

## Variabilidade da concentração média de CO<sub>2</sub> acima da floresta Amazônica durante a noite associada a distintos regimes turbulentos

*Variability of the mean concentration of CO<sub>2</sub> above the Amazonian forest during nighttime associated with distinct turbulence regimes*

Ana Carolina Batista Mafra<sup>1</sup>, Alessandro Carioca de Araújo<sup>2</sup>, Leonardo Deane de Abreu Sá<sup>3</sup> e Rosa Maria Nascimento dos Santos<sup>4</sup>, Ivonne Trebs<sup>5</sup> e Mathias Sörgel<sup>6</sup>.

<sup>1</sup>Mestre, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil  
batistamafra@gmail.com

<sup>2</sup>Doutor, Amazônia Oriental, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Belém, Brasil  
alessandro.araujo@gmail.com

<sup>3</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – CRA  
leonardo.deane@pc.cnpq.br

<sup>4</sup>Universidade Do Estado do Amazonas, Brasil  
rosa.maria.sto@gmail.com

<sup>5</sup>Luxembourg Institute of Science and Technology, Luxembourg  
ivonne.trebs@list.lu

<sup>6</sup>Max Planck Institute for Chemistry, Alemanha  
m.soergel@mpic.de

### Resumo

Estudou-se a Camada Limite Noturna – CLN sobre área de floresta tropical primária a nordeste do Estado do Amazonas, no Observatório Amazônico da Torre Alta – OATA ou Amazon Tall Tower Observatory – ATTO. Foi aplicada a metodologia disponível na literatura que permitiu a caracterização da CLN em três regimes turbulentos: 1<sup>o</sup>) de turbulência fraca, com velocidade média do vento baixa; 2<sup>o</sup>) de turbulência forte, com velocidade do vento alta e, 3<sup>o</sup>) turbulência intermitente e condições de não estacionariedade. Existem variações sazonais nos valores de “c” e ao passar de um regime para outro. Foram investigadas algumas das principais características estatísticas das concentrações de CO<sub>2</sub> – “c” de cada um dos regimes turbulentos. “c” aumenta levemente com a elevação do valor de uma escala característica de velocidade turbulenta,  $V_{TKE}$ , até um valor limiar,  $V_L$ , a partir do qual tem-se um aumento súbito nos valores de “c”. Esses resultados têm importantes consequências para a parametrização de grandezas meteorológicas na CLN e modelagem do escoamento atmosférico na interface floresta-atmosfera.

**Palavras-chave:** Floresta Amazônica 1. Camada limite noturna 2. Regimes turbulentos 3. Concentração de CO<sub>2</sub> 4. ATTO 5.

### Abstract

We studied the Nocturnal Boundary Layer - CLN on area of primary tropical forest northeast of Amazonas State in Amazon Tall Tower Observatory - ATTO. We applied the method of Sun et al. (2012) to characterization three regimes dynamic stability in CLN: 1) a weak turbulence, with low average wind speed; 2) strong turbulence, with high average wind speed and 3) turbulent intermittency and nonstationarity conditions. There are seasonal variations in the values of “c” and from one regime to another. We investigated some of the main statistical characteristics of CO<sub>2</sub> concentrations - “c” for each one the turbulent regimes. “c” slightly increases with the increase of the value of a characteristic turbulence velocity scale,  $V_{TKE}$  until a threshold value,  $V_L$ , from which a sudden increase in the values of “c” is observed. This find is important consequences for parametrization of meteorological variables in the NBL and modelling of the atmospheric flow in the interface forest-atmospheric.

**Keywords:** Amazon Forest 1. Nocturnal boundary layer 2. Turbulence regimes 3. CO<sub>2</sub> concentration 4. ATTO 5.

## 1 Introdução

A partir do final do século passado, houve um crescente interesse pelos processos de troca de gases-traço geradores do efeito estufa entre a biosfera e atmosfera, propiciando uma nova fase nos estudos da Camada Limite Noturna - CLN. Grandes campanhas experimentais, como o CASES-99 (Cooperative Atmosphere - Surface Exchange Study - 99), na região central dos Estados Unidos (Poulos et al., 2002), serviram para aprofundar a pesquisa dos processos que ocorrem à noite na camada inferior da troposfera.

Um aspecto importante que vem sendo aprofundado é o da classificação dos diversos regimes turbulentos na CLN. Sun et al. (2012) - SUN12, utilizaram uma metodologia que permite separar claramente três regimes: regime 1 com ventos fracos, regime 2 com ventos fortes e, regime 3 com muita intermitência. No regime 1 vale a Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov – TSMO, segundo a qual podem-se estabelecer relações entre o fluxo turbulento de momento e o gradiente vertical da velocidade do vento. Acima de certo limiar da velocidade do vento, tem-se a passagem abrupta para o regime 2, em que os fluxos de momento não são mais funções de  $\partial V/\partial z$  e sim, de  $V/z$ . Este resultado tem sido comprovado em diferentes regiões, conforme salientado por Sun et al. (2015) – SUN15. Dada a relevância da diferença entre esses dois regimes, eles usam a sigla inglesa HOST para designar a transição dramática do regime 1 para o regime 2, quando é atingida uma velocidade média do vento limiar,  $V_L$ .

Neste estudo, procurou-se compreender quais as modificações introduzidas com existência da transição entre os regimes 1 e 2 para a variabilidade de “c” a noite, inclusive suas variações sazonais no sítio experimental de Uatumã, projeto brasileiro ATTO.

A relevância do presente estudo reside no fato de a floresta amazônica desempenhar um papel crucial no balanço global de carbono. Isso porque os processos

de assimilação (fotossíntese) e emissão (respiração) de  $\text{CO}_2$  ocorrem sem interrupção ao longo do ano e em magnitudes iguais e, às vezes, até superiores às daquelas de outros ecossistemas terrestres (Malhi et al., 1998). Nas simulações numéricas dos processos de troca floresta-atmosfera têm sido utilizadas parametrizações dos fluxos turbulentos com base apenas na TSMO SUN15. Contudo, com a caracterização da existência e da relevância do regime 2 para certas trocas turbulentas noturnas, há necessidade de aumentar o acervo de conhecimento sobre a natureza do regime 2 na região amazônica de forma a fornecer subsídios para aprimorar novas parametrizações dos fluxos turbulentos próximos da superfície, as quais deverão incorporar novas relações que levem em conta as peculiaridades de cada regime turbulento noturno no trópico úmido. Neste trabalho espera contribuir nesse sentido.

## 2 Metodologia

Os dados foram coletados no Amazon Tall Tower Observatory – ATTO, localizado na Reserva de Desenvolvimento Sustentável de Uatumã – RDSU, o qual dispõe de medidas de resposta rápida de grandezas escalares e vetoriais atmosféricas. Foram utilizados dados coletados durante: Período 1: junho de 2012 (representativos do período menos chuvoso, medidos a uma altura de 39,4 m) e Período 2: março de 2013 (representativos do período chuvoso, medidos a uma altura de 46 m). As densidades de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{mmol m}^{-3}$ ) foram medidas por um analisador de gás por infravermelho (IRGA, em inglês) (LI-7500A, LI-COR Inc., Lincoln, NE, EUA), amostradas a 10 Hz. No período 1, as componentes do vento ( $u$ ,  $v$  e  $w$ ) foram medidas por um anemômetro ultrassônico 3D (CSAT3, Campbell Scientific Inc, Logan, UT, EUA) no período 2, com anemômetro ultrassônico 3D (Windmaster, Gill Instruments Ltd., Oxfordshire, UK), ambos a 10Hz. Na análise de qualidade dos dados brutos utilizou-se o programa Alteddy (versão 3.6). Esse programa realiza as operações de retirada de dados espúrios e remove tendências. A partir das suas funções, foram obtidas as médias dos

intervalos de 5 minutos para todas as grandezas e variâncias das grandezas noturnas utilizadas (19:01 até 4:59 HL), conforme recomendação de SUN12 (Mafra; 2014).

Ainda, conforme sugerido em SUN12, utilizou-se a escala de velocidade turbulenta  $V_{TKE}$ :

$$V_{TKE} = \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right)(\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2)} = \sqrt{TKE} \quad (1)$$

onde, TKE representa a energia cinética turbulenta por unidade de massa;  $u$ ,  $v$  e  $w$  são componentes da velocidade do vento nas direções horizontal-longitudinal, horizontal-transversal e vertical, respectivamente; e  $\sigma$  representa o desvio padrão de cada variável.

Segundo SUN12, a relação  $V_{TKE} \times |V|$  permite identificar graficamente os dados pertencentes a cada um dos regimes da turbulência. Sendo  $|V|$  a velocidade média do vento horizontal –  $|V|$ .

1º) Regime 1: Caracterizado por turbulência fraca, quando a velocidade média  $|V|$  do vento é pequena e  $V_{TKE}$  é baixo e aumenta levemente com  $|V|$  até em valor-limiar  $V_L$ . É um regime em que predominam

as forças determinadas pelas condições de rugosidade da superfície;

2º) Regime 2: Caracterizado por turbulência forte, com valores de  $|V|$  elevados e em que  $V_{TKE}$  cresce rapidamente com  $|V|$  a partir de  $V_L$ , com ocorrência de um cisalhamento global em toda a camada limite;

3º) Regime 3: Caracterizado por turbulência intermitente e condições não estacionárias.

Para a observação da concentração de  $CO_2$  – “ $c$ ” em cada regime turbulento, foi elaborado um gráfico similar ao de SUN12, porém com  $CO_2 \times V_{TKE}$  em vez de  $V_{TKE} \times |V|$ .

### 3 Resultados e Discussões

As distribuições dos regimes turbulentos e sua variação nos períodos 1 e 2 são apresentadas na Figuras 1. Em relação à Figura 1, o número de eventos no regime 1 foi maior ( $n = 2710$  eventos no Período 1 e  $n = 2884$  eventos no Período 2) do que aqueles ocorridos no regime 2 ( $n = 49$  eventos no Período 1 e  $n = 680$  eventos no Período 2) e no regime 3 ( $n = 13$  eventos no Período 1 e  $n = 27$  eventos no Período 2).

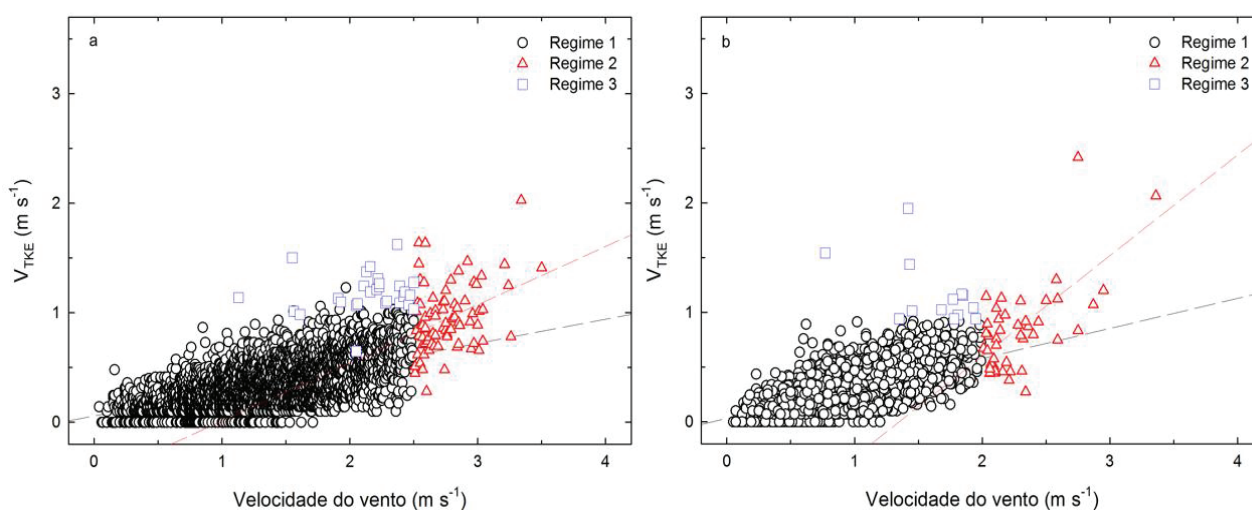


Figura 1 - a) Relação entre  $V_{TKE}$  ( $m s^{-1}$ ) e Velocidade média do vento ( $m s^{-1}$ ) mostrando os três regimes turbulentos encontrados para o Período 1, menos chuvoso. b) Relação entre  $V_{TKE}$  ( $m s^{-1}$ ) e Velocidade média do vento ( $m s^{-1}$ ) mostrando os três regimes turbulentos encontrados para o Período 2, chuvoso.

No Período 1, do total de  $n = 2770$  ocorrências observadas no período noturno, 97.8% dos eventos foram observados no regime 1, 1.7% no regime 2 e 0.5% no regime 3. No Período 2, do total de  $n = 3592$  ocorrências observadas no período noturno, 80.3% dos eventos observados no regime 1, 19% no regime 2 e 0.8% no regime 3.

Da observação das Figuras 1, verificam-se diferenças nos coeficientes angulares das retas para os dois períodos analisados, o que reflete diferenças entre a velocidade média do vento e a capacidade de geração de energia cinética turbulenta em cada um desses períodos. No que se refere ao *regime 1*, mais ligado às condições locais, isso poderia ser atribuído a alterações no índice de área foliar (LAI) de um período para o outro,

conforme comprovado por Doughty e Goulden (2008), o que modificaria a capacidade de arrasto da superfície vegetal em gerar turbulência. No que se refere ao *regime 2*, menos dependente das condições superficiais, sugere-se que as diferenças verificadas nos valores dos coeficientes angulares das retas de melhor ajuste se devam a alterações nas características dos maiores vórtices existentes acima da cobertura vegetal, com deslocamentos na altura de seu centro de simetria. Os regimes de velocidade do vento associados a  $V_{TKE}$  encontrados para o Período 1 e Período 2 têm os respectivos padrões de variabilidade dos valores de “c” acima da floresta (medidas realizadas nas alturas de 39,4 m e 46 m, respectivamente) apresentados na Figura 2.

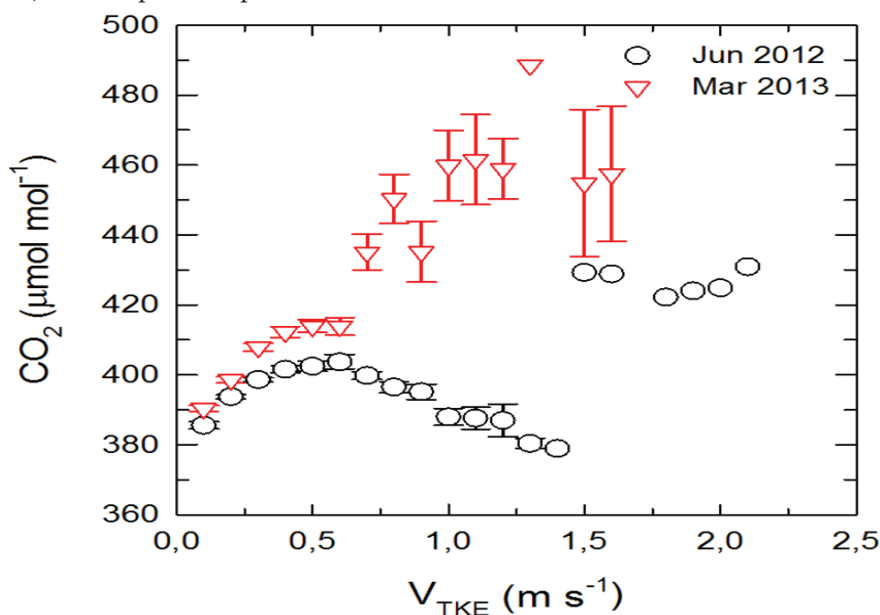


Figura 2 - Relação entre concentração de  $CO_2$  ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ) - “c” e  $V_{TKE}$  ( $\text{m s}^{-1}$ ) mostrando a variabilidade do  $CO_2$  de acordo com regimes turbulentos encontrados para os Períodos 1 e 2 (menos chuvoso e chuvoso, respectivamente).

Pode-se lembrar das Figuras 1 e 2 que, no regime 1, tanto para o Período 1 quanto para o Período 2, os valores de  $V_{TKE}$  foram de aproximadamente  $0,9 \text{ m s}^{-1}$ . Então, comparando-se a Figura 2 com a Figura 1, nota-se que para os valores de  $V_{TKE}$  menores que  $1 \text{ m s}^{-1}$ , os valores de “c”, também na Figura 2, não mostram diferenças de um período para o outro. Além disso, nesse intervalo, a medida em que  $V_{TKE}$  cresce, os valores de “c” pouco aumentam. Para os valores de  $V_{TKE}$  maiores que  $1 \text{ m s}^{-1}$ , verifica-se

que os mesmos estão associados aos regimes 2 ou 3. Nesses, ocorrem os maiores valores de “c”, principalmente para o Período 2, quando ocorre maior respiração da floresta (Araújo et al., 2010). Para o Período 2, os valores de “c” relacionados a  $V_{TKE} > 1,5 \text{ m s}^{-1}$  são representativos do regime 3, caracterizados por eventos isolados dentro da CLN. Tais variações nas concentrações sugerem a existência de causas fisicamente diferentes para os processos de mistura em cada um dos regimes, conforme discutido em SUN15.

## 4 Conclusões

Foram estudados diferentes regimes turbulentos nos períodos menos chuvoso e chuvoso acima da floresta Amazônica a partir de dados medidos em torre do projeto ATTO. Os resultados mostram diferenças significativas nas concentrações de CO<sub>2</sub> dependendo principalmente do regime turbulento, além do período do ano. As maiores contribuições para o acúmulo da concentração de CO<sub>2</sub> acima da copa acontecem no período chuvoso, quando a respiração da floresta é maior. Para trabalhos futuros há necessidade de se pesquisar relações de similaridade mais adequadas para cada um dos regimes turbulentos estudados.

## Agradecimentos

Ao projeto ATTO, apoiado pela FINEP, pela FAPEAM, pela UEA, pelo Ministério Federal Alemão de Educação e Pesquisa, Ministério Brasileiro de Ciência, Tecnologia e Inovação, com suporte financeiro do INPA e da Max Plank Society. Ana Carolina agradece à FAPESPA pela bolsa de mestrado. Leonardo Sá agradece ao CNPQ processo 303728/2010-8 pela bolsa de produtividade.

## Referências

- ARAÚJO, A. C., DOLMAN, A. J., WATERLOO, M. J., GASH, J. H. C., KRUIJT, B., ZANCHI, F. B., LANGE, J. M. E., STOEVELAAR, R., MANZI, A. O., NOBRE, A. D., LOOTENS, R. N., BACKER, J. The spatial variability of CO<sub>2</sub> storage and the interpretation of eddy covariance fluxes in central Amazonia. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2010. 150, 226-237.
- DOUGHTY, C. E.; GOULDEN, M. L. Seasonal patterns of tropical forest leaf area index and CO<sub>2</sub> exchange. *Journal of Geophysical Research*. 2008. v. 113, G00B06, doi: 10.1029/2007JG000590.
- MALHI, Y., NOBRE, A. D., GRACE, J., KRUIJT, B., PEREIRA, M. G. P., CULF, A., SCOTT, S. Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest. *Journal of Geophysical Research*. 1998. , December 27. 103, D24: 31593-31612
- POULOS, G. S., BLUMEN, W., FRITTS, D. C., LUNDQUIST, J. K., SUN, J., BURNS, S. P., NAPPO, C., BANTA, R., NEWSOM, R., CUXART, J., TERRADELLAS, E., BALSLEY, B., JENSEN, M. CASES-99: A comprehensive investigation of the stable nocturnal boundary layer. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2002.83, 4: 555-581.
- SUN, J.; MAHRT, L.; BANTA, R. M.; PICHUGINA, Y. L. Turbulence Regimes and Turbulence Intermittency in the Stable Boundary Layer during CASES-99. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2012. v. 69, p. 338-351.
- SUN, J.; MAHRT, L.; NAPPO, C.; LENSCHOW, D. H. Wind and Temperature Oscillations Generated by Wave-Turbulence Interactions in the Stably Stratified Boundary Layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2015. v. 72, p. 1484-1503.