt, 2003, Voronovich e Kiely, 2007) podem ser interpretados em termos de médias móveis não ponderadas, na qual espectros e coespectros integrados até uma escala de tempo τ são equivalentes à variância e covariância de uma série temporal de tamanho τ . Desse modo, a multirresolução integrada até a essa escala, captura os processos físicos cuja duração seja igual ou menor a essa escala temporal.

Os coespectros obtidos através da decomposição em multirresolução foram determinados utilizando séries de dados com tamanho de 109 minutos, que corresponderam a grupos de 2¹⁷ pontos de dados. A técnica foi aplicada sequencialmente às séries temporais noturnas iniciando-se às 20h, com deslocamento de 30 minutos entre as séries subsequentes, totalizando 14 decomposições por noite.

Como a decomposição em multirresolução satisfaz as propriedades das médias de Reynolds, a integração do coespectro (S) até uma escala de tempo τ é igual à covariância da série original com comprimento τ . Assim, para o coespectro de uma série com 2^p pontos de dados de uma grandeza ϕ , com $p \geq M$, tem-se que:

$$\sum_{n=1}^M (S_{w\phi})_n = \langle w' \phi' \rangle_{\tau} \quad (2)$$

na qual, $\tau = \frac{2^M}{f}$; sendo f a frequência de amostragem.

Desse modo, os fluxos noturnos obtidos com janelas de 109 minutos foram calculados a partir da integração de seus respectivos coespectros médios até a referida escala temporal.

3 Resultados e Discussões

3.1 Variabilidade temporal dos fluxos de 5 e 109 minutos

A comparação dos fluxos determinados com janelas de tempo de 5 e 109 minutos é mostrada para todas as noites para os dois regimes analisados, fornecendo informações relevantes a respeito dos processos de trocas acima da floresta. Na Figura 1 (conjunto de noites intermitentes) nota-se nos fluxos de CO₂ (Figura 1b), calor sensível (Figura 1c) e calor latente (Figura 1d), calculados com janelas de 5 minutos, flutuações muito próximas a zero na maior parte do período noturno para a maioria das noites analisadas (representadas pelos seus respectivos Dia Juliano). Essa baixa variabilidade temporal é mais evidente nos fluxos de CO₂. No entanto, se observa na evolução temporal desses fluxos alguns picos esporádicos de magnitudes relevantes no comportamento dessas séries. Esses picos estão associados aos eventos intermitentes de turbulência, presentes nas séries noturnas dessas noites, e isso é verificado nos fluxos (de 5 minutos) de todos os escalares, com destaque ao CO₂ (Figura 1b).

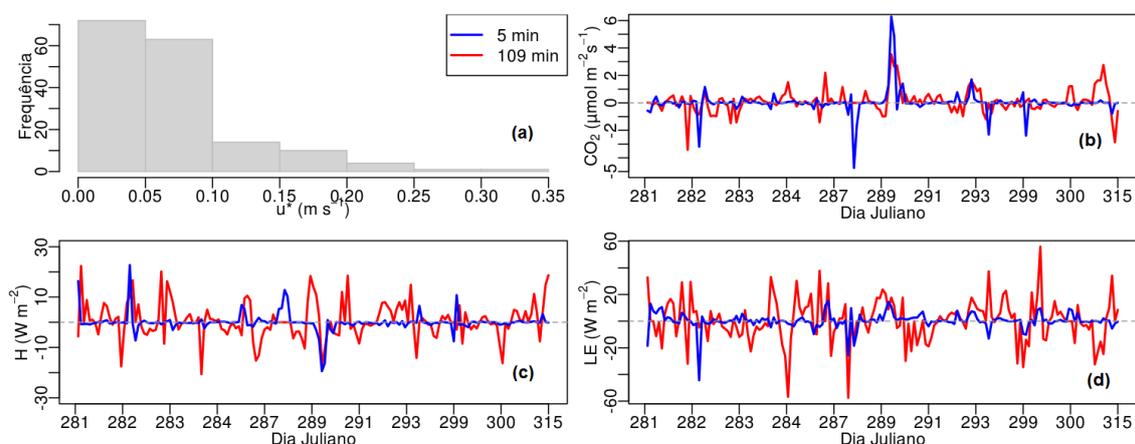


Figura 1 – Distribuição de frequência da velocidade de fricção do ar (u^*) (a), fluxos noturnos de CO₂ (b), calor sensível (c) e calor latente (d) usando janelas de tempo de 5 e 109 minutos, de acordo com as escalas de cores, para cada noite do conjunto intermitente.

Na Figura 1, destaca-se também as maiores magnitudes na variabilidade dos fluxos de 109 minutos em relação às de 5 minutos na maioria das noites apresentadas. Desse modo, se por um lado os fluxos obtidos pelo método clássico de covariância dos vórtices (5 minutos) se mostraram dependentes da intensidade da turbulência, os fluxos calculados com janelas de 109 minutos, através da integração de seus respectivos coespectros médios, apresentaram flutuações significativas para todos os escalares, principalmente para os fluxos de calor latente (Figura 1d). No entanto, quando se compara as diferenças percentuais entre os fluxos médios obtidos pelas duas diferentes janelas, e tendo como referência a janela de 109 minutos, nota-se valores mais expressivos para os fluxos de calor sensível (97,05 %) e CO₂ (80%), conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Valores médios dos fluxos noturnos, da velocidade de fricção e do desvio padrão da velocidade vertical do vento, usando janelas de tempo de 5 e 109 minutos para o grupo de noites intermitentes.

Regime intermitente					
Janela temporal	CO ₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	H (W m^{-2})	LE (W m^{-2})	u^* (m s^{-1})	σ_w (m s^{-1})
109 (min)	0,10	0,68	0,65	-	-
5 (min)	0,02	0,02	0,29	0,07	0,08
Diferença (%)	80	97,05	55,38	-	-

Uma análise similar é mostrada na Figura 2 para o conjunto de noites do regime homogêneo de fraca turbulência (conforme os valores de u^* apresentados). Para esse conjunto, as diferenças percentuais entre os fluxos calculados com as duas janelas de tempo são ainda maiores. Nas flutuações dos fluxos de 5 minutos há uma tendência à zero ainda mais acentuada, com algumas noites apresentando valores praticamente constantes para todo o período noturno. Isso é observado principalmente nas séries dos fluxos de CO_2 (Figura 2b) e de calor sensível (Figura 2c), para os Dias Juliano 295 a 296 e entre 306 e 317. Isso pode estar associado não somente a uma possível limitação da técnica de covariância dos vórtices acerca de seu desempenho em capturar as trocas de escalares sob uma condição de forte estabilidade noturna, como mostra os baixos valores médios de u^* (0,05) e σ_w (0,05) obtidos para esse regime (Tabela 2), mas também devido a uma possível amostragem de propriedades inerentes à Camada Limite Residual, uma vez que devido à altura elevada em que as medições foram realizadas (325 m), adicionada às condições de forte estabilidade atmosférica, as quantidades amostradas, nesse caso, podem não ser propriamente representativas dos fluxos intrínsecos à CLN conceitual.

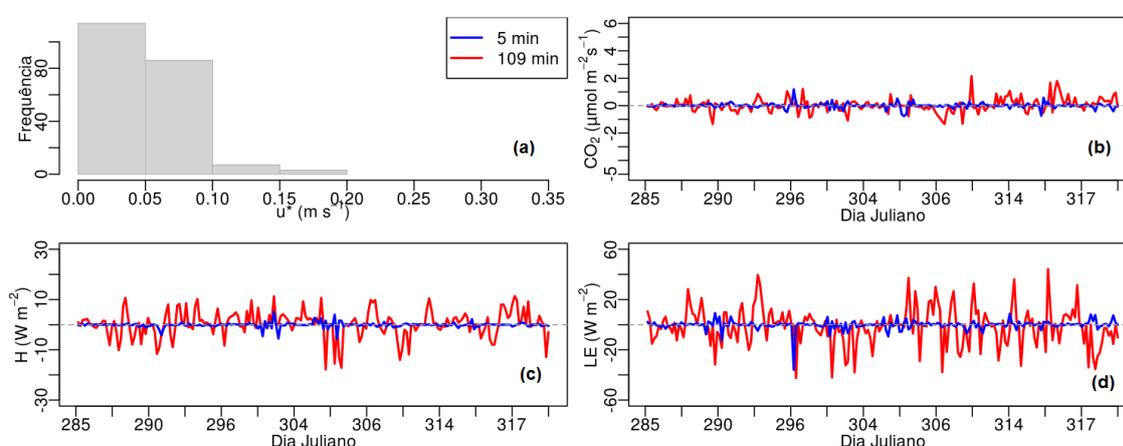


Figura 2 – O mesmo que na Figura 1, mas para o conjunto de noites com turbulência homogênea.

Para o grupo homogêneo, as diferenças percentuais entre os fluxos médios das duas janelas temporais são mais expressivas (Tabela 2), onde os fluxos médios com janelas de 5 minutos apresentaram uma tendência a decrescer em magnitude, apresentando uma inversão no sinal em comparação ao resultado encontrado pela janela de 109 minutos. Novamente as diferenças percentuais entre as duas janelas foram maiores para os fluxos de calor sensível e CO_2 (138,70% e 100,17%, respectivamente), com o calor latente apresentando uma menor diferença (-84,14%) (Tabela 2), ainda que as médias dos fluxos totais das duas janelas temporais tenham sido muito próximas de zero.

Tabela 2 – O mesmo que na Tabela 1, mas para o conjunto de noites do regime homogêneo.

Regime homogêneo					
Janela temporal	CO_2 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	H (W m^{-2})	LE (W m^{-2})	u^* (m s^{-1})	σ_w (m s^{-1})
109 (min)	0,03	0,31	-1,45	-	-
5 (min)	$(-0,52 \times 10^{-4})$	-0,12	-0,23	0,05	0,05
Diferença (%)	100,17	138,70	-84,14	-	-

Os resultados a partir das noites caracterizadas como de turbulência fraca (regime homogêneo) evidencia que as trocas noturnas dos escalares nesse sítio, são dominadas por processos não turbulentos. Para esse grupo, as estimativas dos fluxos médios apresentaram

valores menores quando comparadas ao regime intermitente, apresentando até mesmo uma inversão no sinal dos fluxos médios de 5 minutos quando se compara essa mesma janela com a do regime intermitente.

4 Conclusão

A contribuição dos transportes não turbulentos se mostrou ter um desempenho relevante nas trocas noturnas a 325 m de altura neste sítio, principalmente nas situações em que há uma condição de fraca turbulência. Isso é evidenciado na evolução temporal dos fluxos calculados com a janela de tempo de 109 minutos, principalmente para o conjunto de noites com pouca ou nenhuma turbulência (regime homogêneo). Nesse sentido, a metodologia utilizada na janela temporal de 109 minutos apresentou uma maior eficiência nas estimativas das trocas dos escalares a 325 m durante o período analisado. Isso pode ser explicado pelo fato dos espectros e coespectros, obtidos através da decomposição em multirresolução e utilizados para o cálculo dos fluxos de 109 minutos, representarem tanto os sinais turbulentos quanto não turbulentos, implicando, assim, em uma melhor amostragem dos processos de troca no nível analisado.

Referências Bibliográficas

- ACEVEDO, O. C. et al. Intermittency and the exchange of scalars in the nocturnal surface layer. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 119, p. 41–55, 2006.
- ACEVEDO, O. C. et al. Turbulent carbon exchange in very stable conditions. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 125, p. 49–61, 2007.
- ACEVEDO, O. C. et al. The influence of submeso processes on stable boundary layer similarity relationships. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 71, n. 1, p. 207–225, 2014.
- ANDREAE, M. O. et al. The amazon tall tower observatory (atto): overview of pilot measurements on ecosystem ecology, meteorology, trace gases, and aerosols.
- COULTER, R. L.; DORAN, J. C. Spatial and temporal occurrences of intermittent turbulence during CASES-99. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 105, p. 329–349, 2002.
- HOWELL, J. F.; MAHRT, L. Multiresolution flux decomposition. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 83, n. 1, p. 117–137, 1997.
- HOWELL, J. F.; SUN, J. Surface-layer fluxes in stable conditions. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 90, p. 495–520, 1999.
- MAHRT, L. Characteristics of submeso winds in the stable boundary layer. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 130, n. 1, p. 1–14, 2009.
- OLIVEIRA, P. E. S. et al. Turbulent and non-turbulent exchange of scalars between the forest and the atmosphere at night in Amazonia. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 18, p. 3083–3099, 2018.
- VICKERS, D.; MAHRT, L. The cospectral gap and turbulent flux calculations. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 20, n. 5, p. 660–672, 2003.
- VORONOVICH, V.; KIELY, G. On the gap in the spectra of surface-layer atmospheric turbulence. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 122, p. 67–83, 2007.
- ZERI, M.; SA, L. D. A. Horizontal and vertical turbulent fluxes forced by a gravity wave event in the nocturnal atmospheric surface layer over the Amazon Forest. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 138, p. 413–431, 2011.