

Edição Especial

A influência da topografia no escoamento turbulento entre a floresta Amazônica central e a atmosfera

The influence of topography on turbulent runoff between the central Amazon forest and the atmosphere

Raíssa Soares de Oliveira^I , Cléo Quaresma Dias Júnior^{II} ,
Daiane de Vargas Brondani^{III} 

^INational Institute of Amazonian Research, Amazônia, Brasil

^{II}Federal Institute of Pará, Pará, Brasil

^{III}Università degli Studi di Urbino "Carlo Bo", Urbino, Itália

RESUMO

Neste trabalho, é realizada uma investigação da influência da topografia na estrutura da turbulência da floresta Amazônica. O modelo *Parallelized Large Eddy Simulation Model* (PALM) foi utilizado com o objetivo de compreender melhor como a topografia atua na organização da turbulência, nos fluxos turbulentos de energia e massa, dentro e acima do dossel florestal. O conjunto de dados de entrada do modelo é proveniente do sítio ATTO (do inglês, *Amazon Tall Tower Observatory*) para o período de outubro a novembro de 2015. A partir dessas medidas, provenientes de diferentes alturas, duas simulações foram realizadas para o período diurno: com topografia e sem topografia. De modo geral, nas duas simulações, o perfil adimensional do vento mostra a presença de um ponto de inflexão, característico de região florestada. Além disso, a simulação com topografia induziu movimentos ascendentes e descendentes de ar, o que afetou a concentração de escalar passivo.

Palavras-chave: Floresta Amazônica; Topografia; Organização da turbulência; Simulação PALM

ABSTRACT

In this work, an investigation of the influence of topography on the structure of the turbulence of the Amazon rainforest is carried out. To better understand how topography acts in the organization of turbulence, in turbulent fluxes of energy and mass, inside and above the forest canopy, the Parallelized Large-Eddy Simulation Model (PALM) was used. The model's input dataset comes from the ATTO site (Amazon Tall Tower Observatory) between October and November 2015. From these measurements, from different heights, two simulations were performed for the daytime period: with topography and without topography. In both simulations, the U/U_h profile shows that the wind becomes weaker as it

bumps into the forest canopy, leading to an inflection point in the wind profiles. In addition, the simulation with topography induced ascending and descending movements, which affected the concentration of the passive scalar. Finally, the topography impacted the turbulence intensity.

Keywords: Amazon forest; Topography; Organization of turbulence; PALM simulation

1 INTRODUÇÃO

Poucos estudos buscaram entender a influência dos terrenos heterogêneos e abstrusos no transporte de massa e energia em regiões da floresta Amazônica (Andreae *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2019). Esse transporte pode sofrer alterações em sua estrutura acima de um terreno extremamente rugoso, revestido de complexidade, no qual tem características ainda mal compreendidas. (Oliveira, 2001; Stull, 1988). Ainda que o Método de Covariância de Vórtices Turbulentos (MCVT) seja a melhor recomendação para estimar os fluxos turbulentos, essa técnica apresenta dificuldade em capturar fluxos turbulentos de energia e matéria via torres micrometeorológicas, em condições heterogêneas e não estacionárias, como é o caso da Floresta Amazônica. É aqui que a simulação numérica dos grandes vórtices (*Large Eddy Simulation* – LES) mostra seu potencial para explorar a turbulência tridimensional. A maior vantagem dos modelos do tipo LES é que eles resolvem explicitamente os turbilhões responsáveis pelo transporte turbulento na escala de curto alcance e, com isso, descrevem com boa precisão os principais processos físicos e escoamentos turbulentos (Marques-Filho, 2005). Portanto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o papel da topografia do sítio do Observatório da Torre Alta da Amazônia (*Amazon Tall Tower Observatory* – ATTO) na organização da turbulência e nos fluxos turbulentos de energia e matéria dentro e acima do dossel florestal para condições diurnas.

2 CONFIGURAÇÃO DO MODELO PALM-LES

Recorreu-se ao modelo PALM desenvolvido por Raasch e Schröter (2001) e modificado por Maronga *et al.* (2015) para simular o efeito do dossel da vegetação

no escoamento turbulento acima do sítio ATTO. Foi introduzida a força de arrasto nas equações de Navier Stokes. Essa força, F_d , é expressa pelo produto do coeficiente de arrasto em kgm^{-1} , C_d ; densidade de área foliar em $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, LAD , e o quadrado da velocidade instantânea do vento médio em $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, u^2 ; conforme realizado por Shaw e Schumann (1992).

$$F_d = C_d \cdot LAD \cdot \overline{u^2} \quad (1)$$

Como o objetivo é avaliar a influência da topografia na organização da turbulência, foram realizadas duas simulações com o modelo PALM em três dimensões, através das médias horizontais de 8 torres espalhadas pelo domínio: (i) sobre uma topografia plana florestada e (ii) sobre a topografia real florestada; ambas realizadas para o período diurno. Para incorporar a rugosidade do dossel florestal, alguns parâmetros foram estabelecidos: usou-se o LAD obtido por Marques-Filho *et al.* (2005); altura do dossel (h) = 45 m; o domínio horizontal da simulação realizada foi $L_x = L_y = 79$ pontos de grade e a altura do domínio foi $L_z = 320$ pontos. A grade de resolução implementada foi $dx = dy = 50$ m para as componentes horizontais e $dz = 5$ m para a componente vertical. O intervalo de tempo para a realização das integrações foi de $dt = 1$ s. As simulações foram executadas para um intervalo de tempo de 4 h, sendo que a primeira hora foi descartada devido ao *spin-up*. Componentes horizontais u e v do vento geostrófico = 2 m/s e 0 m/s, respectivamente.

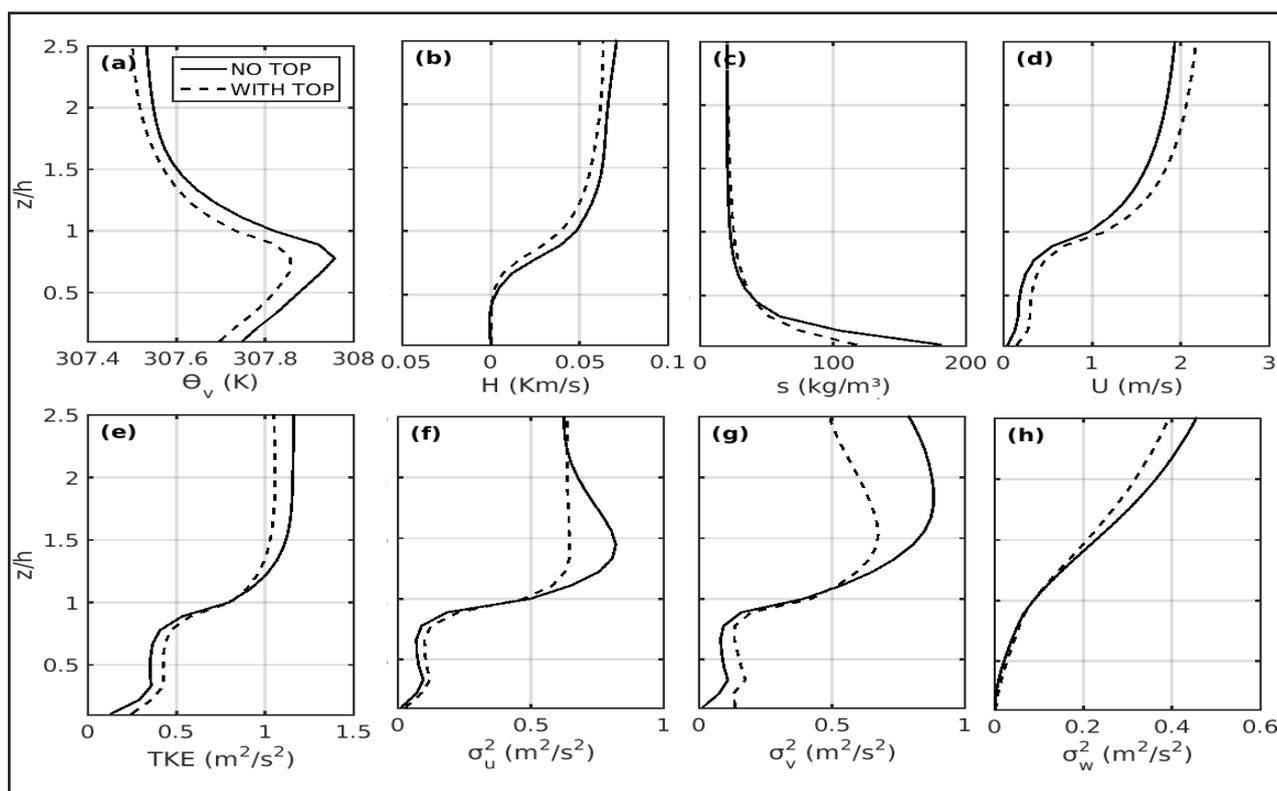
3 RESULTADOS

A Figura 1 mostra diferentes perfis verticais médios, calculados a partir de médias sobre um campo horizontal, para as simulações com (*with top*) e sem (*no top*) topografia. Como pode ser visto na Figura 1a, o valor máximo de temperatura potencial virtual (θ_v), para as duas simulações, localiza-se próximo ao topo do dossel florestal. Além disso, é possível notar que os valores de θ_v para o perfil da simulação com topografia foram sutilmente menores que os valores observados para a simulação

sem topografia, tanto para o interior do dossel florestal quanto para acima dele, seguindo a variação da temperatura com a elevação do terreno.

Na Figura 1b, os valores de H para a simulação sem topografia foram ligeiramente maiores que para a simulação com topografia. Uma vez que a fonte de calor foi inserida no topo do dossel, é razoável esperar que nesse local os valores de H sejam elevados. Os valores de H igual a zero nas proximidades do solo podem ser explicados pela i) presença do dossel florestal bastante denso, dificultando a chegada de energia no solo, ii) ausência de um fluxo de calor no/para o solo, o que caracteriza uma deficiência do modelo.

Figura 1 – Perfis verticais do escoamento turbulento durante o período diurno no sítio ATTO



Fonte: Autores/as (2022)

Legenda: a) temperatura virtual (θ_v); b) fluxo de calor sensível (H); c) concentração de escalar passivo (s); d) velocidade média do vento (U); e) energia cinética turbulenta (TKE); f) variância da velocidade horizontal do vento (σ_u^2); g) variância da velocidade horizontal do vento (σ_v^2); h) variância da velocidade vertical do vento (σ_w^2). As alturas (z) foram normalizadas pela altura do dossel (h). A linha contínua representa a simulação do ambiente florestal sem topografia e a linha tracejada representa o ambiente florestal com topografia representativa do sítio ATTO para condições diurnas

Verifica-se que os valores da concentração de escalar passivo (s , Figura 1c), uma vez que a fonte localiza-se no solo, os valores foram ligeiramente maiores para a simulação sem topografia.

A velocidade do vento (U , Figura 1d) apresenta um perfil “quase exponencial” no interior do dossel e logarítmico acima. Além disso, nota-se a presença de um ponto de inflexão nos perfis de ambas as simulações, comportamento esperado para regiões florestadas (Raupach; Finnigan; Brunet, 1996). Os valores de U para a simulação com topografia foram ligeiramente maiores que os valores encontrados para a simulação sem topografia, tanto dentro quanto acima do dossel florestal.

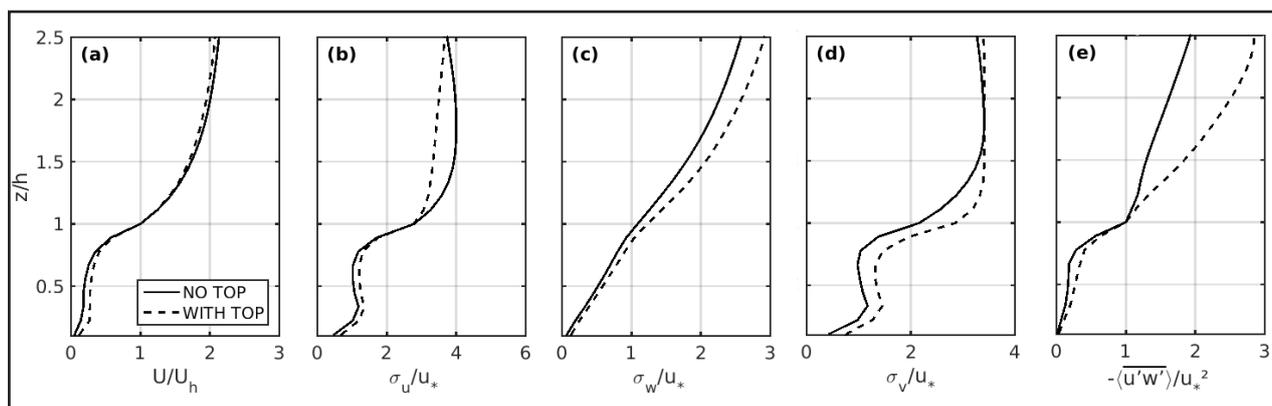
Na Figura 1e, os valores da simulação com topografia foram menores acima do dossel e ligeiramente maiores abaixo. As Figuras 1f, 1g e 1h fundamentam a Figura 1e, uma vez que são utilizadas tais variáveis para o cálculo de TKE . Portanto, observa-se um comportamento similar entre os perfis das variâncias e o perfil de TKE , ou seja, para a simulação com topografia os valores são maiores dentro do dossel e menores acima, quando comparados com a simulação sem topografia. Esse comportamento é especialmente observado para as componentes horizontais das variâncias, levando a conclusão de que a topografia apresenta um importante papel nas componentes horizontais do escoamento turbulento.

A Figura 2 mostra os perfis adimensionais de diferentes momentos estatísticos da turbulência, similar ao realizado por Raupach, Finnigan e Brunet (1996). Na Figura 2a, são mostrados os perfis da velocidade do vento médio normalizados pela velocidade do vento no topo do dossel (U/U_h). Os perfis mostram que o vento torna-se mais fraco na medida em que esbarra com o dossel da floresta, isso leva a um ponto de inflexão. Além disso, o fato de que os perfis de U/U_h apresentam valores mais similares que os perfis de U (Figura 1d) mostra a importância da adimensionalização para a obtenção de relações universais.

Os valores da Figura 2b, para a simulação com topografia, foram ligeiramente maiores dentro do dossel e menores acima. Os valores da Figura 2c foram maiores

dentro e acima do dossel para a simulação com topografia. Por outro lado, os valores da Figura 2d para a simulação com topografia foram ligeiramente maiores desde o solo até 1.5 z/h. As Figuras 2b, 2c e 2d neste trabalho referem-se a valores que frequentemente são obtidos para a subcamada rugosa (Raupach; Finnigan; Brunet, 1996). Nota-se nos perfis da Figura 2e que o dossel é um eficiente sumidouro de momento horizontal. Comparando as duas simulações, observa-se que os valores do perfil com topografia foram maiores no interior do dossel e acima também.

Figura 2 – Perfis verticais adimensionais do escoamento turbulento durante o período diurno no sítio ATTO



Fonte: Autores/as (2022)

Legenda: a) velocidade média do vento (U/U_h); b) desvio padrão da velocidade horizontal (σ_u/u_*); c) desvio padrão vertical do vento (σ_w/u_*); d) desvio padrão horizontal do vento (σ_v/u_*); e) fluxo de momento cinemático $-(\overline{u'w'})/u_*^2$

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com as simulações, o modelo representou bem a dinâmica das massas de ar dentro da floresta, no topo do dossel e acima da copa das árvores, fornecendo informações para um melhor entendimento sobre a atuação da topografia na turbulência da floresta Amazônica. Portanto, a topografia influencia na organização da turbulência e nos fluxos turbulentos de energia e matéria dentro e acima do dossel florestal para condições diurnas. Este estudo buscou contribuir para o campo da

micrometeorologia da camada limite amazônica, descrevendo como as características de superfícies heterogêneas e complexas alteram as propriedades de turbulência e processos de troca na interface floresta-atmosfera. Os resultados mencionados nesta pesquisa forneceram dados básicos confiáveis para melhor retratar a camada limite amazônica, assim como contribuir com um melhor entendimento sobre a influência da topografia no escoamento turbulento dentro e acima do dossel florestal.

AGRADECIMENTOS

Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Universidade do Estado do Amazonas (UEA) e *Amazon Tall Tower Observatory* (ATTO).

REFERÊNCIAS

- ANDREAE, M. 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, p. 10723-10776, 2015.
- CHEN, B.; CHAMECKI, M.; KATUL, G. G. Effects of Gentle Topography on Forest Atmosphere Gas Exchanges and Implications for Eddy Covariance Measurements. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 125, n. 11, 2019.
- MARQUES-FILHO, A. D. O.; DALLAROSA, R. G.; PACHÊCO, V. B. Radiação solar e distribuição vertical de área foliar em floresta-Reserva Biológica do Cuieiras- ZF2, Manaus. **Acta Amazon**, 2005, 35, 427-436.
- MARONGA, B.; GRYSKA, M.; HEINZE, R.; HOFFMAN, F.; KANANI-SUHRIN, F.; KECK, M.; KETELSEN, K.; LETZEL, M. O.; SUHRING, M.; RAASH, S. The Parallelized Large-Eddy Simulation Model (PALM) version 4.0 for atmospheric and oceanic flows: model formulation, recent developments, and future perspectives. **Geosci. Model Dev.**, 8, 2515-2551, 2015. doi: 10.5194/gmd-8-2515-2015.
- OLIVEIRA, P. J. **Estudo do vento e da turbulência na camada limite atmosférica em áreas de floresta e pastagem na Amazônia**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Especiais, São José dos Campos, 2001.
- RAASCH, S.; SCHRÖTER, M. Palm - a large-eddy simulation model performing on massively parallel computers. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 10, n. 5, p. 363-372, 2001.
- RAUPACH, M. R.; FINNIGAN, J. J.; BRUNET, Y. Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing-layer analogy. **Bound.-Layer Meteorol.** 1996, 351- 382. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00120941>.

SHAW, R. H.; SCHUMANN, U. Large-eddy simulation of turbulent flow above and within a forest. **Bound.-Layer Meteorol.** 1992, 61, 47–64.

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology.** Dordrecht: 2 ed, Kluwer Academic, 1988. p. 666.

Contribuição de autoria

1 – Raíssa Soares de Oliveira

Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Clima e Ambiente, INPA/UEA
<https://orcid.org/0000-0002-1414-5855> • rsdo.dcl23@uea.edu.br

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 – Daiane de Vargas Brondani

Pós - doutoranda do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA)
<https://orcid.org/0000-0002-7197-8618> • meteorologia.daia@gmail.com

Contribuição: Metodologia, Supervisão, Escrita – Revisão e Edição

Como citar este artigo

OLIVEIRA, R. S.; DIAS JÚNIOR, C. Q. ; BRONDANI, D. V.; A influência da topografia no escoamento turbulento entre a floresta Amazônica central e a atmosfera, **Ciência e Natureza**, Santa Maria, v. 45, ed. esp. 2, e76662, 2023 DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X76662>. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/76662>. Acesso em: dia mês abreviado ano.