

XIII Workshop Brasileiro de Micrometeorologia

Uma análise da ECT para a subcamada de rugosidade da Floresta Amazônica sob condições atmosféricas instáveis

A TKE analysis for the roughness sublayer of an Amazon forest under unstable atmospheric conditions

Paulo Henrique Laba¹ , Nelson Luís Dias¹ , Cléo Quaresma Dias Júnior² 

¹Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil

²Instituto Federal do Pará, Belém, PA, Brasil

RESUMO

A equação da energia cinética da turbulência (ECT) quantifica a intensidade da turbulência, dos mecanismos que a geram, transportam e a dissipam. Diante da dificuldade já conhecida da aplicação da Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov na subcamada de rugosidade, faz-se necessário o desenvolvimento de novas abordagens para compreender o escoamento nessa região da atmosfera. Por meio do cálculo dos termos da ECT e do balanço entre eles utilizando um diagrama de ECT reduzida, buscou-se investigar as características da turbulência sobre uma floresta localizada no sítio experimental do Projeto ATTO. Para tanto, por meio de dados de três anemômetros sônicos nas alturas de 35 m, 50 m, e 81 m instalados em uma das torres do experimento e coletados entre os meses de agosto até outubro de 2021 para o período diurno, calcularam-se os termos de produção mecânica (ou por gradiente) P , de produção térmica (ou por flutuabilidade) B , de armazenamento S , de transporte vertical de turbulência T^v e de dissipação ε_e da ECT. Na altura escolhida para a análise (66m — média entre os dois anemômetros mais altos) e após a realização do controle de qualidade, obteve-se 42 blocos de 1 hora. Foi possível observar que em mais de 90% dos blocos houve predominância de ε_e . O segundo maior termo foi B ($\approx 57\%$) e o terceiro foi P ($\approx 40\%$), o que mostra um certo equilíbrio entre os mecanismos de produção. No entanto, ao realizar o balanço entre eles, constatou-se a existência de um resíduo, que não é explicado por T^v . Esse resíduo foi predominantemente negativo, o que pode ser um indicativo do efeito da vegetação e da topografia no escoamento. Notou-se também que o transporte de ECT foi para cima em 70% dos blocos. Por outro lado, S é ao menos 2 ordens de grandeza menor que P , sendo desprezível. Além disso, calculou-se o desvio padrão adimensional para a velocidade vertical do vento, que mostrou uma boa concordância com o que se espera na subcamada inercial (SCI).

Palavras-chave: Energia Cinética da Turbulência; Subcamada de Rugosidade; Turbulência Atmosférica; Dossel Florestal; Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov

ABSTRACT

The equation of turbulence kinetic energy (TKE) quantifies the intensity of turbulence, the mechanisms generating it, transporting it, and dissipating it. Given the well-known difficulty in applying Monin-Obukhov Similarity Theory in the roughness sublayer, the development of new approaches to understand the flow in this region of the atmosphere is necessary. By calculating the terms of TKE and their balance using a reduced TKE diagram, we sought to investigate the characteristics of turbulence over an Amazon forest located at the ATTO Project experimental site. To do so, using data from three sonic anemometers at heights of 35m, 50m, and 81m installed on one of the experiment towers and collected between August and October 2021 for the daytime period, we computed the terms of mechanical production P , thermal production B , storage S , vertical turbulence transport T^v , and dissipation ε_e of TKE. At the chosen analysis height (66m - average between the two upper sonic anemometers) and after quality control, we obtained 42 one-hour blocks. It was observed that in over 90% of the cases, ε_e was the largest term. The second-largest term was B ($\approx 57\%$) and the third was P ($\approx 40\%$), showing a certain balance regarding production mechanisms. However, upon balancing them, the existence of a residual term, not explained by T^v , was found. This residual was predominantly negative, which may indicate the effect of vegetation and topography on the flow. It was also noted that in 70% of the blocks, the transport of TKE was upwards. S , on the other hand, is at least 2 orders of magnitude smaller than P , being negligible. Additionally, we calculated the dimensionless standard deviation for vertical wind speed, which showed good agreement with what is expected in the inertial sublayer (ISL).

Keywords: Turbulence Kinetic Energy; Roughness Sublayer; Atmospheric Turbulence; Forest Canopy; Monin-Obukhov Similarity Theory

1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de entender melhor o fluxo turbulento sobre a região amazônica e seu impacto nos ciclos de alguns escalares, como água (H_2O) e dióxido de carbono (CO_2), é necessário aprimorar as teorias e tecnologias utilizadas para investigar a subcamada de rugosidade (ver abaixo). No entanto, não é uma tarefa simples definir uma metodologia exploratória para fluxos turbulentos em florestas devido à complexidade (topografia, localização geográfica, estrutura da flora, etc.) desses sistemas e à certa escassez de medições das variáveis envolvidas.

Buscando entender a dinâmica da turbulência em uma floresta, o foco deve ser concentrado na Camada Superficial (CS). De acordo com Cellier and Brunet (1992), a CS pode ser dividida em duas subcamadas: a subcamada inercial (SCI) e a subcamada de rugosidade (SCR). A SCI é a parte mais alta da CS e começa quando os elementos de rugosidade deixam de ter influência direta no fluxo. Em regiões onde o comprimento dos elementos de rugosidade é pequeno em comparação com a altura das medições,

a espessura da SCR é comparativamente pequena. Conseqüentemente, em uma floresta amazônica onde a altura média das árvores é de 40 metros Zahn et al. (2016b), a SCR pode se estender até 120 m acima do solo. A necessidade de investigar a SCR no contexto da turbulência atmosférica surge principalmente devido à inaplicabilidade das teorias bem estabelecidas que funcionam (em princípio) para a SCI, como a Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov (TSMO) Cellier and Brunet (1992); Chamecki et al. (2020); Lee (2018); Zahn et al. (2016b).

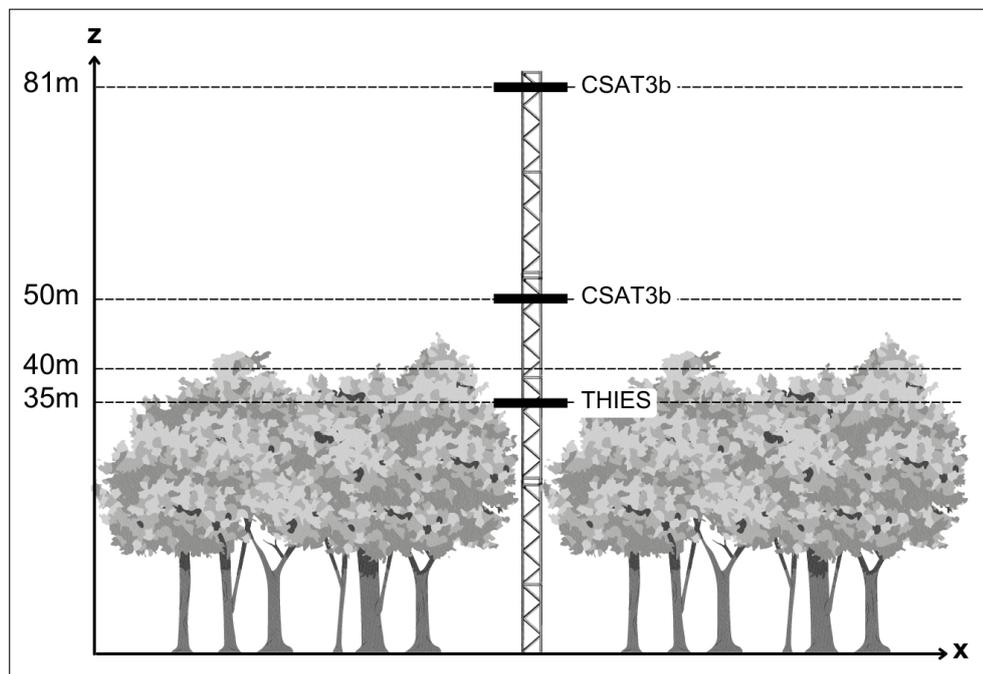
No presente trabalho, a fim de investigar os fluxos turbulentos acima do dossel da floresta, o desvio padrão adimensional e os termos da equação da energia cinética turbulenta na SCR foram calculados utilizando dados medidos do projeto Amazon Tall Tower Observatory (ATTO).

2 O PROJETO ATTO

O projeto ATTO é uma iniciativa científica localizada na Floresta Amazônica, no estado do Amazonas, Brasil. O principal objetivo do projeto ATTO é estudar a interação entre a floresta amazônica e a atmosfera, com um foco especial na investigação de gases de efeito estufa e processos que impactam o clima global. O local experimental está situado na região central da Amazônia, dentro da Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã (RDSU). Informações detalhadas sobre o ATTO podem ser encontradas em Dias Júnior et al. (2019).

Os dados utilizados neste estudo são provenientes de um anemômetro sônico THIES a uma altura de 35 metros e anemômetros sônicos CSAT3b a 50 e 81 metros (Figura 1). A aquisição das componentes de velocidade (u , v , w), bem como da temperatura (θ), é realizada a uma taxa de dez vezes por segundo (10 Hz), resultando em 36.000 medições para cada bloco de 1 hora. É importante notar que, como estamos analisando três níveis diferentes, se um dos blocos de 1 hora para um determinado dia/momento não passar pelo controle de qualidade (que será apresentado na seção seguinte), teremos que descartar os outros dois blocos para o mesmo momento nos outros níveis.

Figure 1 – Posição dos anemômetros sônicos na Torre Instantânea do Projeto ATTO. A altura média do dossel é de 40 m



Fonte: Autores(as)

3 TEORIA

3.1 DESVIO PADRÃO ADIMENSIONAL

O método do desvio padrão adimensional (ϕ) afirma que as características do fluxo podem ser descritas relacionando o desvio padrão de uma variável à escala característica dessa variável. Este método é baseado na Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov (TSMO), que propõe que as estatísticas de turbulência são uma função da estabilidade atmosférica $\zeta = (z - d)/L$ (onde z é a altura acima do nível do solo, d é a altura de deslocamento e L é o comprimento de Obukhov). De Chor et al. (2017), a função ϕ para a velocidade do vento vertical é calculada por

$$\phi_w(\zeta) = \frac{\sigma_w}{u_*}, \quad (1)$$

e os resultados da Eq. (1) são comparados com as previsões para a SCI em casos instáveis ($\zeta < 0$):

$$\phi_w(\zeta) = 1.25(1 - 3\zeta)^{1/3}. \quad (2)$$

3.2 Equação da Energia Cinética da Turbulência (ECT)

O balanço da Equação da Energia Cinética da Turbulência (ECT) é extremamente útil para entender os mecanismos de produção, transporte e dissipação da turbulência, e é dado por Stull (1988)

$$\underbrace{\frac{\partial \bar{e}'}{\partial t}}_S = \underbrace{-\overline{u'w'}}_P \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \underbrace{\frac{g}{\theta_r} \overline{w'\theta'_v}}_B - \underbrace{\frac{\partial \bar{e}'w'}{\partial z}}_{T^v} - \underbrace{\frac{1}{\rho_r} \frac{\partial \bar{w}'p'}{\partial z}}_{\Pi} - \underbrace{\bar{u} \frac{\partial \bar{e}'}{\partial x}}_A - \varepsilon_e, \quad (3)$$

onde

$$\bar{e}' = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}), \quad (4)$$

S representa o armazenamento local, P é a produção por gradiente de velocidade, B é a produção de flutuabilidade, T^v representa o transporte turbulento vertical, Π é o termo de pressão, A é a advecção e ε_e é a dissipação viscosa da ECT. O termo residual R é dado por

$$R = P + B - \varepsilon_e = S - T^v - \Pi - A. \quad (5)$$

E, segundo Chamecki et al. (2018), o balanço reduzido da ECT é

$$\frac{R}{\varepsilon_e} = \frac{P}{\varepsilon_e} + \frac{B}{\varepsilon_e} - 1. \quad (6)$$

A Equação 6 é uma forma de quantificar as contribuições dos termos de produção e flutuabilidade, bem como de comparar esses termos com a dissipação e o balanço local por meio de um diagrama bidimensional de espaço de fase.

4 PREPARANDO OS DADOS

A análise foi realizada para blocos de 1 hora durante o período diurno para os casos instáveis e apenas para direções do vento livres de distorções de fluxo causadas pela torre. Podemos dividir os procedimentos realizados em duas etapas: (i) controle de qualidade (CQ) e (ii) rotação de coordenadas. A etapa (i) foi adaptada de Zahn et al. (2016a), onde um CQ foi realizado para verificar valores ausentes (NaNs) e detectar

picos nas medições. Um passo extra foi adicionado para verificar falhas de equipamento (flags) que não são NaNs. Se o número de flags exceder 1%, o bloco inteiro é descartado. Caso contrário, esses valores são interpolados linearmente. A etapa (ii) é realizada para alinhar o eixo x com a direção média do vento (paralelo à superfície) e o novo eixo z com a direção normal. Obtivemos 42 blocos de uma hora entre agosto e outubro de 2021 ao final da triagem de qualidade dos dados para cada altura.

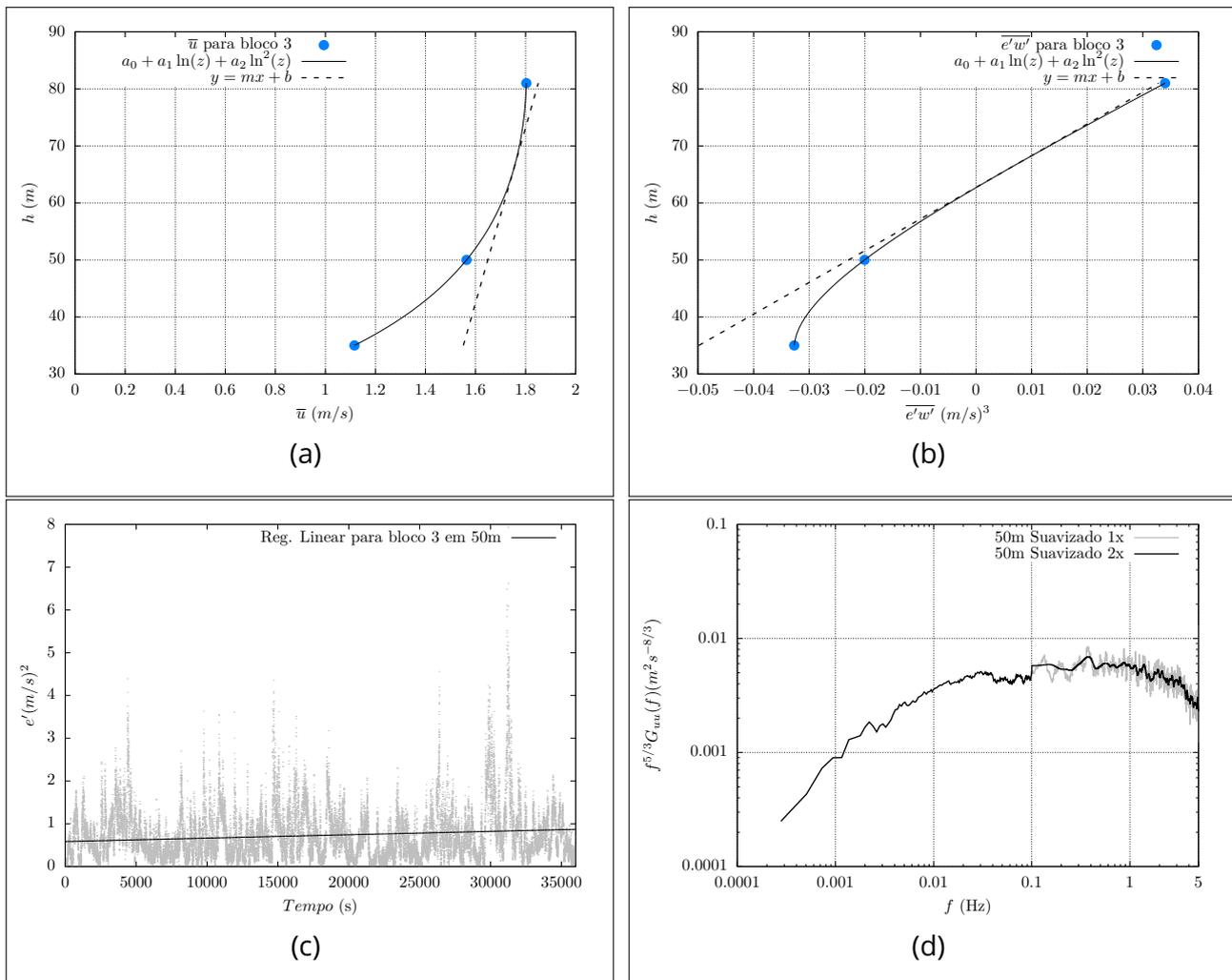
5 CALCULANDO OS TERMOS DA EQUAÇÃO DA ECT

Os cálculos das variáveis médias foram realizados para 66 metros (altura média entre os dois anemômetros sônicos CSAT3b e logo acima do dossel). A partir da Equação (3), o termo de produção P foi calculado com o gradiente de velocidade média estimado por ajuste polinomial de segunda ordem em $\ln(z)$ a 66 metros (Figura 2a). Para o termo de transporte T^v , o procedimento é semelhante, mas para o gradiente de fluxo vertical de ECT, como pode ser visto na Figura 2b. O termo de armazenamento S foi estimado como a inclinação de uma linha reta ajustada aos valores instantâneos de e' (Figura 2c). O termo de flutuabilidade B é dado pela Equação (3) e $g = 9.81, m/s^2$. Por fim, o termo de dissipação foi calculado por

$$\varepsilon_e = \frac{f^{5/2} G_u(f)^{3/2} 2\pi}{\alpha_1^{3/2} \bar{u}}, \quad (7)$$

onde $\alpha_1 = 0.49$ é a constante de Kolmogorov Dias (2018), G_u é o espectro unilateral e f é a frequência no ponto de máximo da Figura 2d. Note que ε_e foi calculado a partir dos espectros medidos a 50 e 81 m, e a média de ε_e foi utilizada na Eq. (3). O termo de pressão e o termo de advecção não foram calculados nesta análise.

Figure 2 – Exemplo dos procedimentos realizados para um dos blocos analisados. Fig. a: Termo de produção, fig. b: Termo de transporte, fig. c: Termo de armazenamento, fig. d: Termo de dissipação



Fonte: Autores(as)

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após calcular os termos, verificamos que o termo de dissipação predominou: em 39 dos 42 blocos, o termo de dissipação ε_e foi o maior (aproximadamente 93%). Em relação ao segundo maior termo, obtivemos o termo de fluatibilidade B em aproximadamente 57% dos blocos, o termo de produção P em aproximadamente 40% dos blocos e o termo de transporte T^v em aproximadamente 3% dos blocos. O termo de armazenamento S é muito menor em comparação com os outros, mas ainda assim foi incluído nos cálculos. Outra observação é que em aproximadamente 70% dos blocos o transporte de ECT é para cima. É evidente que o T^v sozinho não explica o

termo residual R (Figura 3a). O balanço reduzido da ECT (Figura 3b) apresentou o mesmo comportamento que o descrito em Chamecki et al. (2020). Pode-se observar que os pontos estão distribuídos abaixo da linha de equilíbrio, indicando que $R < 0$. Em Chamecki et al. (2020), os autores afirmam que esse comportamento pode ser devido à topografia ou à vegetação. Em simulações usando *Large Eddy Simulation* (LES), eles observaram que a topografia geraria esse efeito para a faixa de altura que estamos investigando. A Figura 3c é um resultado que já foi verificado Chor et al. (2017); Zahn et al. (2016b) para o mesmo local experimental e diferentes alturas, indicando que ϕ_w está em boa concordância com os valores esperados provenientes da TSMO para a SCI.

7 CONCLUSÃO

O objetivo deste artigo foi tentar entender como os termos da Equação da Energia Cinética Turbulenta (ECT) se comportam em uma floresta amazônica. Como observamos, o termo de transporte não fecha o balanço, levando-nos a acreditar que os termos não calculados da ECT (advecção e pressão) podem ter uma contribuição significativa. O termo de dissipação é predominante em mais de 90% dos blocos, o que parece fazer sentido, uma vez que faz parte da natureza da turbulência. A floresta amazônica possui características únicas que a destacam. É claro que é essencial entender melhor o efeito que a vegetação e a topografia têm na dinâmica da turbulência sobre uma floresta.

AGRADECIMENTOS

Este estudo faz parte do Projeto ATTO (Amazon Tall Tower Observatory), que é financiado por várias organizações. As fontes de financiamento incluem o Ministério Federal da Educação e Pesquisa da Alemanha (BMBF) por meio dos contratos 01LB1001A e 01LK1602A, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação do Brasil (MCTI/FINEP) através do contrato 01.11.01248.00, e a Sociedade Max Planck (MPG).

REFERÊNCIAS

Cellier, P. and Brunet, Y. (1992). Flux-gradient relationships above tall plant canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58(1-2):93-117.

- Chamecki, M., Dias, N. L., and Freire, L. S. (2018). A tke-based framework for studying disturbed atmospheric surface layer flows and application to vertical velocity variance over canopies. *Geophysical Research Letters*, 45(13):6734–6740.
- Chamecki, M., Freire, L. S., Dias, N. L., Chen, B., Dias-Junior, C. Q., Toledo Machado, L. A., Sörgel, M., Tsokankunku, A., and Araújo, A. C. d. (2020). Effects of vegetation and topography on the boundary layer structure above the amazon forest. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 77(8):2941–2957.
- Chor, T. L., Dias, N. L., Araújo, A., Wolff, S., Zahn, E., Manzi, A., Trebs, I., Sá, M. O., Teixeira, P. R., and Sörgel, M. (2017). Flux-variance and flux-gradient relationships in the roughness sublayer over the amazon forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 239:213–222.
- Dias, N. L. (2018). Smoothed spectra, ogives, and error estimates for atmospheric turbulence data. *Boundary-layer meteorology*, 166(1):1–29.
- Dias Júnior, C. Q., Dias, N. L., dos Santos, R. M. N., Sörgel, M., Araújo, A., Tsokankunku, A., Ditas, F., de Santana, R. A., Von Randow, C., Sá, M., et al. (2019). Is there a classical inertial sublayer over the amazon forest? *Geophysical Research Letters*, 46(10):5614–5622.
- Lee, X. (2018). *Fundamentals of boundary-layer meteorology*, volume 256. Springer.
- Stull, R. B. (1988). *An introduction to boundary layer meteorology*, volume 13. Springer Science & Business Media.
- Zahn, E., Chor, T., and Dias, N. (2016a). A simple methodology for quality control of micrometeorological datasets. *Am J Environ Eng*, 6(4A):135–142.
- Zahn, E., Dias, N. L., Araújo, A., Sá, L. D., Sörgel, M., Trebs, I., Wolff, S., and Manzi, A. (2016b). Scalar turbulent behavior in the roughness sublayer of an amazonian forest. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(17):11349–11366.

Contribuições dos autores

1 – Paulo Henrique Laba

Engenheiro ambiental e estudante de pós-graduação da UFPR
<https://orcid.org/0009-0003-3208-363X> • paulo.laba.92@gmail.com
Contribution: Processamento dos Dados; Análise dos Dados

2 – Nelson Luís Dias

Professor do Departamento de Engenharia Ambiental da UFPR
<https://orcid.org/0000-0002-9770-8595> • nelsonluisdias@gmail.com
Contribution: Idealização

3 – Cléo Quaresma Dias Júnior

Professor do Departamento de Física no IFPA
<https://orcid.org/0000-0003-4783-4689> • cleo.quaresma@ifpa.edu.br
Contribution: Processamento dos Dados

Como citar este artigo

Laba, P. H., Dias, N. L. & Dias Júnior, C. Q. (2024). Uma análise da ECT para a subcamada de rugosidade da Floresta Amazônica sob condições atmosféricas instáveis. *Ciência e Natura*, Santa Maria, v. 46, esp. 2, e87711. <https://doi.org/10.5902/2179460X87711>