

## XIII Workshop Brasileiro de Micrometeorologia

# Neutral atmospheric boundary layer simulation of the Amazon rainforest using Large-Eddy Simulation

Simulação da camada limite atmosférica neutra da floresta Amazônica usando *Large-Eddy Simulation*

Mateus Popoff<sup>1</sup> , Livia Souza Freire<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP

## RESUMO

The study of the atmospheric boundary layer (ABL) of the Amazon rainforest is important for a better understanding of the biogeochemical phenomena occurring in this region, as well as their local and global impact. Turbulence in the ABL is responsible for mixing chemical components in the canopy, as well as for transporting these substances from the forest floor to the top of the ABL. Large-Eddy Simulation (LES) is one of the main simulation tools for the ABL; however, one of the limitations in its use is in the study of unstable conditions, as the simulation inevitably requires a larger vertical domain, which limits the model's resolution near the surface. To simulate the unstable ABL with adequate resolution in the canopy region, the solution proposed in this work is the use of the One-Dimensional Turbulence (ODT) wall model. When coupled with LES, the ODT replaces the need for mesh refinement near the ground by producing stochastic vortices that mimic the effects of turbulence in this region. In the present work, results of a simulation of the Amazon ABL under neutral stability conditions are presented for a preliminary evaluation. In the vegetation region, the results of mean velocity and shear stress are similar to the GoAmazon field experiment data. On the other hand, the variances and asymmetries show differences that are inherent to the ODT model. In the future, the coupled LES-ODT model may be a useful tool in studies of the unstable Amazonian ABL.

**Palavras-chave:** Turbulence; Large-Eddy Simulation; Atmospheric Boundary Layer; Amazon Rainforest

## ABSTRACT

O estudo da camada limite atmosférica (CLA) da floresta Amazônica é importante devido à necessidade de compreender os fenômenos biogeoquímicos que ocorrem nessa região, além de seu impacto local e global. A turbulência na CLA é responsável por misturar os componentes químicos no dossel, além de realizar o transporte dessas substâncias desde a superfície da floresta até o topo da CLA. Apesar de ser uma das principais ferramentas de simulação da CLA, uma das limitações no uso do *Large-Eddy*

*Simulation* (LES) está no estudo de condições instáveis, pois a simulação inevitavelmente requer um domínio vertical maior, o que limita a resolução do modelo perto da superfície. Para simular a CLA instável com uma resolução adequada na região do dossel, a solução proposta nesse trabalho é o uso do modelo de parede *One-Dimensional Turbulence* (ODT). Quando acoplado ao LES, o ODT substitui a necessidade de refinamento da malha próximo ao chão ao produzir vórtices estocásticos que imitam os efeitos da turbulência nessa região. No presente trabalho são apresentados resultados de uma simulação da CLA Amazônica sob condições neutras de estabilidade, para uma avaliação preliminar. Na região da vegetação, os resultados da velocidade média e tensão de cisalhamento são similares aos de dados medidos em campo no experimento *GoAmazon*. Por outro lado, as variâncias e assimetrias apresentam diferenças que são inerentes ao modelo ODT. No futuro, o modelo acoplado LES-ODT poderá ser uma ferramenta útil em estudos da CLA Amazônica instável.

**Keywords:** Turbulência; *Large-Eddy Simulation*; Camada Limite Atmosférica, Amazônia

## 1 INTRODUÇÃO

A floresta amazônica possui uma importância ambiental devido a diversos aspectos que vão da escala local à global Pachauri et al. (2014). Contudo, o presente projeto está concentrado na região da atmosfera mais próxima da floresta, a camada limite atmosférica (CLA). Essa região é sensível aos eventos que ocorrem na floresta, logo, é necessário compreendê-la para realizar uma predição assertiva acerca dos eventos relacionados à floresta Amazônica. Dessa forma, o objetivo desse trabalho é realizar uma simulação da camada limite atmosférica neutra da floresta amazônica, e validá-la com resultados experimentais. Os dados do experimento *GoAmazon*, obtidos no trabalho de Gerken et al. (2017), serão usados para comparar com os resultados da simulação. A avaliação do caso neutro corresponde a uma fase preliminar do projeto, que tem como objetivo final simular a CLA instável utilizando a mesma ferramenta numérica. A simulação da CLA instável requer um domínio que inclua toda a extensão vertical da CLA, combinado a um refinamento próximo à superfície que permita resolver a floresta Amazônica, elevando significativamente o custo computacional. Para contornar esse problema, será utilizado um modelo de *Large-Eddy Simulation* acoplado ao modelo de parede *One-Dimensional Turbulence*, descritos a seguir.

## 2 LARGE-EDDY SIMULATION

A simulação de grandes vórtices, também conhecida como *Large-Eddy Simulation* (LES), é um método numérico computacional que simula apenas as maiores escalas de

flutuações turbulentas, enquanto modela as menores Pope (2000). Grande parte do esforço computacional na simulação de fluidos é devido às escalas dissipativas, que exigem um maior refinamento da discretização do campo conforme se aumenta o número de Reynolds do escoamento (Davidson, 2015). A decomposição da velocidade para o LES é feita através de um operador de filtro de grade. Esse operador delimitará o que será simulado e modelado, sendo necessário que esse filtro esteja definido dentro das escalas inerciais (Pope, 2000). Sendo assim, a equação da continuidade filtrada para simulações atmosféricas é

$$\frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

onde  $\tilde{U}_i$  é a componente  $i$  do vetor de velocidade filtrada, enquanto  $x_i$  é a componente  $i$  do vetor posição, com  $i = \{1, 2, 3\}$ . A equação de quantidade de movimento filtrada pode ser escrita como

$$\frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{U}_i \tilde{U}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \tilde{P}^r}{\partial x_i} + f(\tilde{U}_2 - V_g)\delta_{i1} - f(\tilde{U}_1 - U_g)\delta_{i2} - g\frac{\tilde{\Theta}'}{\Theta_0}\delta_{i3} - \frac{\partial \tau_{ij}^r}{\partial x_j}, \quad (2)$$

em que  $t$  é o tempo,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\tilde{P}^r$  é a pressão filtrada modificada,  $\tau_{ij}^r$  é o tensor de tensão residual anisotrópico,  $f$  é o parâmetro de Coriolis,  $U_g$  e  $V_g$  são componentes horizontais do vento geostrófico,  $\tilde{\Theta}$  é a temperatura potencial filtrada,  $\tilde{\Theta}'$  é o desvio da média planar horizontal dada por  $\Theta_0$  e  $\delta$  é o Delta de Kronecker.

Ao resolver numericamente o sistema de equações dados por 1 e 2, é necessário modelar as variáveis do tensor de tensão residual para que o sistema se torne possível e determinável (Pope, 2000). Esse tensor, escrito em função de uma viscosidade residual  $\nu^r$ , compensa os efeitos dissipativos que não são capturados na escala das células do LES (Freire, 2022). O modelo submalha utilizado nesse trabalho é o *Lagrangian-averaged scale-dependent dynamic model*, apresentado no artigo de Bou-Zeid et al. (2005).

Por fim, a equação de transporte de temperatura potencial filtrada é

$$\frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{\Theta} \tilde{U}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial q_j}{\partial x_j}, \quad (3)$$

$$q_j = -\frac{\nu^r}{Pr^r} \frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial x_j}, \quad (4)$$

sendo  $q_j$  o fluxo de calor e  $Pr^r$  o número de Prandtl submalha. Note que os efeitos da viscosidade molecular são desprezados nessas equações porque ela é significativamente menor quando comparado com a viscosidade residual (Freire, 2022).

### 3 ONE-DIMENSIONAL TURBULENCE

O modelo de parede utilizado nesse trabalho é o *One-Dimensional Turbulence* (ODT), criado por Kerstein (1999), utilizado inicialmente como um modelo independente (Kerstein, 1999). O domínio do ODT é unidimensional, tal que as três componentes da velocidade e a temperatura potencial são calculadas independentemente. Semelhante às equações governantes para simulações da CLA, o conjunto de equações do ODT possui o termo temporal, o termo advectivo, a força de Coriolis e o divergente de tensão residual. A maior diferença está nos vórtices estocásticos, que imitam os efeitos do termo não-linear. Esse efeito é modelado, pois a turbulência só pode ser resolvida em domínios tridimensionais. Uma vez que o ODT é acoplado ao LES, é possível expressar as equações do ODT também com um filtro de grade, resultando em:

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{u}_i \tilde{v}_j}{\partial x_j} = f(\tilde{u}_2 - V_g) \delta_{i1} - f(\tilde{u}_1 - U_g) \delta_{i2} - \frac{\partial \tau_{i3}^{r*}}{\partial x_3} + d_i + \text{vórtices estocásticos}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{\theta} \tilde{v}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial q_3^{r*}}{\partial x_3} + \text{vórtices estocásticos}, \quad (6)$$

tal que

$$\tau_{i3}^{r*} = -\nu_{r*} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_3}, \quad (7)$$

$$q_3^{r*} = \frac{\nu_{r*}}{Pr^r} \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x_3}, \quad (8)$$

onde  $\tilde{u}_i$  é a velocidade resolvida,  $\tilde{v}_j$  é a velocidade média espacial resolvida,  $\tilde{\theta}$  é a temperatura potencial resolvida,  $Pr^r$  é o número de Prandtl submalha,  $\nu_{r*}$  é a viscosidade submalha,  $q_3^{r*}$  é o fluxo de calor vertical submalha e  $\tau_{i3}^{r*}$  é a tensão de cisalhamento vertical submalha, todos na escala do ODT e  $d_i$  é a força de arrasto causada pela presença do dossel, melhor descrito no trabalho de Gerken et al. (2017) (Freire and Chamecki, 2018).

Os vórtices estocásticos são determinados de acordo com uma distribuição probabilística com base nas velocidades e na temperatura potencial, que, por sua vez, expressam a quantidade de energia cinética e potencial instantânea presente no vórtice estocástico do ODT. Seja um escoamento turbulento, a distribuição de probabilidade do tamanho e localização do vórtice para o ODT, ao longo dos passos de tempo, é dada pela função  $\lambda(l, z_b; t)$ , em que

$$\lambda(l, z_b; t) = \frac{C_\lambda}{l^3} \sqrt{\frac{1}{3} \left( u_{1,K}^2 + u_{2,K}^2 + u_{3,K}^2 + \frac{8gl}{27} \frac{\theta_K}{\theta_0} \right)}, \quad (9)$$

onde  $l$  é o tamanho do vórtice estocástico e  $C_\lambda$  é uma constante que regula a frequência de ocorrência de vórtices relativo à quantidade de energia do escoamento, ajustando a intensidade da turbulência. Além disso, os valores de  $u_K$  e  $\theta_K$  são valores médios referentes ao vórtice selecionado, como discutido em Freire and Chamecki (2018) (Freire and Chamecki, 2018).

## 4 RESULTADOS

Os resultados são apresentados nos gráficos das figuras 1 e 2 e são referentes à simulação da CLA neutra com a inclusão da floresta amazônica em uma topografia plana. Os dados do ODT para a velocidade horizontal média, a variância e a assimetria são comparados com o que foi obtido experimentalmente no projeto *GoAmazon* Gerken et al. (2017). A variável  $u_h$  é a velocidade horizontal do fluido na altura do dossel, que nessa simulação é de 36 metros, representada por uma linha verde

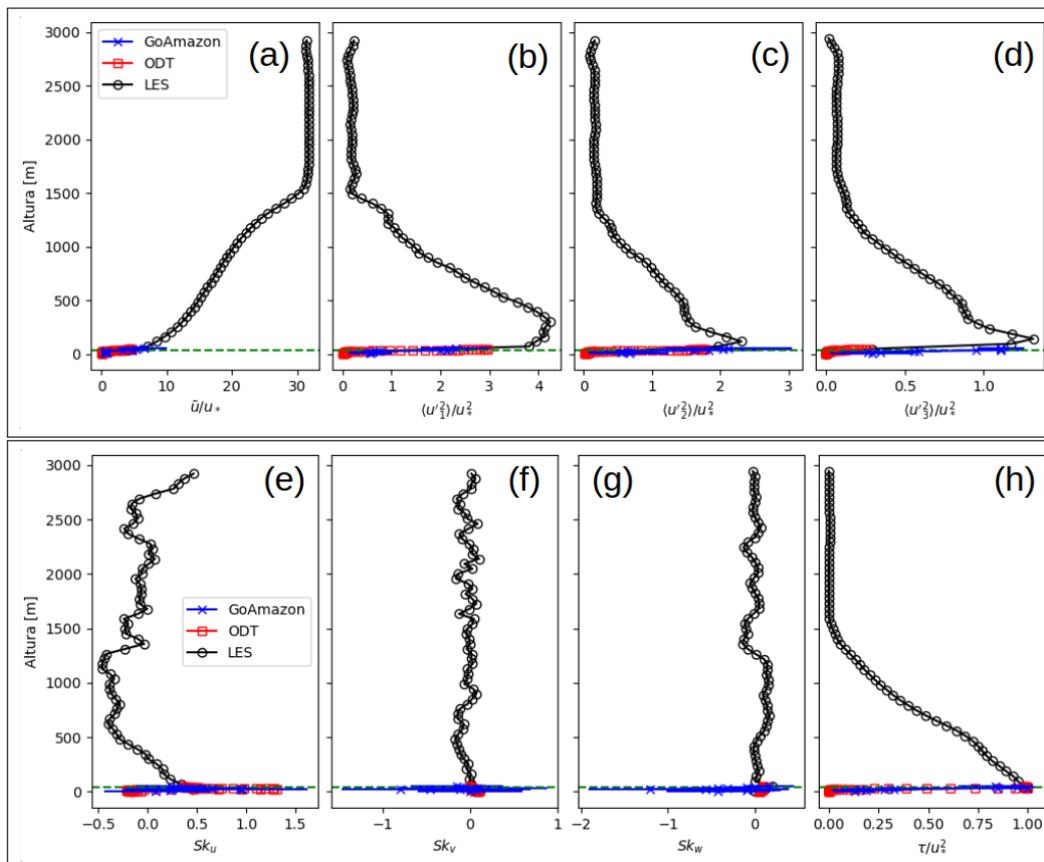
tracejada nas figuras. Os parâmetros da simulação estão apresentados na tabela 1. O índice de área foliar, a densidade de área foliar e a altura do dossel foram obtidos do trabalho de Tota et al. (2012) e Gerken et al. (2017).

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na simulação

Parâmetro	
Domínio [km]	$5.888 \times 5.888 \times 2.944$
Altura da CLA [km]	1.5
nº de pontos da malha ( $n_x \times n_y \times n_z, n_{ODT}$ )	$64 \times 64 \times 64, 48$
Índice de área foliar [ $m^2 m^{-2}$ ]	6
$u_*$ [ $ms^{-1}$ ]	0.491
$f; U_g; V_g$	$-7.887 \times 10^{-6}; 16; 0$

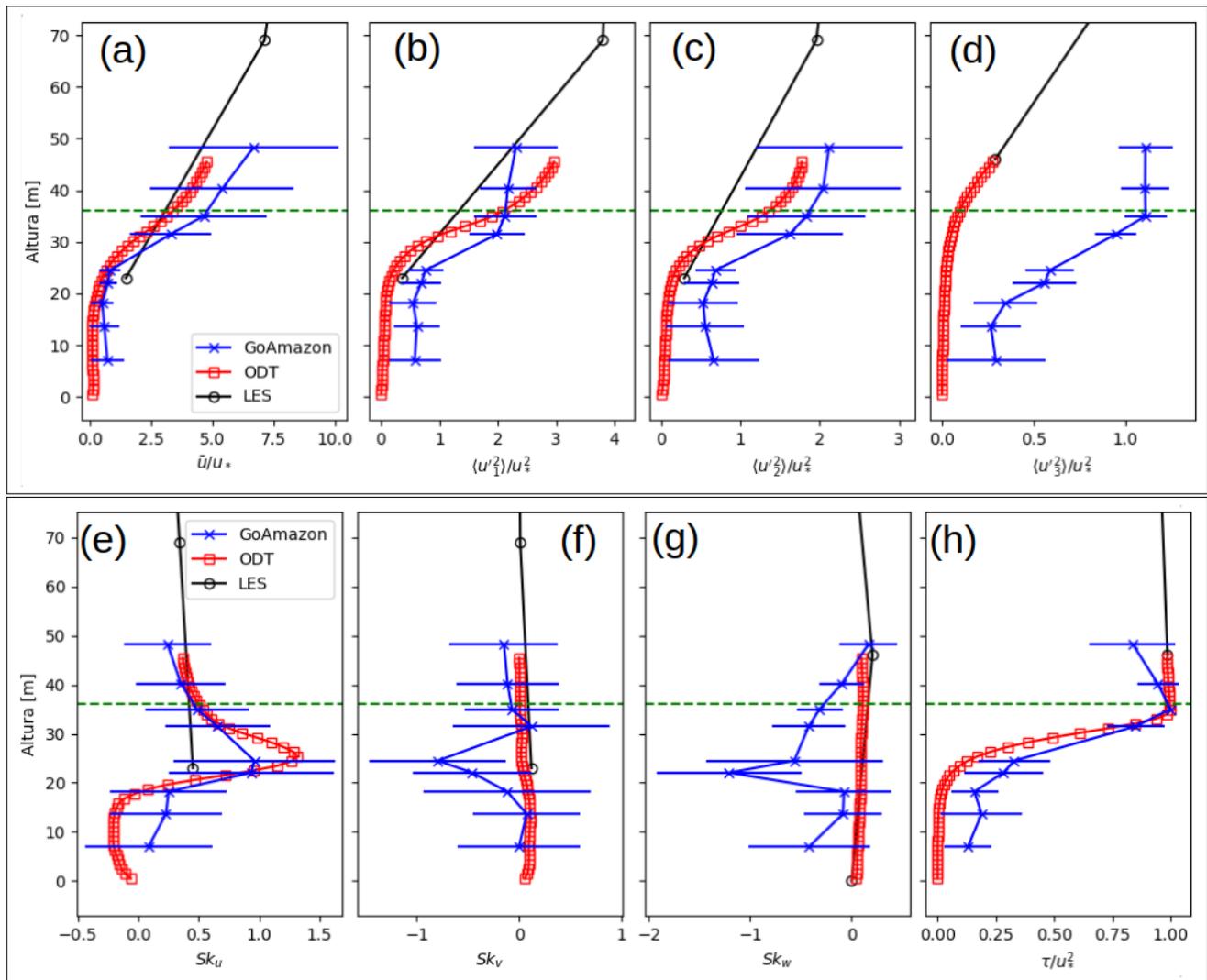
Fonte: Autores (2023)

Figura 1 – Resultados da média horizontal e temporal da simulação ilustrando todo o domínio vertical, sendo que a linha verde tracejada é a altura do dossel. A imagem (a) é a magnitude da velocidade horizontal, (b), (c) e (d) são as variâncias relativas às três direções  $i = 1, 2, 3$  respectivamente, (e), (f) e (h) são as assimetrias (*skewness*) relativas às três direções e (h) é a tensão de cisalhamento



Fonte: Autores (2023)

Figura 2 – Resultados da figura 1 na região do dossel



Fonte: Autores (2023)

A velocidade horizontal dada pela figura 2a possui um ponto de inflexão no perfil da curva na altura do dossel, o que é um comportamento esperado, pois dentro da floresta ela sofre uma resistência devido à força de arrasto. Essa velocidade calculada pelo ODT apresenta proximidade com os resultados do *GoAmazon*, porém, sua intensidade é menor em comparação aos dados empíricos. Na figura 1a, os dados da velocidade horizontal do LES estão condizentes com o esperado. Acima da CLA a velocidade média é constante e as outras estatísticas são zero, devido à presença do gradiente de temperatura potencial positivo que estabiliza o fluxo através do empuxo.

As variâncias do ODT geralmente possuem um comportamento adequado, mas que tendem a subestimar o valor real (Freire and Chamecki, 2018). Isso é evidente na figura 2b-d, quando comparado seu valor com os dados medidos no *GoAmazon*. A

assimetria (*skewness*) obtidas pelo ODT na figura 2e possui uma ordem de grandeza semelhante e sinal igual ao valor de referência, apesar do comportamento da curva ser diferente. Enquanto na figura 2f, a maior parte dos resultados simulados da assimetria estão de acordo com os dados empíricos, porém, existe uma divergência no meio do dossel. Devido à força de arrasto no topo do dossel, os vórtices que se encontram logo acima tendem a entrar com maior velocidade, resultando em uma assimetria positiva nas estatísticas horizontais. Contudo, a assimetria negativa na estatística vertical nos dados empíricos da figura 2g é consequência da perda de energia cinética, causada pelas forças de arrasto com relação aos processos de intrusão e exaustão de ar no dossel. Entretanto, esse efeito não foi capturado pelo ODT.

A tensão de cisalhamento total do ODT no gráfico da figura 2h possui um comportamento similar ao do *GoAmazon*. Uma das divergências ocorre logo acima do dossel, pois segundo os dados experimentais a reta da tensão já se inclina, enquanto para o ODT, a reta se mantém vertical (dentro da margem de erro dos dados). Quando alcança a altura da CLA, a tensão zera porque o regime do escoamento na atmosfera livre é aproximadamente laminar (figura 1h). Outra divergência entre os resultados ocorre dentro do dossel, onde os valores de tensão do ODT estão subestimados em relação aos do *GoAmazon*, indicando a necessidade de se usar uma força de arrasto menor na simulação. Devido à resistência causada pelo arrasto da floresta, a turbulência de dentro é menos intensa que acima, contudo, no topo da floresta ocorre o cisalhamento máximo e seu valor, dado por  $u_*^2$ , é utilizado na normalização de todas as estatísticas.

## 5 CONCLUSÕES

É possível concluir que o ODT é capaz de detalhar diversas propriedades estatísticas do escoamento próximo à superfície, porém, os resultados das variâncias são geralmente subestimados. Esse modelo de parede acoplado no LES se apresenta como uma ferramenta apta a realizar simulações em grandes domínios, mas considerando apenas as suas estatísticas, devido à natureza dos vórtices estocásticos do ODT (Freire and Chamecki, 2018). Apesar desse modelo ser computacionalmente mais custoso que outros modelos de parede, como o observado no trabalho de Freire (2022), seu tempo de processamento da simulação deverá ser factível para realizar a

simulação da CLA da floresta amazônica sob condições instáveis.

Esse artigo é parte de um projeto em andamento. É esperado que, até ao final desse projeto, as simulações da CLA da Amazônia em condições instáveis sejam concretizadas e validadas com dados experimentais.

## AGRADECIMENTOS

Esse estudo foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, concedido pelo processo 2022/04691-7 como processo vinculado ao 2018/24284-1) e apoiado pelo Centro de Ciências Matemáticas Aplicadas a Indústria (CEPID-CeMEAI) através do uso do cluster Euler (concedido pelo processo 2013/07375-0 da FAPESP).

## REFERÊNCIAS

- Bou-Zeid, E., Meneveau, C., & Parlange, M. (2005). A scale-dependent lagrangian dynamic model for large eddy simulation of complex turbulent flows. *Physics of fluids*, 17(2):025105.
- Davidson, P. A. (2015). *Turbulence: an introduction for scientists and engineers*. Oxford university press.
- Freire, L. S. (2022). Large-eddy simulation of the atmospheric boundary layer with near-wall resolved turbulence. *Boundary-Layer Meteorology*, 184(1):25–43.
- Freire, L. S. & Chamecki, M. (2018). A one-dimensional stochastic model of turbulence within and above plant canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 250:9–23.
- Gerken, T., Chamecki, M., & Fuentes, J. D. (2017). Air-parcel residence times within forest canopies. *Boundary-Layer Meteorology*, 165:29–54.
- Kerstein, A. R. (1999). One-dimensional turbulence: model formulation and application to homogeneous turbulence, shear flows, and buoyant stratified flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 392:277–334.
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., Clarke, L., Dahe, Q., Dasgupta, P., et al. (2014). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.
- Pope, S. B. (2000). *Turbulent flows*. Cambridge university press.
- Tota, J., Roy Fitzjarrald, D., da Silva Dias, M. A., et al. (2012). Amazon rainforest exchange of carbon and subcanopy air flow: Manaus Iba site—a complex terrain condition. *The Scientific World Journal*, 2012.

## Contribuições dos autores

### 1 – Mateus Popoff

Engenheiro Ambiental e Sanitarista, Mestrando

mateuspopoff@gmail.com

Contribution: Conceituação, Escrita - Primeira redação

### 2 – Livia Souza Freire

Professora, Pesquisadora

<https://orcid.org/0000-0002-8992-3869> • liviafreire@usp.br

Contribution: Supervisão

## Como citar este artigo

Popoff M. & Freire L. S. (2024)., Neutral atmospheric boundary layer simulation of the Amazon rainforest using Large-Eddy Simulation. *Ciência e Natura*, Santa Maria, v. 46, esp. 2, e87732. <https://doi.org/10.5902/2179460X87732>