

## Edição Especial

# Regimes de turbulência na camada limite noturna acima da Floresta Amazônica

Turbulence regimes in the stable boundary layer above the Amazon rainforest

Anne Cristiny Santos de Mendonça <sup>I</sup>, Cléo Quaresma Dias Júnior <sup>II</sup>,  
Otavio Costa Acevedo <sup>III</sup>, Luca Mortarini <sup>IV</sup>, Daniel Magnabosco Marra <sup>V</sup>

<sup>I</sup> Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, AM, Brasil

<sup>II</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Pará, PA, Brasil

<sup>III</sup> University of Oklahoma, Oklahoma, USA

<sup>IV</sup> Institute of Atmospheric Sciences and Climate, Torino, Itália

<sup>V</sup> Instituto Max Planck de Biogeoquímica, Jena, Alemanha

## RESUMO

Identificamos dois regimes turbulentos noturnos em diferentes alturas acima da Floresta Amazônica e sua variação com relação à proximidade do dossel. Analisamos dados de resposta rápida medidos na Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã, Amazônia central, Brasil, durante os meses de setembro de 2021 a janeiro de 2022. Nossos resultados mostraram que a velocidade limiar do vento que separa o regime de turbulência fraca do regime de turbulência forte aumentou em função da distância da copa das árvores (43 m, 50 m, 75 m, 100 m, 127 m, 151 m e 172 m). Já a 196 m, 223 m, 247 m, 274 m e 298 m de altura, a mudança de regime ocorreu na mesma velocidade limiar do vento. Por outro lado, evidenciamos que a 316 m ocorreram apenas situações em que a turbulência foi fraca. Tal padrão indica que a estrutura e a rugosidade da floresta afetam o comportamento da turbulência.

**Palavras-chave:** Floresta tropical; Regimes de turbulência; Subcamada rugosa

## ABSTRACT

We identify two nocturnal turbulence regimes at different heights above the Amazon Forest and their variation in relation to the proximity of the forest canopy. We analyzed fast response data measured at the Uatumã Sustainable Development Reserve in central Amazonia, Brazil, during September 2021 to January 2022. Our results show that the threshold wind speed that separate the weak turbulence regime from strong turbulence regime increased as a function of the distance above the canopy (43 m, 50 m, 75 m, 100 m, 127 m, 151 m e 172 m). However, at 196 m, 223 m, 247 m, 274 m e 298 m height the

change of the turbulence regime occurred at the same threshold wind speed. In contrast, at 316 m we evidenced only situations where the turbulence was weak. This pattern indicated that the structure and roughness of dense forest affect the turbulence structure.

**Keywords:** Tropical forest; Turbulence regimes; Roughness sublayer

## 1 INTRODUÇÃO

Um número crescente de estudos observacionais e de modelagem mostram o papel crucial que a Floresta Amazônica exerce sobre o clima regional e global (Betts; Sanderson; Woodward, 2008; Alves *et al.*, 2017). Destaca-se a importância da floresta no balanço hídrico, no balanço de radiação e de energia na superfície, visto que esses são afetados pelas trocas de massa (vapor d'água, dióxido de carbono, metano, ozônio, e uma variedade de gases e partículas), de calor (sensível e latente) e de momentum entre a floresta e a atmosfera (Randow *et al.*, 2004). Tais trocas são realizadas por movimentos verticais turbulentos, que ocorrem pelo efeito do aquecimento do ar em contato com a superfície (componente térmico) e pela interação do escoamento atmosférico com os elementos de rugosidade da superfície (componente mecânico). Destarte, as características da turbulência dentro e acima de dosséis florestais são diferentes e mais complexas do que aquelas encontradas sobre superfícies planas e homogêneas (Finnigan, 2000).

A análise do comportamento da turbulência tem recebido atenção de diversos pesquisadores, ainda assim muitas questões de interesse científico permanecem em aberto (Zeri; Sá, 2011; Dias-Júnior *et al.*, 2017; Dias-Júnior *et al.*, 2019; Chor *et al.*, 2017). Em latitudes médias, por exemplo, um melhor entendimento sobre as trocas turbulentas noturnas surgiu a partir da análise da turbulência em dois diferentes regimes. Mahrt *et al.* (1998) os categorizaram como regime “fracamente estável” e “muito estável”, a fim de diferenciar as condições atmosféricas que favorecem ou não favorecem a turbulência. Sun *et al.* (2012) classificaram os regimes turbulentos como fraco ou forte de acordo com a relação entre energia cinética turbulenta e a velocidade do vento.

Posteriormente, tais termos foram amplamente utilizados para se referir aos regimes.

Ainda em latitudes médias, estudos mostraram que a transição entre os regimes de turbulência na camada limite noturna pode ser influenciada por outras características, como estabilidade térmica, aumento da nebulosidade (Acevedo; Fitzjarrald, 2003), rugosidade da superfície (Mahrt *et al.*, 2013) e perda radiativa líquida da superfície (Sun; Takle; Acevedo, 2020). Já no sul da Amazônia, Dias-Júnior *et al.* (2017) mostraram, a partir da análise de 14 noites de dados de resposta rápida, que os regimes de turbulência fraca e forte estiveram associados a situações em que a altura do ponto de inflexão no perfil do vento foi menor e maior, respectivamente. Na Amazônia Central, Bezerra *et al.* (2021) evidenciaram, através de um estudo de caso, que a transição entre os regimes turbulentos pode ter sido motivada pela passagem de uma linha de instabilidade. Dessa forma, é de grande interesse compreender a organização da turbulência sob diferentes regimes, tanto na interface floresta-atmosfera, quanto nos níveis acima do dossel.

O objetivo deste estudo foi identificar a existência de diferentes regimes de turbulência atmosférica na Camada Limite Noturna (CLN) em um sítio experimental localizado na Amazônia Central. De maneira inédita, avaliamos o comportamento da turbulência em 13 diferentes alturas acima do dossel florestal.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O sítio experimental está localizado na Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã (RDSU), Amazônia central, Brasil. A RDSU está situada na cidade de São Sebastião do Uatumã, 150 km a nordeste de Manaus, onde está inserido o Observatório da Torre Alta da Amazônia (*Amazon Tall Tower Observatory-ATTO*). A estação de pesquisa foi descrita em detalhes por Andreae *et al.* (2015).

Nossos dados foram coletados por meio de anemômetros sônicos tridimensionais instalados em duas torres, distantes 670 m uma da outra. A torre INSTANT (2° 08.64'S, 58° 59.99'W) e a torre ATTO (2° 08.75'S, 58° 00.33'W) de 80 m e

325 m de altura, respectivamente. Os instrumentos e as alturas em que se realizaram as medições foram detalhados na Tabela 1. Analisamos dados dos três componentes da velocidade do vento ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ) coletados em uma frequência de amostragem de 10 Hz, durante o período de setembro de 2021 a janeiro de 2022.

Verificamos a qualidade dos dados de resposta rápida por meio do seguinte procedimento: (i) teste de registro completo e verificação de erro (flags), conforme proposto por Zahn, Chor e Dias (2016); e (ii) detecção e remoção de spikes (picos) e dropouts, como sugerido por Vickers e Mahrt (1997). Para calcular os diferentes momentos estatísticos da turbulência, nós usamos valores médios em intervalos de 5 minutos, como indicado por Sun *et al.* (2002) e Vickers, Goeckede e Law (2010). Para evitar períodos de transição, utilizamos dados de 00 (zero) a 09 UTC (UTC = hora local + 4h).

Neste estudo, examinamos os regimes de turbulência em 13 alturas. Consideramos a altura mais próxima ao topo do dossel (43 m) e mais 12 alturas acima da copa onde os sensores foram instalados (Tabela 1). A análise dessas diferentes camadas possibilitou observar o papel do dossel na formação dos regimes turbulentos. Para identificar os regimes de turbulência empregamos o método sugerido por Sun *et al.* (2012). Esta metodologia propõe a análise da relação entre a escala de velocidade turbulenta ( $V_{TKE}$ ) e a velocidade média do vento ( $V$ ) e do desvio padrão da velocidade vertical do vento ( $\sigma_w$ ) em função de  $V$ . De modo que:

$$V_{TKE} = \sqrt{TKE} = [0.5(\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2)]^{0.5} \quad (1)$$

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2)$$

No qual:

$u, v$  e  $w$  são as componentes zonal, meridional e vertical do vento (nessa ordem);  
 $\sigma_u, \sigma_v$  e  $\sigma_w$  representam o desvio padrão de cada variável;  
 $TKE$  corresponde à energia cinética turbulenta

O método de Sun propõe ainda identificar a transição de regimes a partir do valor de velocidade limiar do vento ( $V_L$ ) que é baseado na mudança de inclinação da reta à qual os dados se agrupam.

Tabela 1 – Disposição dos sensores nas torres

Torre	Altura	Instrumento
ATTO	43 m	Thies 3D Sonic anemometer, termohigrometer, microbarometer
INSTANT	50 m	IRGA, 3D Sonic anemometer, termohigrometer, surface temperature
INSTANT	75 m	IRGA, 3D Sonic anemometer, termohigrometer, barometer, radiation
ATTO	100 m	Thies 3D Sonic anemometer, termohigrometer
ATTO	127 m	Thies 3D Sonic anemometer, termohigrometer
ATTO	151 m	Thies 3D Sonic anemometer, termohigrometer, barometer
ATTO	172 m	Thies 3D Sonic anemometer, termohigrometer
ATTO	196 m	IRGA 3D Sonic anemometer, termohigrometer, PAR
ATTO	223 m	Thies 3D Sonic anemometer, termohigrometer
ATTO	247 m	Thies 3D Sonic anemometer, termohigrometer
ATTO	274 m	Thies 3D Sonic anemometer, termohigrometer
ATTO	298 m	Thies 3D Sonic anemometer, termohigrometer
ATTO	316 m	IRGA, 3D Sonic anemometer, termohigrometer, barometer, PAR

Fonte: Autores/as (2022)

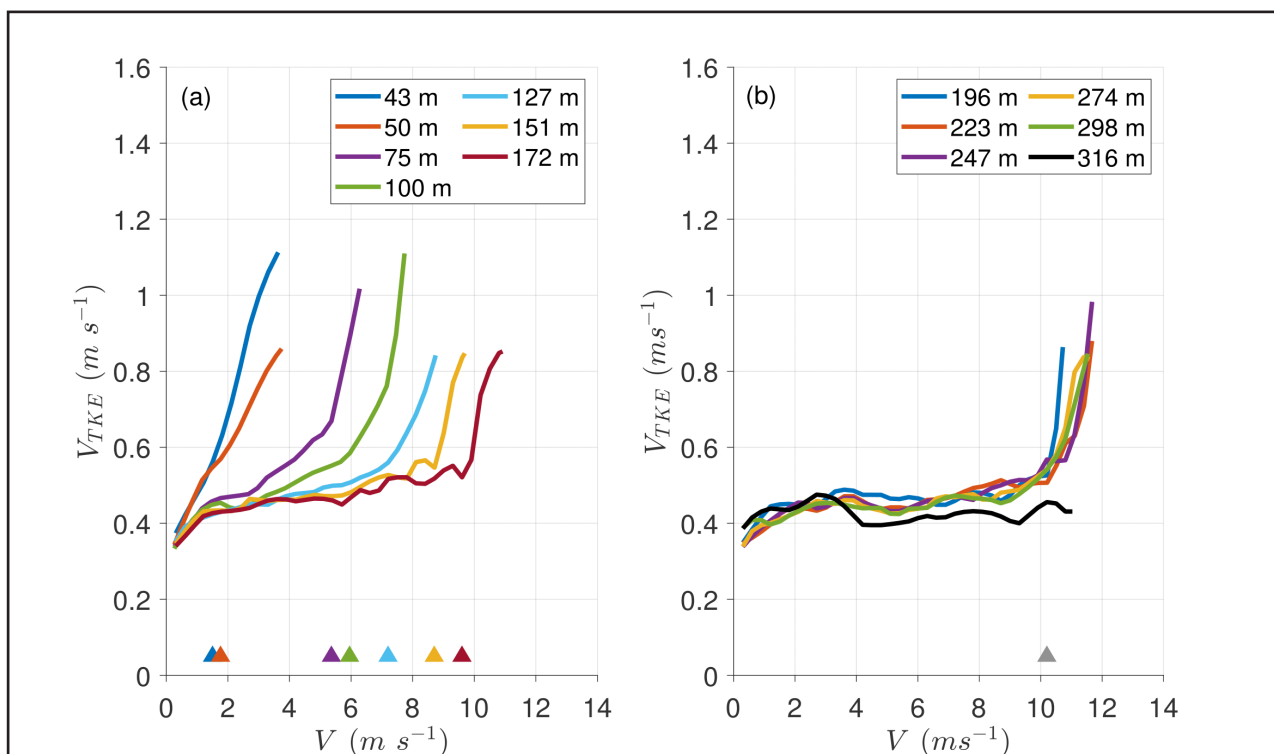
### 3 RESULTADOS

Identificamos uma relação positiva entre  $V_{TKE}$  e  $V$  (Figura 1) em todas as alturas investigadas, bem como uma clara distinção entre os dois regimes de turbulência. Os dados se agruparam em torno de duas linhas retas com inclinações diferentes. A primeira reta (regime 1) corresponde a um regime de turbulência fraca, visto que o  $V_{TKE}$  aumentou relativamente com  $V$ . A segunda reta (regime 2) está associada ao regime de turbulência forte, em que a partir do momento que  $V$  excedeu o valor da velocidade limiar do vento ( $V_l$ ), a intensidade da turbulência aumentou e mudou bruscamente com relação a  $V$ .

Os dois regimes foram observados nas alturas analisadas, sendo que o valor de aumentou à medida que o distanciamento em relação ao topo da copa das árvores tornou-se maior. Esse padrão ocorreu em 7 alturas, das quais foi igual a 1.5, 1.7, 5.3, 5.9, 7.2, 8.7 e 9.6  $\text{ms}^{-1}$  nas alturas 43 m, 50 m, 75 m, 100 m, 127 m, 151 m e 172 m, respectivamente (Figura 1a). Tal comportamento gerou um deslocamento das curvas do regime 2, à medida em que a velocidade do vento também aumentou. Esses

resultados estão de acordo com estudos anteriores realizados sobre superfícies não vegetadas, que constataram que  $V_L$  aumenta quase logaritmicamente com a altura (Sun *et al.*, 2012; Acevedo *et al.*, 2016).

Figura 1 – Relação média da escala de velocidade turbulenta ( $V_{TKE}$ ) em função da velocidade média do vento ( $V$ ) nas diferentes alturas analisadas



Fonte: Autores/as (2022)

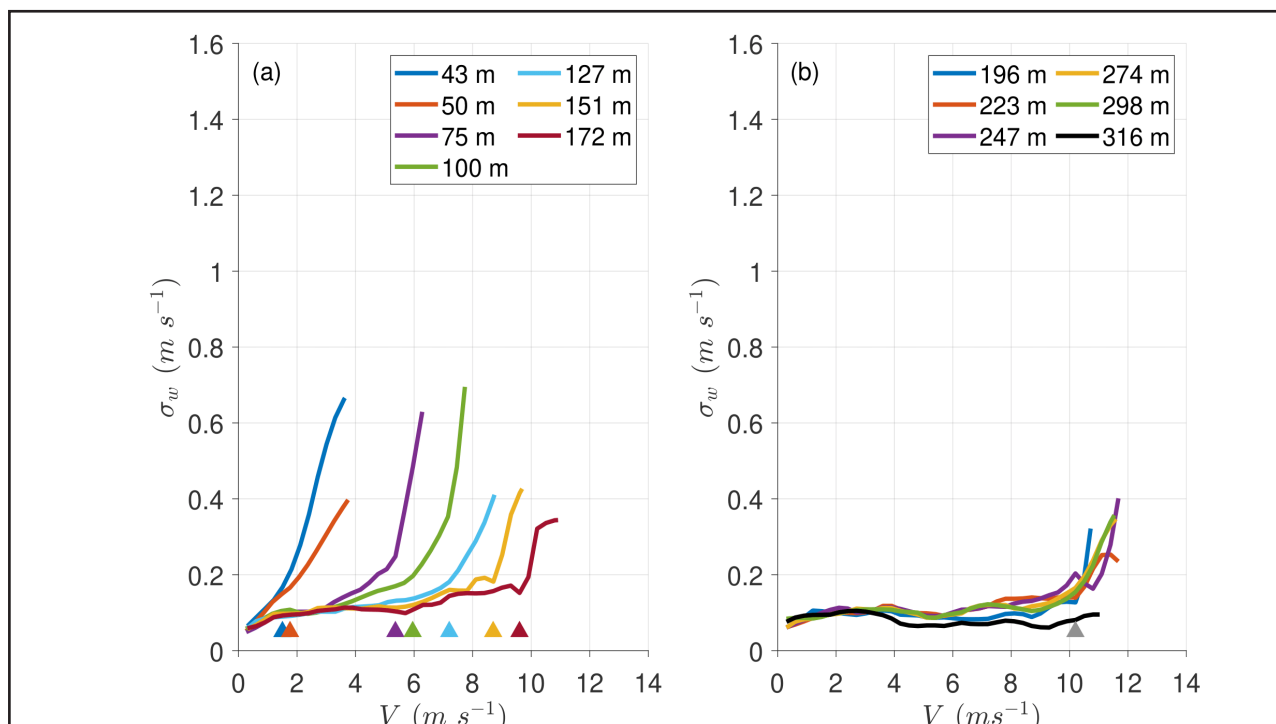
Legenda: Os triângulos indicam a velocidade limiar do vento ( $V_L$ ) em que o regime de turbulência fraca mudou para o regime de turbulência forte

Nas demais alturas (196 m, 223 m, 247 m, 274 m e 298 m), também identificamos a mudança no comportamento da turbulência (Figura 1b), porém as transições do regime 1 para o regime 2 ocorreram em uma mesma velocidade do vento ( $V_L = 10.2 \text{ ms}^{-1}$ ). Por outro lado, o regime não mudou à 316 m de altura, evidenciando uma turbulência fraca durante todo o período estudado.

O mesmo padrão foi observado em todas as alturas ao considerar  $\sigma_w$  como variável dependente (Figura 2). A diferença foi que, quando a velocidade do vento se aproximou de zero,  $\sigma_w$  também se aproximou de zero, enquanto  $V_{TKE}$  foi em média  $0,35 \text{ ms}^{-1}$  (Figura 1). Esse resultado pode estar associado ao fato de que  $TKE$  aumenta

exponencialmente com o tempo nos processos de mesoescala que são muito ativos na Amazônia (Acevedo *et al.*, 2014), indicando que a análise de  $V_{TKE}$  pode incluir vórtices não turbulentos. Apesar disso, os valores de  $V_L$  que denotam a mudança de regime não sofreram alterações.

Figura 2 – Relação média do desvio padrão da velocidade vertical do vento ( $\sigma_w$ ) em função da velocidade média do vento ( $v$ ) nas diferentes alturas analisadas



Fonte: Autores/as (2022)

Legenda: Os triângulos indicam a velocidade limiar do vento ( $V_L$ ) em que o regime de turbulência fraca mudou para o regime de turbulência forte

## 4 CONCLUSÃO

A principal contribuição deste estudo foi a identificação de diferentes regimes turbulentos na camada limite noturna em 13 alturas acima do dossel florestal. Para isso, recorreu-se a um conjunto de dados de resposta rápida medidos na Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã, Amazônia central, Brasil. Identificamos dois padrões de turbulência: regime de turbulência fraca (regime 1) e regime de turbulência forte (regime 2). A transição entre os regimes ocorreu em todas as

alturas analisadas (exceto a 316 m) de acordo com uma determinada velocidade limiar do vento. Porém, tal velocidade limiar diminuiu em função da proximidade do dossel, indicando que o comportamento da turbulência foi influenciado pela estrutura e rugosidade da floresta.

## AGRADECIMENTOS

Anne Cristiny Santos de Mendonça agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado concedida através do Programa de Pós-graduação em Clima e Ambiente. Este estudo faz parte do Observatório da Torre Alta da Amazônia (ATTO), financiado pelo Ministério Federal da Educação e Pesquisa da Alemanha, pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação do Brasil, e pela Sociedade Max Planck (MPG), Alemanha. O ATTO também é apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Universidade do Estado do Amazonas (UEA), Instituto Nacional de Pesquisas Amazônia (INPA), Programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA) e SDS/CEUC/RDS-Uatumã.

## REFERÊNCIAS

- ACEVEDO, O. C.; COSTA, F. D.; OLIVEIRA, P. E.; PUHALES, F. S.; DEGRAZIA, G. A.; ROBERTI, D. R. The influence of submeso processes on stable boundary layer similarity relationships. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 71, n. 1, p. 207–225, 2014.
- ACEVEDO, O. C.; FITZJARRALD, D. R. In the core of the night-effects of intermittent mixing on a horizontally heterogeneous surface. **Boundary-layer meteorology**, Springer, v. 106, n. 1, p. 1–33, 2003.
- ACEVEDO, O. C.; MAHRT, L.; PUHALES, F. S.; COSTA, F. D.; MEDEIROS, L. E.; DEGRAZIA, G. A. Contrasting structures between the decoupled and coupled states of the stable boundary layer. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 142, n. 695, p. 693–702, 2016.
- ALVES, L. M.; MARENGO, J. A.; FU, R.; BOMBARDI, R. J. Sensitivity of amazon regional climate to deforestation. **American Journal of Climate Change**, Scientific Research Publishing, v. 6, n. 1, p.75–98, 2017.



ANDREAE, M. O.; ACEVEDO, O. C.; ARAÚJO, A.; ARTAXO, P.; BARBOSA, C. G. G.; BARBOSA, H. M. J.; BRITO, J.; CARBONE, S.; CHI, X.; CINTRA, B. B. L.; SILVA, N. F. da; DIAS, N. L.; DIAS-JÚNIOR, C. Q.; (...); WOLFF, S.; SERRANO, A. M. Yáñez. The amazon tall tower observatory (atto): overview of pilot measurements on ecosystem ecology, meteorology, trace gases, and aerosols. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 15, n. 18, p. 10723–10776, 2015.

BETTS, R.; SANDERSON, M.; WOODWARD, S. Effects of large-scale amazon forest degradation on climate and air quality through fluxes of carbon dioxide, water, energy, mineral dust and isoprene. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, The Royal Society London, v. 363, n. 1498, p. 1873–1880, 2008.

BEZERRA, V. L.; DIAS-JÚNIOR, C. Q.; VALE, R. S.; SANTANA, R. A.; BOTÍA, S.; MANZI, A. O.; COHEN, J. C. P.; MARTINS, H. S.; CHAMECKI, M.; FUENTES, J. D. Near-surface atmospheric turbulence in the presence of a squall line above a forested and deforested region in the central amazon. **Atmosphere**, v. 12, n. 4, 2021. ISSN 2073-4433.

CHOR, T. L.; DIAS, N. L.; ARAÚJO, A.; WOLFF, S.; ZAHN, E.; MANZI, A.; TREBS, I.; SÁ, M. O.; TEIXEIRA, P. R.; SÖRGEL, M. Flux-variance and flux-gradient relationships in the roughness sublayer over the amazon forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 239, p. 213–222, 2017. ISSN 0168-1923.

DIAS-JÚNIOR, C. Q.; DIAS, N. L.; FUENTES, J. D.; CHAMECKI, M. Convective storms and non-classical low-level jets during high ozone level episodes in the amazon region: An arm/goamazon case study. **Atmospheric Environment**, v. 155, p. 199–209, 2017.

DIAS-JÚNIOR, C. Q.; DIAS, N. L.; SANTOS, R. M. N. dos; SÖRGEL, M.; ARAÚJO, A.; TSOKAN-KUNKU, A.; DITAS, F.; SANTANA, R. A. de; RANDOW, C. von; SÁ, M. et al. Is there a classical inertial sublayer over the amazon forest? **Geophysical Research Letters**, Wiley Online Library, v. 46, n. 10, p. 5614–5622, 2019.

FINNIGAN, J. Turbulence in plant canopies. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 32, n. 1, p. 519–571, 2000.

MAHRT, L.; SUN, J.; BLUMEN, W.; DELANY, T.; ONCLEY, S. Nocturnal boundary-layer regimes. **Boundary-layer meteorology**, Springer, v. 88, n. 2, p. 255–278, 1998.

MAHRT, L.; THOMAS, C.; RICHARDSON, S.; SEAMAN, N.; STAUFFER, D.; ZEEMAN, M. Non-stationary generation of weak turbulence for very stable and weak-wind conditions. **Boundary-layer meteorology**, Springer, v. 147, n. 2, p. 179–199, 2013.

RANDOW, C. V.; MANZI, A. O.; KRUIJT, B.; OLIVEIRA, P. D.; ZANCHI, F. B.; SILVA, R. d.; HODNETT, M. G.; GASH, J. H.; ELBERS, J. A.; CARDOSO, F. L. et al. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in south west amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, Springer, v. 78, n. 1, p. 5–26, 2004.

SUN, J.; BURNS, S. P.; LENSCHOW, D. H.; BANTA, R.; NEWSOM, R.; COULTER, R.; FRASIER, S.; INCE, T.; NAPPO, C.; CUXART, J. et al. Intermittent turbulence associated with a density current passage in the stable boundary layer. **Boundary-Layer Meteorology**, Springer, v. 105, n. 2, p. 199–219, 2002.

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 Atmospheric Sciences**, American Meteorological Society, v. 69, n. 1, p. 338–351, 2012.

SUN, J.; TAKLE, E. S.; ACEVEDO, O. C. Understanding physical processes represented by the monin-obukhov bulk formula for momentum transfer. **Boundary-Layer Meteorology**, Springer, v. 177, n. 1, p. 69–95, 2020.

VICKERS, D.; GÖCKEDE, M.; LAW, B. Uncertainty estimates for 1-h averaged turbulence fluxes of carbon dioxide, latent heat and sensible heat. **Tellus B: Chemical and Physical Meteorology**, Taylor Francis, v. 62, n. 2, p. 87–99, 2010.

VICKERS, D.; MAHRT, L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, American Meteorological Society, Boston MA, USA, v. 14, n. 3, p. 512 – 526, 1997.

ZAHN, E.; CHOR, T.; DIAS, N. A simple methodology for quality control of micrometeorological datasets. **Am J Environ Eng**, v. 6, n. 4A, p. 135–142, 2016.

ZERI, M.; SÁ, L. D. Horizontal and vertical turbulent fluxes forced by a gravity wave event in the nocturnal atmospheric surface layer over the amazon forest. **Boundary-layer meteorology**, Springer, v. 138, n. 3, p. 413–431, 2011.

## Contribuição de Autoria

### 1 – Anne Cristiny Santos de Mendonça

Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Clima e Ambiente

<https://orcid.org/0000-0002-7524-8073>, [anne.demendonca@outlook.com](mailto:anne.demendonca@outlook.com)

Contribuição: Investigação, Visualização de dados, Escrita – Primeira Redação, Revisão e Edição

### 2 –Cléo Quaresma Dias Júnior

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Campus Belém, Brasil

<https://orcid.org/0000-0003-4783-4689>, [cleo.quaresma@ifpa.edu.br](mailto:cleo.quaresma@ifpa.edu.br)

Contribuição: Metodologia, Supervisão, Escrita – Revisão e Edição

### 3 – Otavio Costa Acevedo

Universidade de Oklahoma, Oklahoma, EUA

<https://orcid.org/0000-0003-2606-4726>, [otavioacevedo@gmail.com](mailto:otavioacevedo@gmail.com)

Contribuição: Metodologia, Supervisão, Escrita – Revisão e Edição

### 4 – Luca Mortarini

Institute of Atmospheric Sciences and Climate (CNR-ISAC), Torino, Itália

<https://orcid.org/0000-0002-0543-2975>, [l.mortarini@gmail.com](mailto:l.mortarini@gmail.com)

Contribuição: Metodologia, Supervisão, Escrita – Revisão e Edição

## 5 –Daniel Magnabosco Marra

Instituto Max Planck de Biogeoquímica, Jena, Alemanha

<https://orcid.org/0000-0003-1216-2982>, [danielmmarra@gmail.com](mailto:danielmmarra@gmail.com)

Contribuição: Metodologia, Supervisão, Escrita – Revisão e Edição

## Como citar este artigo

MENDONÇA, A. C. S.; DIAS JÚNIOR, C. Q.; ACEVEDO, O. C.; MORTARINI, L.; MARRA, D. M. Regimes de turbulência na camada limite noturna acima da Floresta Amazônica, **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 45, n. esp. 2, e75412, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X75412>. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/75412>. Acesso em: dia mês abreviado ano.