

Edição Especial

Influência dos fenômenos de submeso nos parâmetros turbulentos sob diferentes condições de estabilidade da CLN da Amazônia

Influence of submeso phenomena on turbulent parameters under different conditions of stability of the NBL of the Amazon

Fabíola Carolina Pereira Valente¹ , Paulo Yoshio Kubota¹ ,
Dayana Castilho de Souza¹ , Layrson de Jesus Menezes Gonçalves¹¹ 

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP, Brasil

¹¹Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, São José dos Campos, SP, Brasil

RESUMO

O movimento de submeso escala é muito importante em condições de estratificação estável, que costumeiramente ocorre na CLN, por ser um tipo de movimento que pode desencadear a turbulência intermitente. Assim, propõe-se identificar sinais de submeso escala e verificar qual a sua relação com a variabilidade de alguns parâmetros turbulentos, sobretudo da altura do ponto de inflexão, em três noites com condição de estabilidade atmosférica diferentes. Utilizou-se dados em alta frequência (20 Hz), medidos pelos anemômetros sônicos nos 10 níveis verticais da torre micrometeorológica, localizada em um sítio experimental na Amazônia central (sítio K34). Nos dados aplicou-se da transformada de ondaleta de Morlet na variável u (vento zonal) para identificar a intensidade do sinal de submeso, e realizou-se os cálculos para obter os parâmetros turbulentos (z/L , u_{*r} , H , φ_m e ponto de inflexão) para verificar a influência dos fenômenos de submeso. Os resultados mostram que os fenômenos de submeso podem afetar a altura do ponto de inflexão.

Palavras-chave: Submeso escala; Parâmetros turbulentos; Floresta Amazônica

ABSTRACT

The Submeso-scale flow is very important under conditions of stable stratification, which often occurs at the NBL, as this type of flow can produce intermittent turbulence. Thus, it is proposed to identify submeso scale signals and verify their relationship with the variability of some turbulent parameters, especially the height of the inflection point, on three nights with different atmospheric stability conditions. High frequency data (20 Hz) were used, which were measured by sonic anemometers at the 10 vertical levels of the micrometeorological tower, located at an experimental site in central Amazonia (site K34).

In these data, the Morlet wavelet transform was applied to the variable u (zonal wind) to identify the intensity of the submeso signal. The data were also used to calculate the turbulent parameters (z/L , u^* , H , φ_m and inflection point) to verify the influence of submeso phenomena. The results show that submeso phenomena can affect the height of the inflection point.

Keywords: Submeso-scale; Turbulent parameters; Amazon rainforest

1 INTRODUÇÃO

Os movimentos de submeso podem se apresentar de diferentes formas, tais como, ondas de gravidade (OG) (Zeri e SÁ, 2011), meandros (Mortarini *et al.*, 2016), jatos de baixos níveis (JBN) (Poulos *et al.*, 2002), instabilidade Kelvin-Helmholtz (IKH) (Dupont e Patton, 2012), correntes de densidade (Sun *et al.*, 2002), dentre outros.

Esses mecanismos não turbulentos têm sido apontados como os potenciais geradores de sinais de turbulência intermitente (cessa e recomeça por intervalos) frequentemente observada na Camada Limite Noturna (CLN) ou Estável (Sun *et al.*, 2015).

Sabe-se que em condições de estratificação estável, quando ocorre uma redução significativa da turbulência devido a redução da instabilidade térmica relacionado ao perfil de temperatura, o transporte de momentum e escalares na interface floresta-atmosfera pode ocorrer principalmente por modos não turbulentos do escoamento, como no caso de OGs que são geradas por perturbações produzidas pelo terreno complexo (topografia, vegetação, etc) e escoamento de mesoescala.

O escoamento de submeso com escala entre 10 a 100 metros (Na, Jin e Lee, 2014) produz turbulência e influencia no transporte horizontal de escalares e nos fluxos turbulentos (Dupont e Patton, 2012). Em termos de modelagem numérica, os fenômenos de submeso não são representados nos modelos atmosféricos utilizados para previsão de tempo e necessitam ser estudados e parametrizados (Seaman *et al.*, 2012). Portanto, esta hipótese justifica o estudo da influência dos fenômenos de submeso presentes na CLN nos parâmetros turbulentos que induzem as trocas entre a copa e a atmosfera.

O objetivo deste trabalho é analisar como as estruturas de submeso impactam os parâmetros turbulentos e a variabilidade da altura do ponto de inflexão (PI) em diferentes condições de estabilidade atmosférica.

2 METODOLOGIA

2.1 Conjunto de dados

O conjunto de dados utilizados neste trabalho foram provenientes de uma intensa campanha de campo que ocorreu em 2014-2015, durante o projeto GoAmazon. O sítio K34, utilizado no GoAmazon, está localizado na Reserva Biológica do Cuieiras, que fica a aproximadamente 60 km a noroeste de Manaus-AM. A torre micrometeorológica possui 50 m de altura e na época foi instrumentada com um perfil vertical de anemômetros sônicos (modelo CSAT3), e outros sensores, que realizaram medidas abaixo do dossel da floresta (1,5; 7,0; 13,5; 18,4; 22,1; 24,5; e 31,6 m), aproximadamente na altura da copa (34,9 m) e acima dela (40,4 e 48,2 m), com a frequência de 20 Hz (Fuentes *et al.*, 2016).

2.2 Métodos para análise dos dados

Inicialmente as variáveis (u , v , w e T) passaram por um controle de qualidade para a eliminação de dados espúrios (*spikes*), seguindo o critério do desvio padrão (σ), onde os valores acima de 5σ do valor médio para qualquer variável foram excluídos (Vickers e Mahrt, 1997). Este tratamento nos dados foi aplicado no horário noturno (19h às 05h, hora local), período em que os processos de submeso escala são mais relevantes. As três noites analisadas neste trabalho foram selecionadas de acordo com as diferentes condições de turbulência atmosférica, classificada através do n° de Richardson bulk médio da noite (\overline{Ri}). Os cálculos de \overline{Ri} foram realizados para a camada entre as alturas 34,9 e 24,5 m (Santos *et al.*, 2016). A partir de \overline{Ri} as noites

foram classificadas como muito estável ($\overline{Ri} \geq 1$) ou fracamente estável ($\overline{Ri} < 1$).

Após a escolha das noites foi realizado o pré-processamento das séries de dados para o período noturno. O pré-processamento consiste basicamente em duas partes. A primeira tem a finalidade de reconstruir uma série temporal com frequência de 1 min, isso elimina as oscilações de alta frequência (> 1 ciclo/min). A segunda utiliza-se de um filtro passa-banda (média móvel com janela de 5 min) para eliminar a influência do escoamento de mesoescala e mais baixa frequência, para garantir que apenas a escala de interesse (submeso) seja analisada. Nas séries temporais filtradas da componente zonal do vento (u) foi aplicada a transformada de ondaleta de Morlet (TO) (Torrence e Compo, 1998), que gera o espectro de potência local sendo possível identificar a intensidade das estruturas de submeso presentes no escoamento noturno.

Alguns parâmetros turbulentos importantes foram calculados para a análise destas noites, como o parâmetro de estabilidade de Monin-Obukhov (z/L), a velocidade de fricção (u_*), o fluxo de calor sensível (H), a função adimensional de momentum (φ_m) e a altura do ponto de inflexão (PI). Essas variáveis derivadas foram calculadas com uma média móvel de 5 min e a formulação de cada uma pode ser consultada em Stull (1988).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção discute-se os resultados obtidos por meio da análise do conjunto de painéis disponíveis na figura 1. Estas figuras mostram três noites com características de estabilidade atmosférica, de acordo com o n° de Richardson bulk, distintas: muito estável ($\overline{Ri} = 1,72$; noite 15-16/09/2014, painéis a-d), fracamente estável ($\overline{Ri} = 0,61$; noite 05-06/09/2014, painéis e-h) e fracamente estável com convecção ($\overline{Ri} = 0,15$; noite 27-28/11/2014, painéis i-l).

3.1 Análise espectral na escala dos fenômenos de submeso

As figuras 1a, 1e e 1i, que mostram a série temporal original de u (linhas pretas), tem uma característica mais intermitente na noite mais estável (figura 1a) e mais turbulenta na noite fracamente estável com convecção (figura 1i). A série filtrada (linhas azuis), que representa a parte não-turbulenta (variabilidade acima de 60 s) do escoamento, tende a acompanhar a variabilidade da série original, sendo que na noite turbulenta (figura 1i, linha azul), a variância é bem maior comparada às outras noites.

Em relação aos painéis que se referem às estruturas de submeso capturadas pelo espectro de potência (figura 1c, 1g e 1k), observa-se a presença frequente dessas estruturas variando quanto à intensidade do sinal do espectro de potência da ondaleta. Percebe-se que na noite mais estável (figura 1c) os sinais mais fortes (paleta vermelha), principalmente no horário das 19h e 20h, têm período mais duradouro (perto de 45 min) em comparação às outras duas noites (figura 1g e 1k) que ficam restritas entre 1 a 20 min. Verifica-se sinais menos intensos (paleta azul) em todas as noites, que persistem por um período mais prolongado.

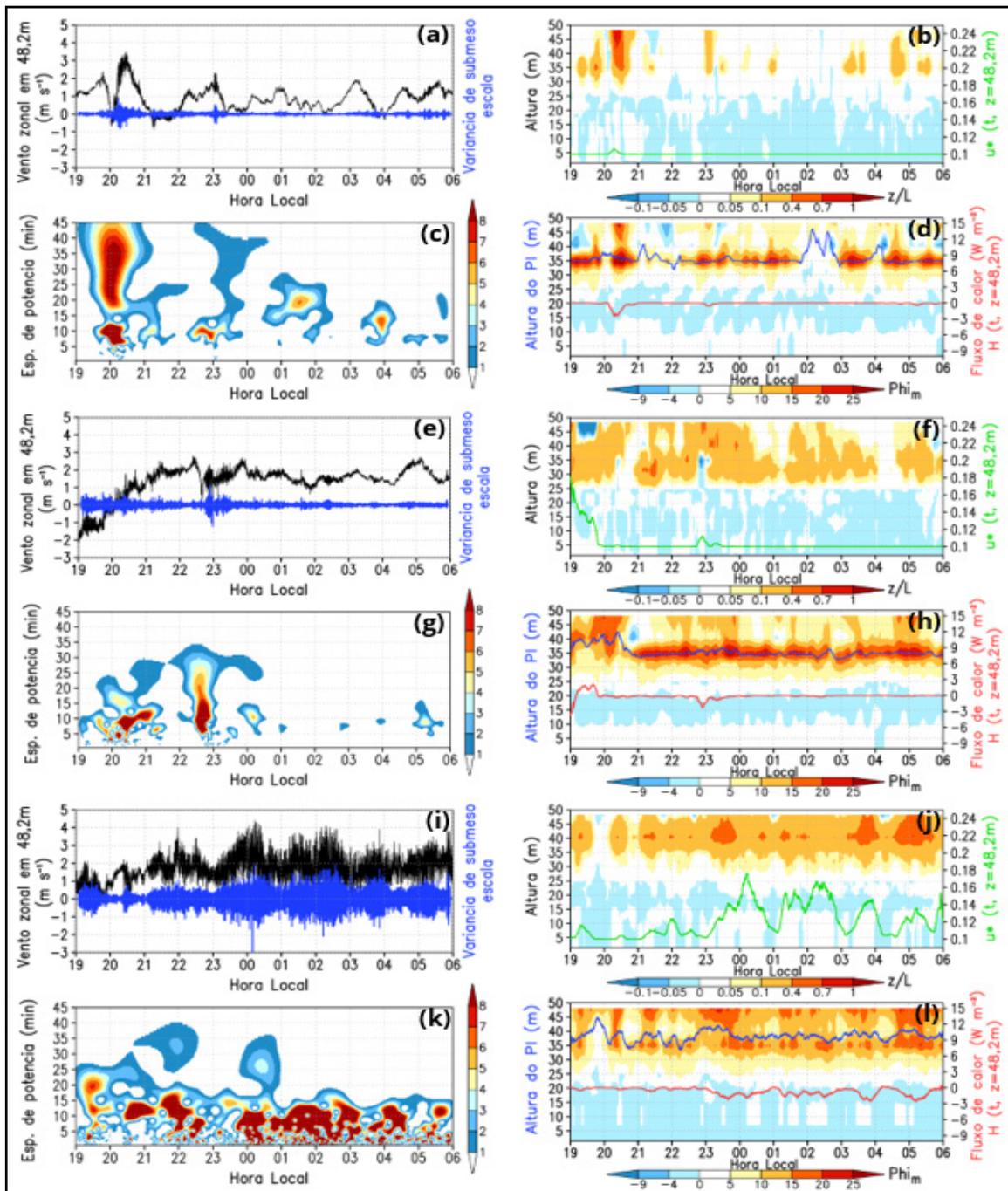
Esses sinais identificados no espectro de potência estão associados a fenômenos que produzem perturbação no escoamento na escala de 1 a 60 min (Mahrt, 2009; Boyko e Vercauteren, 2021), tais como, JBN, OG, IKH, ou mesmo a combinação deles. No entanto, enquanto que nas noites muito estável (figura 1c) e fracamente estável (figura 1g) predominam as condições locais, conforme consulta as imagens do satélite GOES-13 (não mostradas aqui), o mesmo não ocorre com a noite fracamente estável com convecção (figura 1k) que estava sob a atuação de um sistema meteorológico, a Zona de Convergência de Umidade (ZCOU), de acordo com o Boletim Técnico do CPTEC (CPTEC, 2014). Este sistema é o responsável pelas estruturas com sinais bem intensos perdurando por todo o horário noturno e que não podem ser atribuídos somente ao escoamento de submeso escala, diferente dos outros dois casos.

3.2 Parâmetros turbulentos

Os painéis situados na coluna direita da figura 1 (b, d, f, h, j, l) se referem a alguns parâmetros turbulentos utilizados para analisar o comportamento da turbulência em meio aos fenômenos de submeso. O parâmetro z/L que descreve as condições de estabilidade atmosférica (figura 1b, 1f e 1j, escala de cores) mostram que do solo da floresta até ~25 m existe um perfil levemente instável ($z/L < 0$) em todas as noites, enquanto que acima desta altura se observa um perfil tendendo a ser mais estável ($z/L > 0$). Este padrão de estabilidade é gerado devido a presença do dossel da floresta. O dossel mantém a umidade no interior da floresta entre o solo e o topo das árvores, isto implica em um efeito radiativo semelhante a uma estufa, aprisionando a radiação de onda longa no interior do dossel dificultando a perda radiativa do solo. Acima do dossel, devido a uma maior advecção, há uma menor concentração de umidade, o que facilita a perda radiativa. Este é o motivo da instabilidade abaixo de 25 metros e estabilidade acima do dossel (Kruijt *et al.*, 2000). Entretanto, não é incomum encontrar horários acima da copa da floresta com escoamento mais instável, como às 19h de 05-06/09 (figura 1f) que pode ser devido a advecção de ar quente.

Além disso, a variabilidade de u_* (figura 1b, 1f e 1j, linha verde) e H (figura 1d, 1h e 1l, linha vermelha), ambas em 48,2 m, estão condizentes com z/L nesta altura, pois estas variáveis são usadas para definir z/L . Assim, nos horários em que se observa um pico correspondente em u_* e H , há a intensificação na magnitude do vento e movimento ascendente ($H > 0$) ou descendente ($H < 0$), conforme pode ser visto nos casos em que $H < 0$, z/L tem uma condição mais estável no nível 48,2 m e, quando $H > 0$, existe mais instabilidade. Dessa forma, a condição de estabilidade atmosférica pode ser modificada se houver a influência da advecção de ar quente ou frio passando mais acima da copa da floresta.

Figura 1 – Coluna esquerda: Séries temporais originais (linha preta) e filtradas (linha azul) da componente zonal do vento (painéis a, e, i); Espectro de potência referente a submeso escala (painéis c, g, k). Coluna direita: Parâmetros turbulentos – Variação de z/L e u_* (painéis b, f, j); Variabilidade de PI , ϕ_m e H (painéis d, h, l)



Fonte: Autores (2022)

O conjunto de painéis a-d se referem à noite muito estável (15-16/09), e-h à noite fracamente estável (05-06/09) e i-l à noite fracamente estável com convecção (27-28/11)

A variabilidade do cisalhamento vertical do vento, definida por φ_m (figura 1d, 1h e 1l, escala de cores) indicando o sentido do fluxo mostra que abaixo de 25 m, o vento tem gradientes negativos ($\varphi_m < 0$), ou seja, a magnitude tende a diminuir até 25 m e acima de 30 m ocorre intensificação da sua magnitude ($\varphi_m > 0$). Outra observação a ser feita é com relação à série temporal da altura onde a derivada vertical tem a sua máxima intensidade, pode-se aproximar esta altura à variabilidade do ponto de inflexão no perfil do vento (figura 1d, 1h e 1l, linhas azuis). Nota-se que a altura do PI fica preferencialmente em torno de 35 m (altura da copa) onde ocorre maior atrito entre o escoamento do ar e a superfície do dossel, mas pode acontecer da altura do PI subir e alcançar níveis próximo de 45 m, indicando um maior cisalhamento acima da copa. Dentre esses casos, encontra-se uma correlação do PI com a estabilidade próxima à neutralidade para a noite muito estável (figura 1b e 1d), nas ocasiões em que o PI está acima de 35 m, porém esta correlação não é verificada para as demais noites. O que se observa de maneira geral é uma boa correlação entre PI e φ_m , onde a variabilidade de PI tende a acompanhar a intensificação do cisalhamento vertical.

Portanto, na condição muito estável e fracamente estável, na média, ignorando os picos, a altura do PI fica em torno de 35 m (figura 1d e 1h), mas na fracamente estável com convecção fica em torno de 39 m (figura 1l). Nesse caso, as estruturas em torno de 15 min elevam o PI para cerca de 4 m em relação ao valor médio. De modo geral, observa-se que as estruturas de submeso tendem a aumentar o PI, em média, em 4 m, onde a condição de neutralidade faz com o PI atinja alturas bem maiores.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na análise das figuras conclui-se que a transformada de ondaleta de Morlet é uma ferramenta adequada para analisar o sinal do escoamento na escala dos movimentos de submeso, sendo possível identificar as estruturas de submeso presentes acima da copa da floresta, bem como diferenciar a magnitude do sinal no decorrer do tempo. Outra conclusão importante diz respeito à variação dos parâmetros turbulentos

em função da presença de fenômenos que produzem perturbação no escoamento de submeso, onde os picos referentes a u_* e H corresponderam aos horários de maior intensidade do sinal indicados pelo espectro de potência. E ainda outro parâmetro influenciado pelo escoamento de submeso foi a altura do PI, especialmente na noite fracamente estável com convecção, em que a presença constante das estruturas com período de 15 min elevaram o PI em 4m relativo à altura média de 35 m. Portanto, conclui-se que existe um impacto promovido pelo escoamento de submeso em variáveis turbulentas e que esta relação pode ser utilizada para melhor entender o escoamento atmosférico na CLN.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

BOYKO, V; VERCAUTEREN, N. Multiscale Shear Forcing of Turbulence in the Nocturnal Boundary Layer: A Statistical Analysis. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 179, n. 1, p. 43–72, 2021.

CPTEC - CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. Boletim Técnico: Cachoeira Paulista, 2014. Disponível em: <http://tempo.cptec.inpe.br/boletimtecnico/pt>. Acesso em: 13 abr 2022.

DUPONT, S; PATTON, E. G. Momentum and scalar transport within a vegetation canopy following atmospheric stability and seasonal canopy changes: the CHATS experiment. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 12, p. 5913-5935, 2012.

FUENTES, J. D.; CHAMECKI, M.; Dos Santos, R. M. N.; VON RANDOW, C.; STOY, P. C.; KATUL, G.; FITZJARRALD, D.; MANZI, A.; GERKEN, T.; TROWBRIDGE, A.; FREIRE, L. S.; RUIZ-PLANCARTE, J.; MAIA, J. M. F.; TÓTA, J.; DIAS, N.; FISCH, G.; SCHUMACHER, C.; ACEVEDO, O.; MERCER, J. R.; YAÑEZ-SERRANO, A. M. Linking meteorology, turbulence, and air chemistry in the amazon rain forest. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 97, n. 12, p. 2329–2342, 2016.

KRUIJT, B.; MALHI, Y.; LLOYD, J.; NOBRE, A. D.; MIRANDA, A. C.; PEREIRA, M. G. P.; CULF, A.; GRACE, J. Turbulence statistics above and within two Amazon rain forest canopies. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 94, n. 2, p. 297–331, 2000.

MAHRT, L. Characteristics of submeso winds in the stable boundary layer. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 130, n. 1, p. 1–14, 2009.

MORTARINI, L.; MALDANER, S.; MOOR, L. P.; STEFANELLO, M. B.; ACEVEDO, O.; DEGRAZIA, G.; ANFOSSI, D. Temperature auto-correlation and spectra functions in low-wind meandering conditions. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 142, n. 698, p. 1881–1889, 2016.

NA, J. S.; JIN, E. K.; LEE, J. S. Investigation of Kelvin–Helmholtz instability in the stable boundary layer using large eddy simulation. **Journal of Geophysical Research**, v. 119, n.13, p. 7876–7888, 2014.

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**, v. 83, n. 4, p. 555–581, 2002.

SANTOS, D. M.; ACEVEDO, O. C.; CHAMECKI, M.; FUENTES, J. D.; GERKEN, T.; STOY, P. C. Temporal Scales of the Nocturnal Flow Within and Above a Forest Canopy in Amazonia. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 161, n. 1, p. 73–98, 2016.

SEAMAN, N. L.; GAUDET, B. J.; STAUFFER, D. R.; MAHRT, L.; RICHARDSON, S. J.; ZIELONKA, J. R.; WYNGAARD, J. C. Numerical Prediction of Submesoscale Flow in the Nocturnal Stable Boundary Layer over Complex Terrain. **Monthly Weather Review**, v. 140, p. 956-977, 2012.

STULL, R. **An introduction to boundary layer meteorology**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.

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

SUN, J.; NAPPO, C. J.; MAHRT, L.; BELUSIC, D.; GRISOGONO, B.; STAUFFER, D. R.; PULIDO, M.; STAQUET, C.; JIANG, Q.; POUQUET, A.; YAGÜE, C.; GALPERIN, B.; SMITH, R. B.; FINNIGAN, J. J.; MAYOR, S. D.; SVENSSON, G.; GRACHEV, A. A.; NEFF, W. D. Review of wave-turbulence interactions in the stable atmospheric boundary layer. **Reviews of Geophysics**, v. 53, p. 956-993, 2015.

TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A Practical guide to wavelet analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, p. 61–78, 1998.

VICKERS, D.; MAHRT, L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 14, p. 512-526, 1997.

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**, v. 138, n. 3, p. 413–431, 2011.

Contribuição de autoria

1 – Fabíola Carolina Pereira Valente

Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do INPE

<https://orcid.org/0009-0002-7368-4135> - fabiolavalentepereira@gmail.com

Contribuição: Conceitualização, Curadoria dos dados, Análise formal, Investigação, Metodologia, Validação, Visualização e Escrita – primeira redação

2 – Paulo Yoshio Kubota

Pesquisador do CPTEC/INPE, Doutor em Meteorologia

<https://orcid.org/0000-0003-4858-1337> - pkubota@gmail.com

Contribuição: Conceitualização, Análise formal, Investigação, Metodologia, Administração do projeto, Software, Supervisão, Revisão e edição da escrita

3 – Dayana Castilho de Souza

Doutora em Meteorologia

<https://orcid.org/0009-0005-3358-2654> - dayanacastilho@gmail.com

Contribuição: Administração do projeto, Revisão e edição da escrita

4 – Layrson de Jesus Menezes Gonçalves

Bolsista DTI-A do CEMADEN, Doutor em Meteorologia

<https://orcid.org/0000-0001-5159-4388> - layrsongoncalves@gmail.com

Contribuição: Validação, Revisão e edição da escrita

Como citar este artigo

VALENTE, F. C. P.; KUBOTA, P. Y.; SOUZA, D. C. de; GONÇALVES, L. de J. M. Influência dos fenômenos de submeso nos parâmetros turbulentos sob diferentes condições de estabilidade da CLN da Amazônia. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 45, n. esp. 2, e82079, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X82079>. Disponível em: Acesso em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/82079>. Acesso em: dia mês abreviado ano.