

Edição Especial

Climatologia da altura da camada limite atmosférica na Amazônia Central

Climatology of the height of the atmospheric boundary layer in the Central Amazon

Carla Maria Alves de Souza^{I,III} , Cléo Quaresma Dias Júnior^{I,II} ,
Hardiney dos Santos Martins^{II} , Flávio Augusto Farias D'Oliveira^{III} ,
Luiz Augusto Toledo Machado^{III} , Rayonil Gomes Carneiro^{IV} ,
Gilberto Fernando Fisch^V 

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

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

^{III} IMax Planck Institute for Chemistry, Mainz, Alemanha

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

^V Universidade de Taubaté, Taubaté, São Paulo, Brasil

RESUMO

A Camada Limite Planetária (CLP) é a região mais baixa da atmosfera e interage diretamente com a superfície. A altura da CLP é um parâmetro chave para várias áreas do conhecimento, especialmente para a previsão de tempo e clima, dispersão de poluentes e qualidade do ar. Neste trabalho foram usados dados de um ceilômetro localizado no sítio experimental ATTO (Amazon Tall Tower Observatory) para a obtenção da altura da CLP entre os anos de 2014 a 2020. Os resultados mostraram que em anos de El Niño a altura da CLP apresenta maiores amplitudes quando comparada com anos de La Niña. Também encontrou-se que o mês com maior amplitude da altura da CLP, é setembro.

Palavras-chave: Camada limite planetária; Floresta amazônica; Taxa de crescimento da CLP

ABSTRACT

The Planetary Boundary Layer (PBL) is the lower portion of the atmosphere and interacts directly with the surface. The height of the PBL is a key parameter for several areas of knowledge, especially for Weather and climate forecasting, pollutant distribution and air quality. In this work, data from a ceilometer located at the ATTO experimental site (Amazon Tall Tower Observatory) were used to obtain the PBL height between the years 2014 to 2020. The results showed that in El Niño years the height of the PBL has greater amplitudes When compared to La Niña years. It was that the month with the greatest amplitude of the PBL height is September.

Keywords: Planetary Boundary Layer; Amazon rainforest; PBL growth rate



1 INTRODUÇÃO

Os processos de trocas de energia, momentum e matéria entre a superfície e a atmosfera terrestre são influenciados por diferentes fatores, dentre eles a altura da camada limite planetária (CLP). A CLP é a camada mais baixa da atmosfera, por esse motivo está em constante interação com a superfície terrestre. O ciclo da CLP atua em resposta ao aquecimento da superfície proveniente da radiação solar incidente, dessa forma, há uma fase convectiva durante o dia, denominada Camada Limite Convectiva (CLC), e outra fase, estável, no período da noite, denominada Camada Limite Noturna (CLN), que é resposta ao resfriamento. No seu ciclo, a CLP apresenta variações de temperatura, vento, e outras variáveis, devido à turbulência atmosférica e aos processos convectivos que acontecem de forma tridimensional e caótica, nas escalas de comprimento de milímetros até a profundidade da CLP, entre 1 e 2 km (Wang *et al.*, 2016). Portanto, uma boa representação da CLP é crucial para diversos estudos, como por exemplo: previsão do tempo e modelagem climática, análise da qualidade do ar, técnicas agrícolas. Ademais, uma representação mais realista da CLP propiciará uma melhor caracterização da convecção e da chuva (Henkes *et al.*, 2021).

A altura da CLP pode ser determinada através de radiossondas ou por instrumentos de sensoriamento remoto (LIDAR Doppler, SODAR, Ceilometer) (Carneiro *et al.*, 2018) e, mais recentemente, através de dados de reanálises, como por exemplo o ERA5 (Dias-Junior *et al.*, 2022). Carneiro *et al.* (2016), em seu estudo sobre a altura da CLP na Amazônia, utilizando dados de ceilômetro, demonstraram que para a estação seca a altura máxima da CLP foi de 1645m e para a estação chuvosa foi de 1245m. Recentemente Dias-Junior *et al.* (2022) compararam resultados de altura da CLP obtidos via ERA5, com dados experimentais obtidos via radiossondas, ceilômetro e SODAR. A partir deste comparativo, eles propuseram uma correção para a altura da CLP obtida via ERA5. Contudo, estes trabalhos possuem uma quantidade limitada de dados experimentais.

No presente estudo usamos 6 anos de dados de um ceilômetro instalado no sítio experimental do ATTO (Amazon Tall Tower Observatory, Andreae *et al.* 2015) para investigarmos a variabilidade da altura da CLP acima da floresta amazônica. Constatamos que a CLP apresenta maiores alturas nas estações secas, 1700 m, e nas estações chuvosas cerca de 1200m, nos anos de El Niño a CLP alcança maiores amplitudes, 1650 m, enquanto que nos anos de La Niña atinge menores alturas, 1400 m. As taxas de crescimento mais elevadas ocorreram no mês de setembro. Acreditamos que esse trabalho poderá contribuir para parametrizações mais confiáveis dentro de Modelos de Previsão Numérica e Tempo (PNT), para um melhor entendimento do papel das estações chuvosas, secas, anos de El Niño e La Niña na variabilidade da CLP.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Sítios experimental

O estudo foi realizado utilizando dados do sítio experimental localizado na Amazônia Central, denominado Amazon Tall Tower Observatory (ATTO). O ATTO está localizado em uma região de floresta tropical (02° 08' 44.69" S - 59° 00' 17.44" W) a 130 m acima do nível do mar. Na Amazônia, o clima está diretamente ligado à disposição de chuva, apresentando estação chuvosa (fevereiro até maio) e seca (agosto a outubro). Essa distribuição de chuva e quantidade de umidade no solo influencia diretamente na divisão de energia entre os fluxos de calor latente e sensível (Fisch *et al.* 1998).

2.2 Dados

Foram usados dados de um ceilômetro de 2014 a 2020. Em alguns anos o ceilômetro funcionou durante o ano todo, mas em outros anos funcionou apenas na estação seca ou chuvosa (Tabela I). Nos seis anos analisados houveram períodos de maior captura de dados, por exemplo os anos de 2015, 2018 e 2020, (Tabela 2). Os

anos de 2014, 2016 e 2019 tiveram menores quantidades de dados em comparação aos outros anos.

Tabela 1 – Estação de coleta de dados

Ano	Estação de Coleta
2014	Chuvoso
2015	Seco e Chuvoso
2016	Chuvoso
2018	Chuvoso e Seco
2019	Início do Chuvoso e Seco
2020	Chuvoso e Seco

Fonte: Autores

Tabela 2 – Relação entre dados coletados e dados usados

Ano	Dias	Período	Dados Usados
2014	18	08/12/14 até 31/12/2014	16
2015	273	01/01/15 até 31/12/2015	216
2016	64	01/01 até 29/04/2016	28
2018	291	14/01 até 25/11/2018	211
2019	99	25/01, 07/07 até 15/08, 07/10 até 08/12, 25/12 até 31/12/2019	66
2020	328	01/01/20 até 31/12/2020	246

Fonte: Autores

2.3 Ceilometer

A CLP foi monitorada através de um ceilômetro modelo CHM15k (Alemanha). É um equipamento de sensoriamento LIDAR que grava a intensidade do retroespalhamento óptico no comprimento de onda no infravermelho próximo. Então, a base das nuvens é encontrada, e com isso a altura da CLP é estimada (Carneiro *et al.*, 2016).

Sendo um instrumento de alta frequência (com taxa de amostragem de 16 s) é uma ferramenta poderosa para estimar a altura da CLP. Assim, pode-se ver em detalhes todo o ciclo da CLP (diurna e noturna). A intensidade do retroespalhamento depende não somente das concentrações das partículas no ar, mas também de suas propriedades

de reflexão que estão relacionadas com a umidade (Carneiro, 2018).

2.4 Métodos

Primeiramente, removeu-se os valores da altura da CLA, que estiveram fora de um range considerado apropriado para a região amazônica (durante o dia de 1 a 2 km e durante a noite de 100 a 200 m) (Arya, 2001). A taxa de crescimento da CLA foi estimada entre 13 h (UTC) e 19 h (UTC) . Para a determinação dessa taxa recorreu-se à seguinte equação:

$$Tc = \frac{dh}{dt} \quad (1)$$

Onde Tc é a taxa de crescimento da CLA, dh é a diferença entre a altura (máxima) atingida pela CLA às 19 (UTC) e a altura (mínima) atingida às 13 h (UTC), dt é a diferença entre os tempos marcados nas referidas alturas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ciclo Diário Médio da Camada Limite Atmosférica

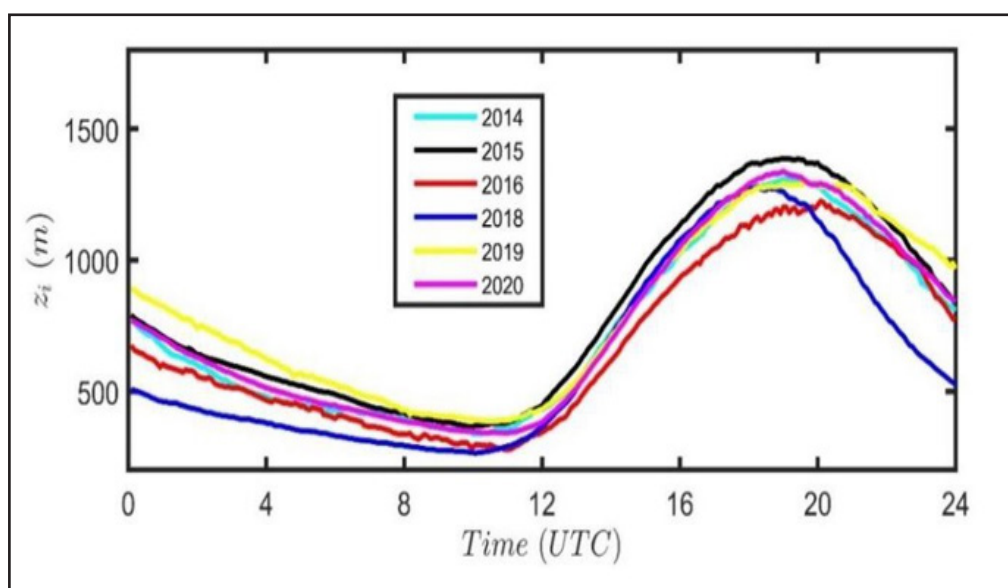
A Figura 1 mostra os ciclos anuais médios da CLP para os anos de 2014, 2015, 2016, 2018, 2019 e 2020. Nota-se que há um comportamento padrão nos anos analisados: de 20 h até aproximadamente 10 h (UTC) percebe-se um decrescimento da CLA, o que era previsto devido ao predomínio da CLN, que tem início com o pôr do sol, na qual a intensidade turbulenta diminui drasticamente pelo cessar do aquecimento da superfície (Stull, 1988).

No intervalo de 11 h (UTC) até 20 h (UTC) verifica-se um crescimento acentuado da CLA, pois o comportamento da CLP é influenciado diretamente pelas trocas turbulentas de calor e pela umidade com a superfície (Markowski e Richardson, 2010). Percebe-se que durante o intervalo entre 12h e 18h (UTC) há um acentuado crescimento da

CLA, apresentando um pico de sua altura (aproximadamente 1400 m) por volta de 20 h (UTC). Entre 18 h e 20h a declividade da curva da altura da CLP é menor, o que denota uma menor taxa de crescimento neste intervalo. Este comportamento deve estar associado com a diminuição do fluxo de calor sensível (Carneiro *et al.*, 2018). Há, também, diferenças entre os máximos de altura da CLP entre os anos observados.

O ano de 2015 (linha em preto) apresenta uma maior altura da CLP, este fato deve estar associado com o efeito de El Niño ocorrido neste ano. O ano com a menor altura observada é o ano de 2016 (linha em vermelho), associado com a presença de La Nina.

Figura 1 – Ciclo diário médio anual da altura da camada limite planetária medida acima do sítio experimental do ATTO, na Amazônia Central



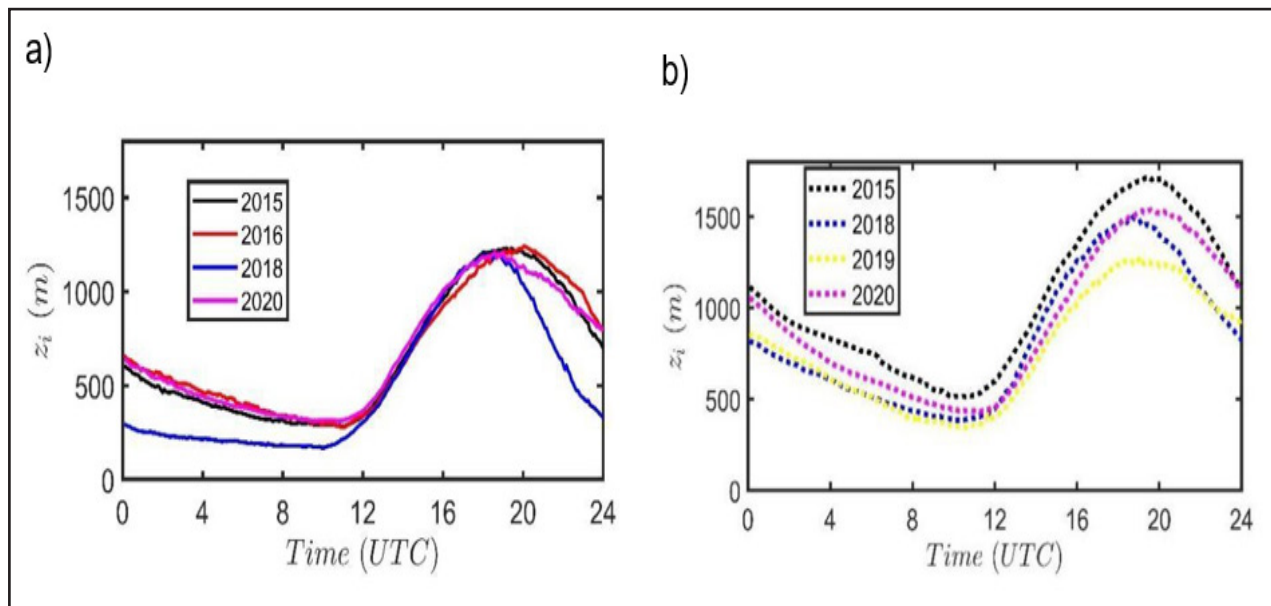
Fonte: Autores/as (2023)

3.2 Período Seco e Chuvoso na CLA

A Figura 2 mostra o comportamento da altura da CLP nos períodos chuvosos dos anos de 2015, 2016, 2018 e 2020 da Amazônia Central. Observa-se um comportamento padrão da CLA, que tem sua amplitude aumentada conforme a intensificação da radiação solar e reduz de tamanho com a redução do fluxo de calor.

Contudo, percebe-se que a CLA atinge maiores alturas, entre 1600 m e 1700 m, no período seco, principalmente no ano de 2015 (linha em preto), ano de El Niño, como já citado, enquanto que no período chuvoso a CLA apresenta alturas próximas de 1200 m. Carneiro, Fisch e Kaufmann (2016) apresentam que no período chuvoso, que se inicia em janeiro e finda em maio, na Amazônia, a umidade do ar é mais elevada se comparada com a estação seca, assim como a quantidade de nuvens presentes na atmosfera, fatores esses que impedem a incidência direta da radiação solar na superfície, o que contribuem para a redução do fluxo de calor. Na estação observa-se que o fluxo de calor sensível torna-se positivo mais cedo (Carneiro, Fisch e Kaufmann, 2016) e, conseqüentemente, origina maiores turbilhões no decorrer do dia. Esses turbilhões são responsáveis pela maior altura observada para a estação seca.

Figura 2 – Ciclo diário médio da altura da camada limite planetária no período chuvoso (a) e seco (b) acima do sítio experimental do ATTO, na Amazônia Central



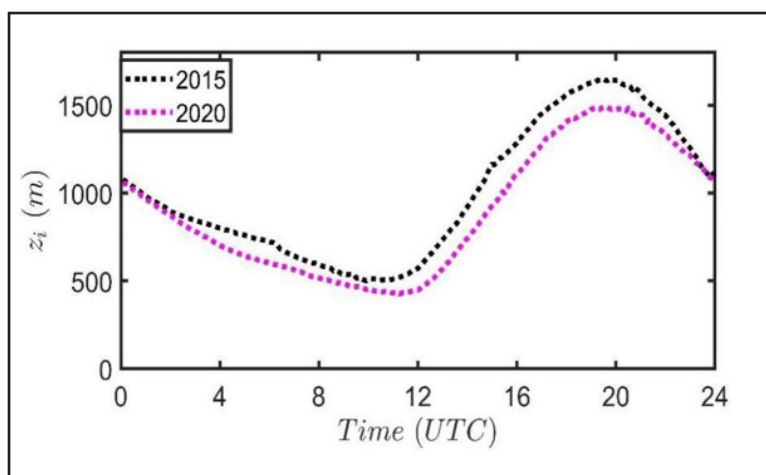
Fonte: Autores/as (2023)

3.3 El Niño e La Niña na CLA

A figura 3 mostra o ciclo diário médio da CLA em um ano (2015) de EL Niño (linha tracejada em preto) e de La Niña (linha tracejada majenta) ano (2020). Nota-se um

comportamento semelhante ao observado anteriormente, decréscimo da altura entre 00h até 12h UTC, crescimento de 12h até 20h com máximo de z_i às 20h. Observa-se que o máximo de z_i para o ano de El Niño é maior (1650m) comparativamente ao ano de La Niña (1400m). Conforme discutido por Fisch *et al.* (1998), em anos de El Niño há menor cobertura de nuvens na região Amazônica, assim promovendo maior incidência de radiação solar e com média de temperatura maior, conseqüentemente há formação de plumas convectivas maiores e mais energéticas, dessa maneira promovendo uma altura da CLP maior. Para o período de La Niña, observa-se maior cobertura de nuvens na região Amazônica com conseqüente diminuição da incidência de radiação solar e diminuição da temperatura média, estes fatores associados estabelecem plumas convectivas de menor extensão e energia, gerando uma menor altura de CLP (Dias- Junior *et al.*,2022).

Figura 3 – Ciclo diário médio da CLA em anos de EL Niño e La Niña



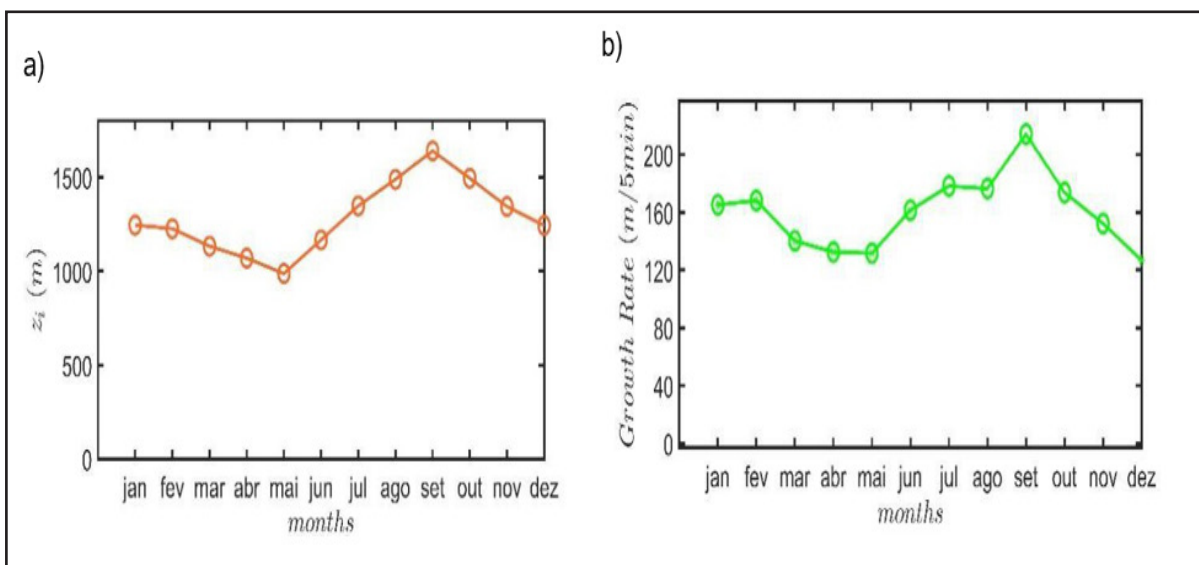
Fonte: Autores/as (2023)

3.4 Alturas máximas mensais da CLA

A figura 4 representa as médias das taxas (figura 4b) e alturas (figura 4a) máximas atingidas pela CLA nos anos estudados. Nota-se que o mês de setembro a CLA atinge

as maiores amplitudes, cerca de 1700 m, e a taxa de crescimento também alcança maiores valores nesse mês, aproximadamente 210 m/5min o equivalente a 42 m/min. Fisch *et al.* (1998) discutem que o máximo de temperatura para a região de Manaus (distante 150Km do sítio experimental) ocorre no mês de Setembro, associado a este fato temos que a energia que atinge a superfície terrestre é devolvida para a atmosfera na forma de fluxo de calor sensível (aquecimento) e latente (evapotranspiração), estabelecendo plumas convectivas mais energéticas (Carneiro, Fisch e Kaufmann 2016). Nota-se também que o mês de Maio apresenta a menor altura e taxa de crescimento da CLP. De acordo com Fisch *et al.* (1998) o mês de Abril é o que apresenta uma menor temperatura. Acredita-se que esse fato decorra da maior cobertura de nuvens neste período, o que retarde o início do período de fluxo de calor positivo para a evolução diária da CLP (Dias-Junior *et al.*, 2022).

Figura 4 – Alturas máximas da CLP (a) e taxas de crescimento máximo da CLP (b).
Acima do sítio ATTO na Amazônia central



Fonte: Autores/as (2023)

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados encontrados, nota-se que a altura da Camada Limite Planetária (CLP) apresenta sazonalidade e influência direta de fatores diversos relacionados ao Tempo e Clima na região. Verificou-se que a presença de cobertura de nuvens e início do processo de erosão da Camada Limite Estável, formada no período noturno, são fatores importantes para a definição da taxa de crescimento da CLP e consequentemente do máximo de altura alcançada no período. Assim, nota-se que em anos de EL Niño a CLA apresenta maiores alturas, associada com a presença de maiores e mais energéticas plumas convectivas. O início mais precoce do período de fluxo de calor sensível positivo e a maior incidência de radiação solar devido a uma menor cobertura de nuvens desempenham papel importante para a altura máxima da CLP. Assim, para o ano de LA Niña a CLP tem menor altura em comparação à média anual dos anos típicos de EL Niño. Desta forma, nas estações chuvosas da região, a CLP apresenta menores alturas quando comparada com as estações secas, o que corrobora com a importância da cobertura de nuvens como fator importante para a definição da altura da CLP na Amazônia. Por fim, acredita-se que a maior cobertura de nuvens e sua consequente menor incidência de radiação solar são mecanismos chaves para o comportamento da altura máxima da CLP na região estudada.

REFERÊNCIAS

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.; DITAS, F.; DITZ, R.; GODOI, A. F. L.; GODOI, R. H. M.; HEIMANN, M.; HOFFMANN, T.; KESSELMEIER, J.; KÖNEMANN, T.; KRÜGER, M. L.; LAVRIC, J. V.; MANZI, A. O.; LOPES, A. P.; MARTINS, D. L.; MIKHAILOV, E. F.; MORAN-ZULOAGA, D.; NELSON, B. W.; NÖLSCHER, A. C.; NOGUEIRA, D. S.; PIEDADE, M. T. F.; PÖHLKER, C.; PÖSCHL, U.; QUESADA, C. A.; RIZZO, L. V.; RO, C.-U.; RUCKTESCHLER, N.; Sá, L. D. A.; Sá, M. de O.; SALES, C. B.; SANTOS, R. M. N. dos; SATURNO, J.; SCHÖNGART, J.; SÖRGE, M.; SOUZA, C. M. de; SOUZA, R. A. F. de; SU1, H.; TARGHETTA, N.; TÓTA, J.; TREBS, I.; TRUMBORE, S.; VAN EIJCK, A.; WALTER, D.; WANG, Z.; WEBER, B.; WILLIAMS, J.; WINDERLICH, J.; WITTMANN, F.; WOLFF1, S.; YÁÑEZ-SERRANO, A. M. The Amazon Tall Tower Observatory (ATTO): overview of pilot measurements on ecosystem ecology. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 15, p. 10723– 10776, 2015.

CARNEIRO, R.G.; FISH,G.; BORGES, C.K; MOURA, M.A.L.; ANDRADE, A.M.D.; SANTOS,A.B. Avaliação do ciclo da Camada Limite Planetária na região Amazônica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.11, n.01, 2018, p. 57-69.

CARNEIRO, R.G.; FISCH, G.; KAUFMANN, T. Determinação da Altura da Camada Limite Planetária na Floresta Amazônica Utilizando um Ceilometer. **Ciência e natureza**, v. 38, 2016, p.460-466.

CARNEIRO, R. G. Erosão da camada limite noturna e suas aplicações no crescimento da camada limite conectiva na região central da Amazônia. (Experimento Go Amazon 2014/15). 2018. +152p. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2018/01.18.01.59-TDI). **Tese** (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) São José dos Campos, 2018

DIAS-JUNIOR,C.Q.; Carneiro R.G.; Fish, G.; D'Oliveira, F.A.F.; Sörgel,M.; Botía,s.; Machado, L.A.T.; Wolff,S.; dos Santos, R.M.N.; Pöhlker, C. Intercomparizon of Planetry Boundary Layer Heights Using **Remote Sensing** Rtrievals and ERA5 Reanalysis ove Central. *Remote Sensing*. 2022, 14, 4561. <https://doi.org/10.3390/rs14184561>

FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 28, p. 101–126, 1998.

HENKES, A., FISCH, G., MACHADO, L. A. T., CHABOUREAU, J. P. Morning boundary layer conditions for shallow to deep convective cloud evolution the dry season in the central Amazon. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v 21, 2021, p. 13207-13225. ARYA, S. P. Introduction to micrometeorology. USA: Academic Press, 2001.

MARKOWSKI, P. M.; RICHARDSON, Y. P. Mesooscale Meteorology in Midlatitude. John Wiley and sons, 407 pp, 2010. STULL, R. An introducion to boundary layer meteorology. **USA: Kluwer Academic Publishers**, 1988.

WANG, C.; SHI, H.; JIN, L.; CHEN, H.; WEN, H. Measuring boundary-layer height under clear and cloudy conditions using three instruments. **Particuology**, v. 28, p. 15–21, 2016.

Contribuição de Autoria

1. Carla Maria Alves de Souza

Mestranda do Programa de Pós-graduação em Clima e Ambiente, INPA/UEA

<https://orcid.org/0009-0008-0934-0059> • carla.cms.souza@gmail.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

<https://orcid.org/0000-0003-4783-4689> • cleo.quaresma@ifpa.edu.br

Contribuição: Metodologia, Supervisão, Escrita – Revisão e Edição

3. Hardiney dos Santos Martins

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

<https://orcid.org/0000-0001-9059-2502> • hardiney.martins@ifpa.edu.br

Contribuição: Metodologia, Supervisão, Escrita – Revisão e Edição

4. Flávio Augusto Faria D'Oliveira

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

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

Contribuição: Metodologia, visualização de dados, Supervisão, Escrita – Revisão e Edição

5. Luiz Augusto Toledo Machado

Instituto Max Planck de Química, Departamento de Química (MPIC)

<https://orcid.org/0000-0002-8243-1706> • lmachado@if.usp.br

Contribuição: Metodologia, Supervisão

6. Rayonil Gomes Carneiro

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

<https://orcid.org/0000-0003-4403-0191> • rayonil.carneiro@inpe.br

Contribuição: Metodologia, Supervisão, Escrita – Revisão e Edição

7. Gilberto Fernando Fisch

Universidade de Taubaté (UNITAU)

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

Contribuição: Metodologia, Supervisão, Escrita – Revisão e Edição

Como citar este artigo

SOUZA, C. M. A. de; DIAS JÚNIOR, C. Q.; MARTINS, H. dos S.; D'OLIVEIRA, F. A. F.; MACHADO, L. A. T.; CARNEIRO, R. G.; FISCH, G. F. Climatologia da altura da camada limite atmosférica na amazônia central, **Ciência e Natura**, v. 45, n. esp. 2, e80266, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X82096>. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/82096>. Acesso em: dia mês abreviado ano.