

XIII Workshop Brasileiro de Micrometeorologia

Perfis de fluxos turbulentos usados para a estimativa da altura da camada limite noturna na Amazônia Central

Turbulent flow profiles used to estimate the height of the night boundary layer in the Central Amazon

Carla Maria Alves de Souza^I, Anne Cristiny Santos de Mendonça^I,
Flávio Augusto Farias D'Oliveira^{II}, Gilberto Fisch^{III}, Carlos Alberto Quesada^I,
Rayonil Gomes Carneiro^{IV}, Bruno Takeshi Tanaka Portela^I, Jailson Ramos da Mata^I,
Leonardo de Oliveira Ramos^I, Thiago de Lima Xavier^I, Cléo Quaresma Dias Júnior^{II}

^I Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Amazonas, Brasil

^{II} Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Belém, Pará, Brasil

^{III} Universidade de Taubaté, Taubaté, São Paulo, Brasil

^{IV} Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, Brasil

RESUMO

A Camada Limite Atmosférica (CLA) é a porção da baixa troposfera que interage e é influenciada pela superfície. É um parâmetro chave para a micrometeorologia, química da atmosfera e outras áreas de estudos. Contudo, a estimativa da altura da camada limite noturna (CLN) não é nada trivial, e as técnicas que foram usadas até hoje nunca estimaram o topo da CLN com os perfis dos fluxos turbulentos (técnica mais adequada para este fim). Neste trabalho propõe-se uma metodologia inovadora para calcular a altura da CLN, tendo sido utilizados dados de 13 anemômetros sônicos tridimensionais instalados nas torres do sítio experimental ATTO, localizados na Amazônia Central. Foram usados dois dias, um característico de período chuvoso e outro de período seco. Os resultados indicaram que a metodologia de convergência de fluxos é promissora para determinar a altura da CLN. Observou-se que, durante a estação seca, as alturas foram menores (média de 86,60 m) em comparação com o período chuvoso (média de 160,42 m). As alturas mais elevadas durante a estação chuvosa podem ser atribuídas à maior presença de nuvens nesse período, resultando em uma maior quantidade de radiação de onda longa emitida por essas nuvens. Isso influencia no aumento da turbulência devido ao saldo radiativo disponível e, por conseguinte, resulta em alturas da CLN mais elevadas, esses resultados serão aprofundados com a utilização de um maior número de dados.

Palavras-chave: Floresta amazônica; Torre ATTO; Fluxos turbulentos

ABSTRACT

The Atmospheric Boundary Layer (ABL) is the portion of the lower troposphere that interacts with and is influenced by the Earth's surface. It is a key parameter for micrometeorology, atmospheric chemistry, and other fields of study. However, estimating the height of the nocturnal boundary layer (NBL) is not trivial, and the techniques used so far have never estimated the top of the NBL with turbulent flux profiles (the most appropriate technique for this purpose). This work proposes an innovative methodology for calculating the height of the NBL, using data from 13 three-dimensional sonic anemometers installed on the towers of the ATTO experimental site, located in the central Amazon. Two days were used, one characteristic of the rainy season and the other of the dry season. The results showed that the flux convergence methodology is promising for determining the NBL height. It was observed that, during the dry season, the heights were lower (average of 86.60 m) compared to the rainy season (average of 160.42 m). The higher heights during the rainy season can be attributed to the greater presence of clouds during this period, resulting in a higher amount of longwave radiation emitted by these clouds. This influences the increase in turbulence due to the available radiative balance and, consequently, resulting in higher NBL heights. These results will be further explored with the use of a larger dataset.

Keywords: Amazon rainforest; ATTO Tower; Turbulent fluxes

1 INTRODUÇÃO

A camada limite atmosférica (CLA) é a porção mais baixa da atmosfera, que está em contato com a superfície e é influenciada por esta (Stull, 1988), e em razão dessa influência a CLA é variável no tempo e espaço (Garrat, 1992). A CLA apresenta uma fase convectiva chamada de Camada Limite Convectiva (CLC) que surge em resposta ao aquecimento da superfície logo após o nascer do sol, quando o fluxo de calor sensível torna-se positivo (Stull, 1988), e uma fase estável denominada Camada Limite Noturna (CLN) (Garrat, 1992; Stull, 1988) que apresenta características diferentes da CLC, em resposta ao resfriamento da superfície pelo cessar da fonte térmica de turbulência (radiação solar) e inversão do fluxo de calor sensível (Carneiro e Fisch, 2016). Outrossim, a CLA é influenciada pelo tipo de cobertura da superfície, elementos meteorológicos, que afetam a distribuição de energia e momentum entre superfície e atmosfera. A altura da CLA (z_i) apresenta variações no decorrer do dia, influenciada pela turbulência, e isso se estende até sua profundidade máxima, aproximadamente 1-2 km para a região amazônica (Fisch *et al.*, 2004; Souza *et al.*, 2023). A variável z_i é

um parâmetro importante para a micrometeorologia, as trocas de energia e momento são influenciadas por ele, além disso os maiores vórtices turbulentos locais estão associados a z_i (Grass *et al.*, 1991). Nas últimas décadas, vários trabalhos têm sido desenvolvidos com o foco nas estimativas da altura da CLA, para condições diurnas. Tais estimativas são realizadas por meio de medidas experimentais (Beyrich, 1997; Eresma, 2006), medidas de satélite, dados de reanálise (Dias-Junior *et al.*, 2022; Saha *et al.*, 2022), sensoriamento remoto (Carneiro e Fisch, 2016; Souza *et al.*, 2023). Contudo, a estimativa de z_i durante o período noturno não é muito frequente, especialmente para a região amazônica (Carneiro e Fisch, 2018; Dias-Junior *et al.*, 2022) Os processos atmosféricos que caracterizam a CLN são de escala de tempo da ordem de algumas horas, com extensão vertical máxima em torno de 500 m (Stull, 1988), sendo característica marcante a presença de uma camada de inversão térmica próxima à superfície. Em condições de céu claro e de ventos com velocidades de moderadas a fracas, a CLN é claramente definida (Tombrou *et al.*, 1998), sendo que a turbulência é essencialmente gerada por cisalhamento do vento, a qual é altamente intermitente. Os empuxos negativos existentes devido ao fato do maior resfriamento da superfície em comparação com a atmosfera acima, agem para suprimir a turbulência mecânica e diminuir sua profundidade, assim como os movimentos atmosféricos (tais como ondas de gravidade) podem coexistir com a turbulência, tornando sua estrutura mais complexa (Santos *et al.*, 2007). Nos poucos trabalhos sobre a CLN abrangendo diversos biomas, (Shi *et al.*, 2021; Pfister *et al.*, 2019), eles quase que exclusivamente usam equipamentos de sensoriamento remoto, radiossondagens e balão cativo para estudos da CLN. Seus resultados geralmente são superestimados para z_i noturno, pois esses equipamentos confundem muito facilmente o topo da CLN com a camada residual e concluem que em alguns casos essas metodologias não funcionam. Com isso, ainda há uma grande complexidade e pouco conhecimento dos parâmetros que descrevem a estrutura da CLN, sobretudo em regiões como a Amazônia, onde a biosfera e atmosfera interagem de forma tão intensa e complexa (Oliveira *et al.*, 2016).

Há poucos trabalhos que mostram a altura de zi noturno para essa região, como por exemplo os de Carneiro e Fisch (2020) e Dias-Júnior *et al.* (2022), contudo seus resultados apresentam valores médios para a CLN. A CLA é caracterizada como uma região turbulenta adjacente à superfície terrestre (Wyngaard, 1986). Caughey *et al.* (1979) e Lenschow *et al.* (1988) definiram a altura da CLN baseando-se na diminuição percentual das quantidades de turbulência em relação aos seus valores na superfície. Sob essa perspectiva, as características dos perfis médios, como temperatura potencial, umidade específica, vento ou propriedades de aerossóis, frequentemente usadas para diagnosticar a altura da CLN, refletem os efeitos da mistura turbulenta na CLA e, portanto, não capturam diretamente a sua definição fundamental. Infelizmente, perfis verticais de quantidades de turbulência são difíceis de medir e frequentemente não estão disponíveis para determinar zi. Contudo, recentemente (a partir de meados de 2021) as torres do projeto ATTO (Amazon Tall Tower Observatory) foram instrumentadas com 19 anemômetros sônicos, o que permite a estimativa direta de zi durante o período noturno e as primeiras horas da manhã, enquanto a altura da CLA está abaixo da torre alta (325 m). Este trabalho tem como objetivo propor uma metodologia para estimar a altura da CLN a partir da análise dos perfis dos fluxos turbulentos de calor sensível medidos no sítio ATTO, localizado na região da Amazônia central. Para isso, foram avaliadas uma noite durante a estação chuvosa e uma noite durante a estação seca.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Sítio experimental e dados

Foram usados dados coletados no sítio experimental ATTO, localizado na Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã, aproximadamente 150 km do nordeste da cidade de Manaus em região de floresta tropical intocada (Andreae *et al.*, 2015). Nessa região a floresta tropical densa se caracteriza por uniformidade do

dossel, a copa das árvores alcança geralmente 36 m de altura (Andreae *et al.*, 2015). Caracterizada como mata de terra firme, apresenta árvores mais altas e densas, localizadas em regiões mais altas que não são inundadas pelos rios. Neste trabalho recorreu-se a dados de resposta rápida (10 Hz) coletados por anemômetros sônicos 3D instalados em 13 alturas diferentes acima da dossel (Tabela 1 e Figura 1). Foram utilizadas medidas de temperatura do ar e das três componentes da velocidade do vento (u, v e w). Os fluxos turbulentos de calor sensível foram obtidos a cada 5 minutos, por meio do método de covariâncias dos vórtices turbulentos, descritos por Webb *et al.* (1980).

Tabela 1 – Instrumentos usados e medidas obtidas em cada nível aplicadas na estimativa dos fluxos turbulentos acima do sítio experimental ATTO

Modelos dos instrumentos	Alturas das medidas (m)	Dados
CSAT 3B (Campbell Scientific)	316; 196; 50;35	Velocidade do vento (u, v, w) e temperatura
Thies 3D Sonic (Clima)	298; 274; 247; 223; 172; 151; 127; 100; 81	Velocidade do vento (u, v, w) e temperatura

Fonte: Autores (2024)

As análises principais desta pesquisa foram realizadas utilizando um dia de dados coletados na estação chuvosa (06/03/2022), e um dia coletado na estação seca da região (10/08/2022) com instrumentos de alta frequência (10 Hz) instalados na torre ATTO em diferentes alturas (Figura 1 e Tabela 1).

Figura 1 – a) Anemômetro Sônico CSAT e b) Anemômetro THIES usados para obtenção dos fluxos de calor sensível acima do Sítio ATTO, c) torre de 325 m no sítio estudado

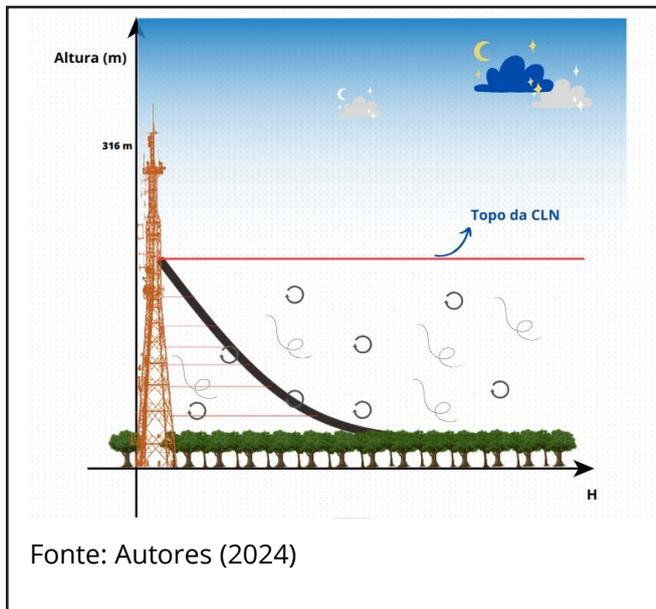


Fonte: Autores (2024)

2.2 Métodos

Com os fluxos turbulentos estimados em diferentes alturas, foram aplicados alguns filtros que removessem os valores discrepantes de calor sensível, para garantir que pudessem ser utilizados na estimativa da CLN. A partir de então, a altura da CLN foi determinada como a altura na qual o fluxo de calor sensível foi igual ou menor que 5% daquele encontrado no dossel florestal (35 m) (Figura 2). Sabe-se que no topo da camada limite atmosférica a turbulência cessa e os fluxos turbulentos tendem a ser nulos (Stull, 1988), sob essa perspectiva zi noturno foi determinado.

Figura 2 – Representação da metodologia usada para determinar a altura da CLN. A linha horizontal demonstra o topo da CLN acima do sítio ATTO, na Amazônia Central



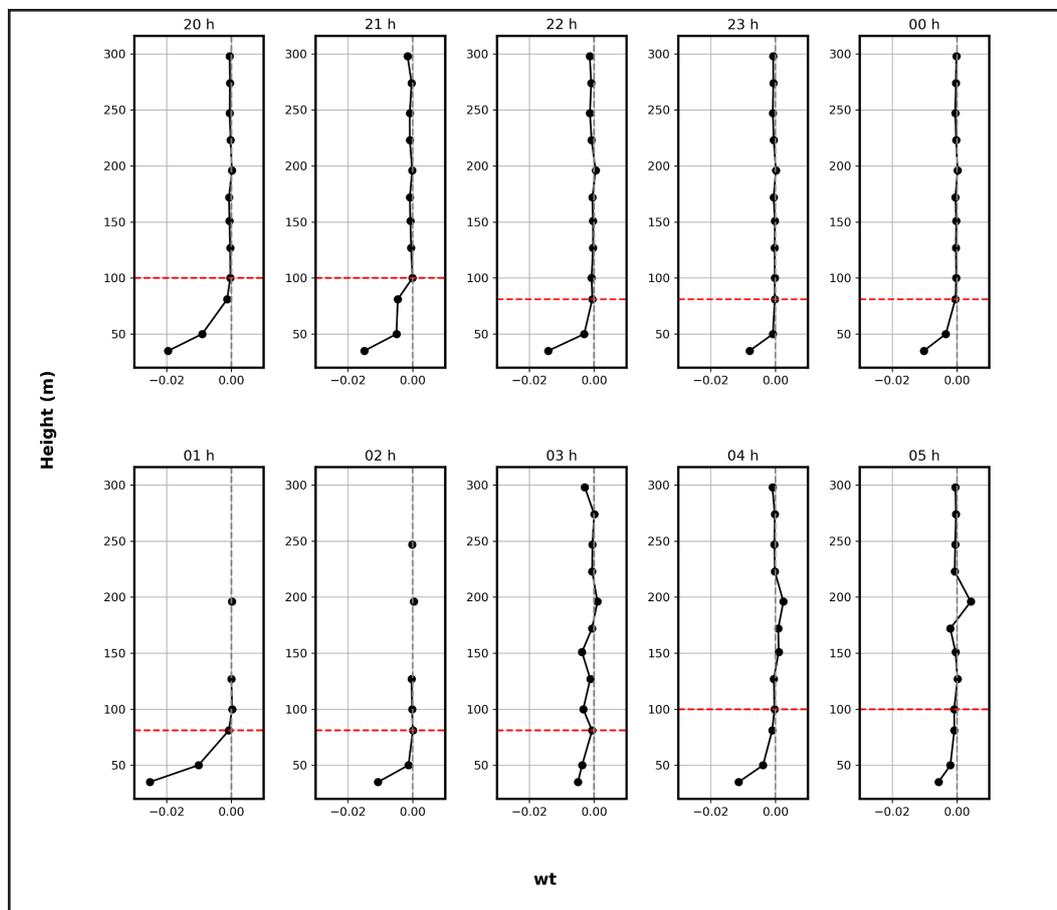
Fonte: Autores (2024)

3 RESULTADOS

3.1 Altura da CLN em dia de estação seca

Na Figura 3 a altura da CLN é estimada, a partir de perfis médios de fluxos de calor sensível, para diferentes horários do dia 10/08/2022, dia típico de estação seca na região. Nota-se que às 20h (Hora Local) a CLN está em 100m e a partir das 22h ela decresce para 80m, esse decrescimento pode estar associado a perda radiativa durante a noite. Contudo algumas horas antes do amanhecer ela começa a crescer, atingindo 100m às 5h. Esse crescimento da CLN pode ser resposta às forçantes turbulentas do dia seguinte que começaram atuar, intensificando a turbulência.

Figura 3 – Perfis de fluxo de calor sensível para o dia de 10/08/2022, dia característico da estação seca da região da Amazônia central. A linha horizontal pontilhada representa a altura da CLN para diferentes horários acima do sítio ATTO

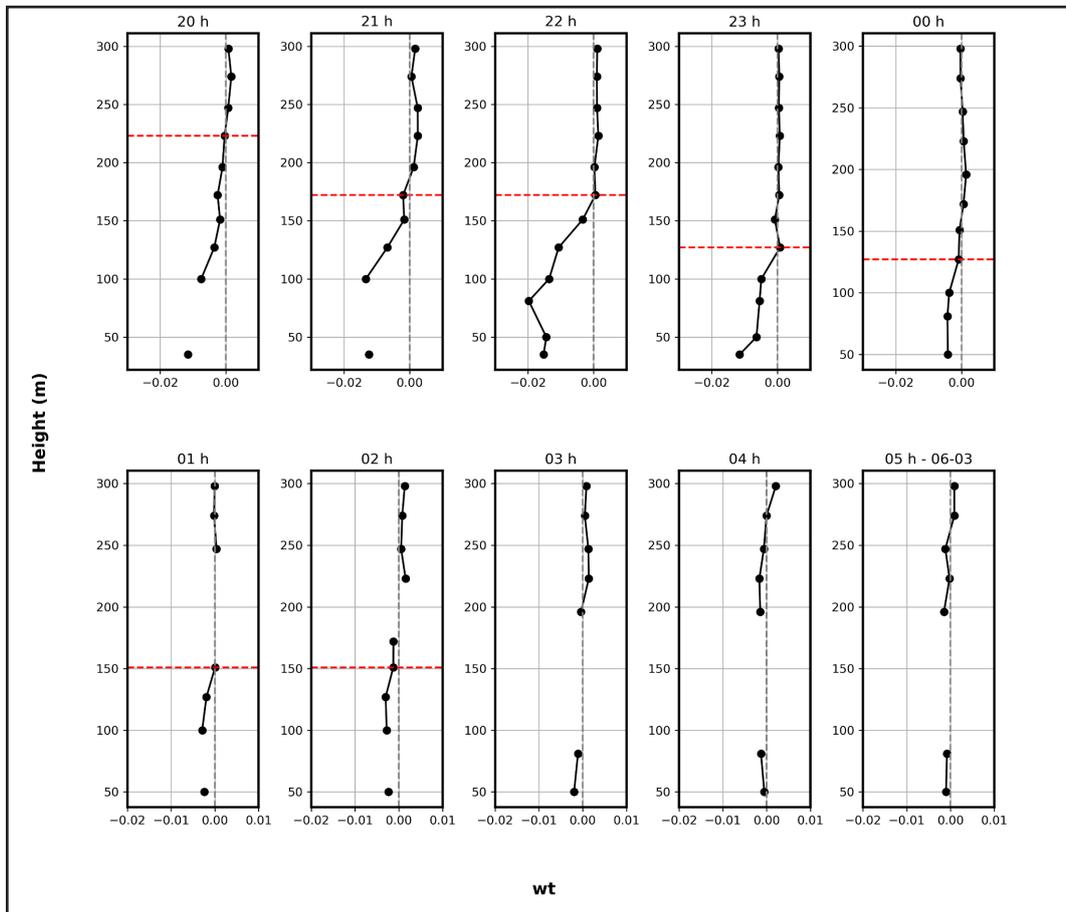


Fonte: Autores (2024)

3.2 Altura da CLN em dia de estação chuvosa

Assim como na Figura 3, z_i noturno é estimado a partir de perfis de calor sensível e apresentado na Figura 4, contudo para um dia característico de estação chuvosa da região central da Amazônia (06/03/2022). Uma das características da estação chuvosa é a maior quantidade de nuvens, estas por sua vez contribuem para uma maior emissão de radiação de onda longa e conseqüentemente maior saldo radiativo, em relação ao período seco. Tais motivos contribuem para maiores alturas da CLN, o que é observado na Figura 4. Às 20h CLN estava em 223m e decresce até atingir 151m.

Figura 4 – Perfis de fluxo de calor sensível para o dia de 06/03/2022, dia característicos da estação chuvosa da região da Amazônia central. A linha horizontal pontilhada representa a altura da CLN para diferentes horários acima do sítio ATTO



Fonte: Autores (2024)

4 CONCLUSÃO

Com base nos resultados encontrados, observa-se que os fluxos de calor sensível podem ser utilizados como uma metodologia promissora para obtenção da altura da CLN. E que por meio desta pode fornecer, pela primeira vez, uma série contínua de alturas da CLN para a região central da Amazônia, usando a real definição de CLA. Dessa forma, os fluxos turbulentos medidos nas torres do projeto ATTO podem ser uma opção metodológica para o aprimoramento do conhecimento sobre as reais

alturas da CLN na região, assim como preenchimento de lacunas existentes a respeito de sua estrutura.

REFERÊNCIAS

ANDREAE, Meinrat O. et al. 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.

BEYRICH, F. Mixing height estimation from sodar data—a critical discussion. **Atmospheric Environment**, v. 31, n. 23, p. 3941-3953, 1997.

CAICEDO, Vanessa et al. Comparison of aerosol lidar retrieval methods for boundary layer height detection using ceilometer aerosol backscatter data. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 10, n. 4, p. 1609-1622, 2017.

CARNEIRO, Rayonil Gomes; FISCH, Gilberto; KAUFMANN, Thomas. Determinação da altura da camada limite planetária na floresta Amazônica utilizando um Ceilometer. **Ciência e Natura**, v. 38, p. 460-466, 2016.

CARNEIRO, Rayonil G.; FISCH, Gilberto. Observational analysis of the daily cycle of the planetary boundary layer in the central Amazon during a non-El Niño year and El Niño year (GoAmazon project 2014/5). **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 20, n. 9, p. 5547-5558, 2020.

DIAS-JÚNIOR, Cléo Quaresma et al. Intercomparison of planetary boundary layer heights using remote sensing retrievals and ERA5 reanalysis over Central Amazonia. **Remote Sensing**, v. 14, n. 18, p. 4561, 2022.

DIAS, Nelson Luís et al. O método de covariâncias turbulentas atenuadas (MCTA) para medição dos fluxos de calor sensível e latente: aplicação ao lago de Itaipu e seu redor. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 1, p. 143-160, 2002.

ERESMAA, N. et al. Mixing height determination by ceilometer. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, v. 5, n. 6, p. 12697-12722, 2005.

FISCH, G. et al. The convective boundary layer over pasture and forest in Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, p. 47-59, 2004.

GRASS, A. J.; STUART, R. J.; MANSOUR-TEHRANI, M. Vortical structures and coherent motion in turbulent flow over smooth and rough boundaries. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Physical and Engineering Sciences**, v. 336, n. 1640, p. 35-65, 1991.

HENKES, Alice et al. Morning boundary layer conditions for shallow to deep convective cloud evolution during the dry season in the central Amazon. **Atmospheric Chemistry and Physics**

Discussions, v. 2021, p. 1-29, 2021.

OLIVEIRA, Pablo Eli Soares et al. Análise da turbulência atmosférica na camada limite noturna em uma região de Floresta Amazônica. **Ciência e Natura**, v. 38, p. 157-162, 2016.

PINTO, Leandro Della Vedova de Oliveira; ROCHA, Humberto Ribeiro da. Cálculo dos fluxos turbulentos de energia e CO₂ IND. 2ª superfície pelos métodos de "Eddy Correlation" e do co-espectro. **A meteorologia brasileira além do ano 2000: Resumos**, 2000.

SAHA, Sourita et al. Investigation of atmospheric boundary layer characteristics using ceilometer lidar, COSMIC GPS RO satellite, radiosonde and ERA-5 reanalysis dataset over Western Indian region. **Atmospheric Research**, v. 268, p. 105999, 2022.

SANTOS, Rosa Maria N.; FISCH, Gilberto; DOLMAN, A. J. Modelagem da camada limite noturna (CLN) durante a época úmida na Amazônia, sob diferentes condições de desenvolvimento. **Revista brasileira de meteorologia**, v. 22, p. 387-407, 2007.

SHI, Yu et al. Nocturnal boundary layer evolution and its impacts on the vertical distributions of pollutant particulate matter. **Atmosphere**, MDPI, v. 12, n. 5, p. 610, 2021

SOUZA, C.M.A.; DIAS-JÚNIOR, C.Q.; D'OLIVEIRA, F.A.F.; MARTINS, H.S.; CARNEIRO, R.G.; PORTELA, B.T.T.; FISCH, G. Long-term measurements of the atmospheric boundary layer height in Central Amazonia using remote sensing instruments. **Remote Sensing**, v. 15, n. 13, p. 3261, 2023. DOI: 10.3390/rs15133261. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs15133261>.

STULL, Roland B. An introduction to boundary layer meteorology. **Springer Science & Business Media**, 1988.

TOMBROU, M.; FOUNDA, D.; BOUCOUVALA, D. Nocturnal boundary layer height prediction from surface routine meteorological data. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 68, p. 177-186, 1998.

WEBB, E. K.; PEARMAN, Graeme I.; LEUNING, Ray. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 106, n. 447, p. 85-100, 1980.

Contribuições de Autoria

1 – Carla Maria Alves de Souza

Graduada em Física pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA) e mestranda no Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente (PPG-CLIAMB)

<https://orcid.org/0009-0008-0934-0059> • cmads.mcl23@uea.edu.br

Contribuição: Conceitualização, Análise Formal, Investigação, Metodologia, Software, Escrita – Primeira Redação

2 – Anne Cristiny Santos de Mendonça

Licenciada em Matemática pela UEA, Engenheira de Controle e Automação pela UNIP e Mestre em Clima e Ambiente INPA - UEA

<https://orcid.org/0000-0002-7524-8073> • anne.demendonca@gmail.com

Contribuição: Conceitualização, Investigação, Metodologia, Software, Redação – Revisão & Edição

3 – Flávio Augusto Farias D’Oliveira

Graduado em Meteorologia pela UFPA com Mestrado em Meteorologia pela USP e Doutorado em Ciências Ambientais pela UFPA

<https://orcid.org/0000-0003-1123-6441> • flaviadoliveira@gmail.com

Contribuição: Conceitualização, Investigação, Metodologia, Software, Visualização de Dados, Redação – Revisão & Edição.

4 – Gilberto Fisch

Meteorologista pela USP, Mestrado e Doutorado pelo INPE. Pesquisador Titular Aposentado do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE/DCTA) e Professor Titular da UNITAU

<https://orcid.org/0000-0001-6668-9988> • fisch.gilberto@gmail.com

Contribuição: Escrita – Revisão & Edição, Visualização de Dados.

5 – Carlos Alberto Quesada

Doutorado em Ecologia e Mudanças Globais pela Universidade de Leeds. Atualmente é Pesquisador Titular do INPA

<https://orcid.org/0000-0001-7178-9713> • quesada.beto@gmail.com

Contribuição: Recursos, Administração do Projeto, Financiamento

6 – Rayonil Gomes Carneiro

Meteorologista formado pela UFAL com Mestrado em Meteorologia pela UFCG e Doutorado pelo INPE

<https://orcid.org/0000-0003-4403-0191> • rayonilcarneiro@gmail.com

Contribuição: Visualização de Dados

7 – Bruno Takeshi Tanaka Portela

Graduação em Meteorologia pela UFPA e Pós-Graduação em Clima e Ambiente pelo INPA e pela UEA

<https://orcid.org/0000-0002-1223-6665> • brunotakeshi@gmail.com

Contribuição: Recursos, Administração do Projeto

8 – Jailson Ramos da Mata

Graduação em Tecnologia em Eletrônica Industrial pelo IFAM. Foi bolsista de Iniciação Tecnológica no INPA (2022 - 2023)

<https://orcid.org/0009-0007-0124-8808> • jailson.mata97@gmail.com

Contribuição: Visualização de Dados, Metodologia

9 – Leonardo de Oliveira Ramos

Tecnólogo em Eletrônica formado pela UEA. Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pela UFAM e responsável pelo Laboratório de Instrumentação Eletrônica do INPA

<https://orcid.org/0009-0008-7630-172X> • lrdo87@gmail.com

Contribuição: Visualização de Dados, Metodologia

10 – Thiago de Lima Xavier

Graduação em Engenharia Ambiental pela ULBRA e bolsista no INPA

<https://orcid.org/0009-0000-5403-7384> • thiagolimaxavier2020@gmail.com

Contribuição: Visualização de Dados, Metodologia

11 – Cléo Quaresma Dias Júnior

Mestre em Ciências Ambientais pela UFPA e Doutor em Clima e Ambiente pelo INPA. Professor dos Programas de Pós-Graduação em Clima e Ambiente no INPA e Ciências Ambientais na UFPA

<https://orcid.org/0000-0003-4783-4689> • cleoquaresma@hotmail.com

Contribuição: Conceituação, Análise Formal, Investigação, Administração do Projeto, Recursos, Curadoria de Dados, Supervisão, Validação, Visualização de Dados, Escrita – Revisão & Edição

Como citar este artigo

SOUZA, C. M. A. de; MENDONÇA, A. C. S. de; D'OLIVEIRA, F. A. F.; FISCH, G.; QUESADA, C. A.; CARNEIRO, R. G.; PORTELA, B. T. T.; MATA, J. R. da; RAMOS, L. de O.; XAVIER, T. de L.; DIAS JÚNIOR, C. Q. Perfis de fluxos turbulentos usados para a estimativa da altura da camada limite noturna na Amazônia Central. **Ciência e Natura**, v. 46, esp. 2, e87724, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460X87724>.