

Uma revisão narrativa sobre as metodologias usadas no estudo de turbulência noturna dentro e acima da floresta Amazônica obtidos através do sítio experimental Amazon Tall Tower Observatory

A narrative review of the methodologies used in the study of nocturnal turbulence within and above the Amazon rainforest obtained through the Amazon Tall Tower Observatory experimental site

Una revisión narrativa de las metodologías utilizadas en el estudio de las turbulencias nocturnas dentro y por encima de la selva amazónica obtenidas a través del sitio experimental Amazon Tall Tower Observatory

Recebido: 17/10/2021 | Revisado: 24/10/2021 | Aceito: 24/10/2021 | Publicado: 27/10/2021

Valkiria Andrade Costa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1110-5855>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: valkiria.costa@ig.ufpa.br

Resumo

Este artigo tem o objetivo de documentar quais são as metodologias usadas nos estudos dos eventos turbulentos intermitentes de intensidade e periodicidade variáveis, que fornecem conexão episódica entre o dossel e a atmosfera e podem induzir comportamento oscilatório na camada limite noturna realizados especificamente no sítio experimental Amazon Tall Tower Observatory (ATTO) através de uma revisão narrativa de literatura dos principais artigos publicados durante o período de 2012 até 2021. Uma pesquisa bibliográfica foi realizada no banco de dados do projeto ATTO, onde esse banco de dados tem todas as publicações revisadas por pares em periódicos feitos neste projeto entre 2012 a 2021. Todos os artigos foram revisados, então a partir de 81 publicações no total apenas 3 artigos são categorizados como estudos sobre eventos turbulentos intermitentes na camada limite noturna. A partir disso, foi feita uma síntese das metodologias usadas nesses 3 artigos. Conclui-se, que se obteve dados de medidas diretas nas torres: direção e velocidade do vento, temperatura do ar, radiação líquida, precipitação, umidade do solo, fluxos de CO, CO₂, O₃, CH₄ e CN. E assim foram calculados variâncias, fluxos de gases, número de Richardson (acima e dentro do dossel), calor sensível, calor latente, energia cinética turbulenta, velocidade horizontal média do vento e decomposição de multiresolução. A principal novidade do presente estudo foi essa análise como uma síntese das principais metodologias usadas sobre os diferentes fluxos escalares e suas escalas de tempo dentro e acima de um dossel da floresta Amazônica no sítio experimental ATTO à noite.

Palavras-chave: ATTO; Floresta Amazônica; Turbulência noturna.

Abstract

This paper aims to document which methodologies are used in the studies of intermittent turbulent events of variable intensity and periodicity, which provide an episodic connection between the canopy and the atmosphere and can induce oscillatory behavior in the nocturnal boundary layer carried out specifically at the Amazon Tall experimental site Tower Observatory (ATTO) through a narrative literature review of the main articles published during the period 2012 to 2021. A literature search was carried out in the ATTO project database, where this database has all peer-reviewed publications in journals made in this project between 2012 to 2021. All articles were reviewed, so from 81 publications in total only 3 articles are categorized as studies on intermittent turbulent events in the nocturnal boundary layer. From this, a synthesis of the methodologies used in these 3 articles was made. It is concluded that data were obtained from direct measurements in the towers: wind direction and speed, air temperature, net radiation, precipitation, soil moisture, CO, CO₂, O₃, CH₄ and CN fluxes. Thus, variances, gas fluxes, Richardson number (above and inside the canopy), sensible heat, latent heat, turbulent kinetic energy, mean horizontal wind velocity and multiresolution decomposition were calculated. The main novelty of the present study was this analysis as a synthesis of the main methodologies used on the different scalar flows and their time scales within and above an Amazon rainforest canopy at the ATTO experimental site at night.

Keywords: ATTO; Amazon rainforest; Night turbulence.

Resumen

Este artículo tiene como objetivo documentar qué metodologías se utilizan en los estudios de eventos turbulentos intermitentes de intensidad y periodicidad variable, que proporcionan una conexión episódica entre el dosel y la atmósfera y pueden inducir un comportamiento oscilatorio en la capa límite nocturna realizados específicamente en el Amazonas Alto. sitio experimental Tower Observatory (ATTO) a través de una revisión narrativa de la literatura de los principales artículos publicados durante el período 2012 a 2021. Se realizó una búsqueda bibliográfica en la base de datos del proyecto ATTO, donde esta base de datos tiene todas las publicaciones revisadas por pares en revistas realizadas en este proyecto entre 2012 y 2021. Todos los artículos fueron revisados, por lo que de 81 publicaciones en total, sólo 3 artículos están categorizados como estudios sobre eventos turbulentos intermitentes en la capa límite nocturna. A partir de esto, se realizó una síntesis de las metodologías utilizadas en estos 3 artículos. Se concluye que los datos se obtuvieron a partir de mediciones directas en las torres: dirección y velocidad del viento, temperatura del aire, radiación neta, precipitación, humedad del suelo, flujos de CO, CO₂, O₃, CH₄ y CN. Así, se calcularon las variaciones, los flujos de gas, el número de Richardson (arriba y dentro del dosel), el calor sensible, el calor latente, la energía cinética turbulenta, la velocidad media del viento horizontal y la descomposición multiresolución. La principal novedad del presente estudio fue este análisis como síntesis de las principales metodologías utilizadas en los diferentes flujos escalares y sus escalas de tiempo dentro y sobre un dosel de la selva amazónica en el sitio experimental ATTO durante la noche.

Palabras clave: ATTO; Selva Amazónica; Turbulencia nocturna.

1. Introdução

A Amazônia comporta-se como o pulmão e o coração pulsante do nosso planeta. Por isso, é fundamental compreender melhor os relevantes regimes e interatividades dentro do ecossistema. O Observatório de Torre Alta Amazônia - Amazon Tall Tower Observatory (ATTO) é um local de pesquisa na floresta amazônica brasileira, onde no centro há um mastro feito de barras de aço de 325 metros de altura. Ele também contém duas outras torres de 80 metros de altura, além de vários laboratórios em containers e um acampamento para alojar os cientistas e técnicos que lá trabalham. O projeto foi criado em 2009 e o principal objetivo é ampliar a compreensão da Floresta Amazônica e suas interações com o solo abaixo e a atmosfera acima. Deseja-se aprender mais sobre os ciclos biogeoquímicos (como o ciclo do carbono), o ciclo da água e os fluxos de energia na Amazônia. Também deseja-se definir qual o impacto desses ciclos no clima mundial e como são influenciados pela mudança climática. Com os resultados do ATTO, pretende-se aperfeiçoar os modelos de previsões climáticas e reconhecer a relevância da Amazônia dentro do sistema climático (“Observatório de Torre Alta”, [s.d.]).

Em modo geral, os tipos de experimentos realizados no sítio experimental ATTO na área das ciências atmosféricas são: medições de variáveis micrometeorológicas e químicas atmosféricas, iniciadas desde 2012, se ampliando nos últimos anos. As medições meteorológicas e micrometeorológicas incluem perfis de temperatura e vento, precipitação, fluxos de água e energia, componentes de turbulência, perfis de temperatura do solo e fluxos de calor do solo, fluxos de radiação e visibilidade. Uma árvore é instrumentada para medir os perfis de temperatura do caule, intensidade de luz e teor de água em coberturas criptogâmicas. As medições de gases traço compreendem o monitoramento contínuo de dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano e ozônio em cinco a oito alturas diferentes, complementadas por uma variedade de espécies adicionadas medidas durante campanhas intensivas. Medições ópticas, microfísicas e químicas do aerossol estão sendo feitas acima do dossel, bem como no espaço do dossel. Incluem-se medições de dispersão e absorção de luz de aerossol, fluorescência, número e distribuições de tamanho de volume, composição química, concentrações de núcleos de condensação de nuvem e higroscopicidade (Andreae et al., 2015).

De acordo com Andreae et al. (2015), durante o dia a atividade turbulenta intensa fornece um acoplamento eficaz e vigoroso entre a camada de dossel e a atmosfera acima dela. Como consequência, os perfis verticais de espécies químicas não costumam mostrar variações abruptas induzidas por episódios de divergência de fluxo vertical intensa. Consequentemente, os fluxos escalares entre o dossel e a atmosfera são relativamente bem comportados durante o dia, de modo que sua interferência a partir dos perfis verticais das quantidades médias pode ser alcançada usando relações de similaridade estabelecidas. À noite, por

outro lado, a intensidade de turbulência reduzida muitas vezes faz com o que o dossel se desacople do ar acima dele (Fitzjarrald e Moore, 1990; Betts et al., 2009; van Gorsel et al., 2011; Oliveira et al., 2013). Nessas circunstâncias, os fluxos verticais convergem para camadas superficiais nas quais os escalares podem se acumular intensamente em curtos períodos de tempo. Na ausência de turbulência convectiva, que é o principal fator para o transporte diurno, outros processos físicos tornam-se relevantes na camada limite estável, como o fluxo de drenagem (Sun et al., 2004; Xu et al., 2015), divergência vertical de radiação (Drüe e Heinemann, 2007; Hoch et al., 2007), intermitência global (Mahrt, 1999), interações atmosfera-superfície (Steenefeld et al., 2008) e ondas de gravidade (Nappo, 1991; Brown e Wood., 2003; Zeri e Sa, 2011).

O comportamento oscilatório na camada limite noturna é caracterizado por breves episódios de turbulência com períodos intermediários de flutuações relativamente fracas ou incomensuravelmente pequenas (Mahrt, 1999). Então é importante entender o papel dos eventos turbulentos intermitentes de intensidade e periodicidade variáveis, que fornecem conexão episódica entre o dossel e a atmosfera induzindo esse comportamento oscilatório. Em alguns casos, esses eventos podem compreender quase a totalidade dos fluxos escalares durante uma determinada noite. O desacoplamento noturno ocorre com bastante frequência no sítio ATTO, geralmente pontuado por episódios de mistura intermitentes, de acordo com estudos anteriores feitos sobre a Floresta Amazônica (Fitzjarrald e Moore, 1990; Ramos et al., 2004). Durante uma típica noite desacoplada e intermitente, os componentes horizontais do vento são fracos em magnitude e altamente variáveis temporalmente, frequentemente mudando os sinais de uma maneira imprevisível. Como consequência, é comum que ventos de todas as direções possíveis ocorram em tal noite. A relevância dos eventos intermitentes para caracterizar a troca do dossel-atmosfera torna-se clara quando se olha para os fluxos escalares, como CO₂ (Andreae et al., 2015).

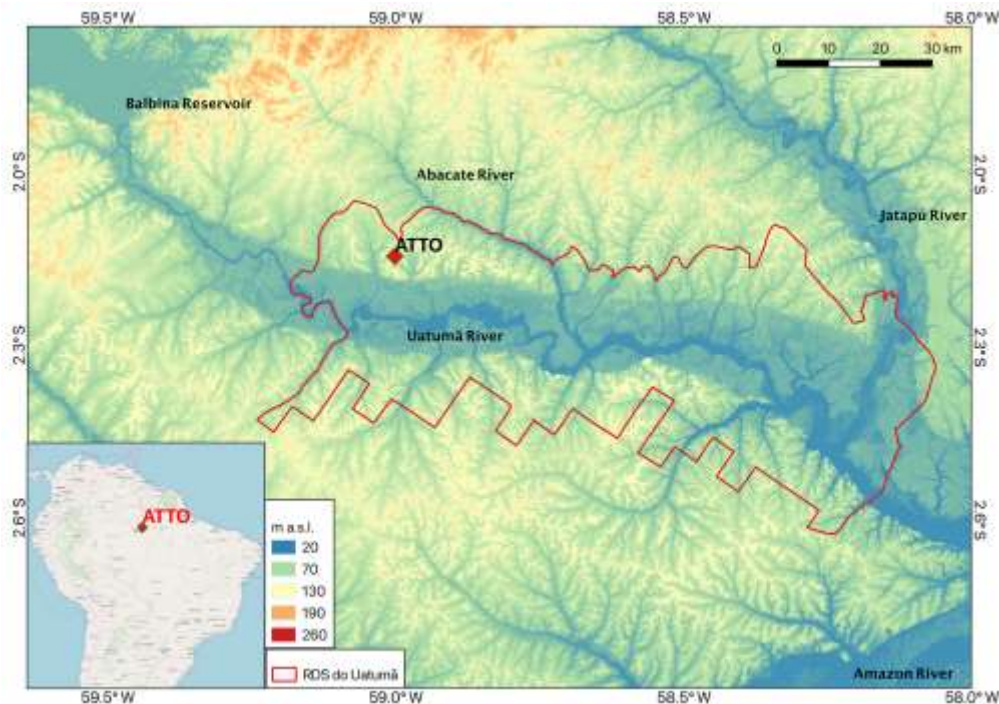
Então, de acordo com Andreae et al (2015), uma compreensão adequada dos perfis e fluxos verticais noturnos de escalares acima de qualquer dossel da floresta depende, portanto, da explicação dos controles atmosféricos na turbulência intermitente no nível do dossel. Na Floresta Amazônica, essa necessidade é potencializada, pois há indícios de que a turbulência é mais intermitente, possivelmente como consequência das instabilidades de fluxo geradas pelo perfil do vento no nível do dossel (Ramos et al., 2004). Ainda não está claro o que desencadeia esses eventos intermitentes. Em geral, estudos anteriores indicam que os eventos mais intensos são gerados acima da camada limite noturna, propagando-se de cima (Sun et al., 2002, 2004). Por outro lado, eventos menos intensos que ocorrem no estado desacoplado têm sido caracterizados como modos naturais de variabilidade da turbulência gerada próximo à superfície (Costa et al., 2001).

Este presente artigo tem o objetivo de entender e documentar quais são as metodologias usadas nos estudos dos eventos turbulentos intermitentes de intensidade e periodicidade variáveis, que fornecem conexão episódica entre o dossel e a atmosfera e podem induzir comportamento oscilatório na camada limite noturna realizados especificamente no sítio experimental Amazon Tall Tower Observatory (ATTO) através de uma revisão narrativa de literatura dos principais artigos publicados durante o período de 2012 até 2021.

2. Metodologia

O sítio experimental ATTO está localizado a 150 km a nordeste de Manaus, na Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã (RDSU), na Amazônia central (Figura 1). Foi instalado em uma região de floresta tropical intocada na Bacia Amazônica central. A RDSU é cortada ao meio pelo rio Uatumã em toda a sua extensão NE-SW. O clima é tropical úmido, caracterizado por uma estação chuvosa acentuada de fevereiro a maio e uma estação mais seca de junho a outubro. Foram construídas duas torres de 80 metros e outra maior de 325 metros. O local das torres está localizado aproximadamente 12 km a NE do rio Uatumã (Andreae et al., 2015).

Figura 1: Localização do ATTO em relação ao continente. A topografia, ao fundo, é baseada no modelo de elevação da missão Shuttle Radar Topography Mission. Os limites da Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã (USDR) são destacados no polígono vermelho e os principais rios são identificados.



Fonte: Botía et al. (2020).

Uma pesquisa bibliográfica foi realizada no banco de dados do projeto ATTO, acessado em 24 de setembro de 2021, onde esse banco de dados tem todas as publicações revisadas por pares em periódicos feitas no projeto ATTO entre 2012 a 2021 (Department Biogeochemical Processes | ATTO / Publications, [s.d.]). Todos os artigos foram completamente revisados e destacados aqui de forma que seja uma revisão narrativa baseado na literatura de Koche (2001), Pereira et al. (2018) e Estrela (2018), então a partir de 81 publicações no total desse banco de dados apenas 3 artigos são categorizados como estudos sobre eventos turbulentos intermitentes na camada limite noturna. Então a partir disso, foi feita uma síntese das metodologias usadas nos artigos de Andreae et al. (2015), Oliveira et al. (2018) e Botía et al. (2020).

3. Resultados e Discussão

As características da camada limite noturna (CLN) do sítio ATTO próximo ao rio Uatumã foram analisadas no artigo de Andreae et al. (2015) para as estações chuvosa e seca, com base em duas metodologias: (i) as classes termodinâmicas da CLN propostas por Cava et al. (2004) e (ii) os regimes de turbulência propostos por Sun et al., (2012). A classificação de Cava et al. (2004) de séries temporais noturnas é baseada na existência de um padrão dominante em dados escalares, como concentração de CO₂, temperatura ou umidade específica. Também leva em consideração a variabilidade da rede noturna de radiação (R_n), medido a uma taxa de amostragem suficientemente alta, o que permite a detecção de nuvens sendo identificado por rápidas mudanças de R_n maiores que 10 Wm⁻²). As classes (I), (II) e (III) são definidas pelas condições atmosféricas livres da influência das nuvens, que podem perturbar a camada limite estável acima da floresta. As classes são definidas conforme seguido por Cava et al. (2004): (I) a ocorrência de estruturas coerentes na forma de “rampas” em séries temporais escalares; (II) a presença de sinais sinusoidais (“ondulações”) que ocorrem simultaneamente nas séries temporais dos escalares acima do dossel e que são típicos de ondas gravitacionais; (III) a existência de estrutura fina de turbulência [de acordo com Cava et al., (2004), “períodos

que carecem de qualquer estrutura geométrica ou periodicidade nos dados da série temporal”]. As duas últimas categorias, (IV) e (V), da classificação de Cava et al. (2004) referem-se à ocorrência simultânea de nuvens e movimentos desorganizados com variações dentro de $Rn > 10 Wm^{-2}$, são (IV) casos em que a rede de radiação induz movimentos organizados e (V) aqueles em que a mudança na radiação líquida não está correlacionada com as mudanças nos movimentos organizados.

Ainda sobre Andreae et al. (2015), a busca de parâmetros para caracterizar os regimes de turbulência da camada limite noturna é baseada em Sun et al. (2012). Os três regimes de turbulência na CLN são definidos da seguinte forma: o regime 1 mostra turbulência fraca gerada por instabilidade de cisalhamento local e modulada pelo gradiente vertical de temperatura potencial. O regime 2 mostra forte turbulência e a velocidade do vento excedendo um valor limite (V_{Ω}) acima do qual a turbulência aumenta sistematicamente com o aumento da velocidade do vento. Isso descreve a turbulência gerada pela instabilidade de cisalhamento em massa, definida como a velocidade média do vento dividida pela altura de medição. No regime 3, a turbulência ocorre nas velocidades do vento inferiores a V_{Ω} , mas está associado a surtos ocasionais de turbulência de cima para baixo. Nos regimes 1 e 2, a escala de velocidade turbulenta (VTKE) está relacionada com a velocidade média de velocidade turbulenta. VTKE (Equação 1) é definido da seguinte forma:

$$VTKE = \left[(1/2) (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2) \right]^{1/2}, \quad (1)$$

Onde u , v e w são os componentes dos ventos zonal, meridional e vertical, respectivamente, e σ representa o desvio padrão de cada variável.

Para o artigo de Oliveira et al. (2018), foram analisados dados noturnos de 20 dias, de 1 a 20 de novembro de 2015. Os períodos noturnos foram restritos ao horário das 20h às 05h, para evitar a amostragem de eventos intensos associados às características de transição entre as camadas limites diurnas e noturnas. São usados os níveis de 22, 41, 55 e 80 metros. Os dados foram analisados em duas janelas de tempo diferentes: 5 e 109 min. A decomposição multiresolução (Howell e Mahrt, 1997; Vickers e Mahrt, 2003; Voronovich e Kiely, 2007) foi aplicada a 109 min, o que corresponde a grupos de 216 de pontos de dados. Em contraste com a transformada de Fourier, que determina a periodicidade, esta técnica extrai principalmente a largura dos eventos turbulentos dominantes, decompondo localmente as variâncias. Acevedo e Mahrt (2010) usaram a decomposição multiresolução para analisar os perfis verticais do componente não turbulento dos fluxos de calor sensíveis. Variâncias e fluxos com uma média de tempo de 109 minutos foram obtidos a partir da integração dos respectivos espectros de multiresolução e cospectra para cada série separadamente e então calculada a média. Portanto, calor latente e sensível, CO₂ e os fluxos de ozônio (Equação 2) são dados por:

$$F_H = \sum_{\tau} C_{w'\theta'_{\tau}}, \quad F_q = \sum_{\tau} C_{w'q'_{\tau}}, \quad F_{CO_2} = \sum_{\tau} C_{w'C'_{\tau}}, \quad \text{and} \quad F_{O_3} = \sum_{\tau} C_{w'O'_{\tau}}; \quad (2)$$

Onde, a energia cinética turbulenta (Equação 3) é:

$$TKE = 0.5 \sum_{\tau} (S_u + \dots) \quad (3)$$

E a componente vertical do vento (Equação 4) é:

$$\sigma_w = (\sum_{\tau} S_w)^{1/2}. \quad (4)$$

Ainda sobre Oliveira et al. (2018), outras variáveis como a de Richardson (Ri) e a velocidade horizontal média do vento (V), é calculado usando o mesmo intervalo de tempo usado na decomposição de multiresolução. À noite, espera-se que as escalas temporais sejam menores. Campos et al (2009) mostrou que a contribuição da turbulência para os fluxos noturnos acima da copa em outro local na floresta Amazônica ocorre na temperatura em escalas menores que 200 segundos. O uso de uma janela de tempo de 109 minutos é necessário para determinar a contribuição de movimentos turbulentos para os fluxos. No entanto, para tentar reduzir qualquer contribuição do transporte não turbulento, momentos estatísticos, fluxos e outras variáveis também foram calculados usando uma janela de tempo de 5 min, conforme usado por Dupont e Patton (2012). Quantidades como calor sensível,

calor latente, CO₂, fluxos de Ozônio, energia cinética turbulenta (TKE), velocidade horizontal média do vento (V), número de Richardson e σ_c foram determinados para 5 e 109 min. O número de Richardson em massa foi usado para quantificar a estabilidade atmosférica. Similarmente ao uso em Bosveld et al. (1999), Mammarella et al. (2007) e Oliveira et al. (2013), o número de Richardson dentro do dossel (Equação 5) e o número de Richardson acima do dossel (Equação 6) foram definidos como:

$$Ri_{can} = \frac{g}{\Theta} \Delta z \frac{\theta_{41m} - \theta_{22m}}{(V_{41m} - V_{22m})^2} \quad (5)$$

$$Ri_{top} = \frac{g}{\Theta} \Delta z \frac{\theta_{80m} - \theta_{41m}}{(V_{80m} - V_{41m})^2}, \quad (6)$$

Onde g é a aceleração gravitacional, θ é a temperatura potencial média da camada, Δz é a diferença de altura entre os dois níveis, e Θ e V são a temperatura potencial média e a velocidade horizontal média do vento em cada nível, respectivamente.

Por fim, para o artigo de Botía et al. (2020), o estudo utilizou como dados meteorológicos a direção do vento, velocidade do vento, temperatura do ar, radiação líquida, precipitação e umidade do solo. Também foi usado razão de mistura de CH₄ e dados meteorológicos em diferentes resoluções de tempo (Ver Tabela 1).

Tabela 1: Dados observacionais usados especificando a resolução de tempo e o período de tempo usado.

Dados usados	Resolução de tempo	Período de tempo
Taxas de mistura de CH ₄	30 minutos	06/2018 a 11/2018
Dados meteorológicos	30 minutos	06/2018 a 11/2018
Taxas de mistura de CH ₄	15 minutos	03/2014 a 09/2014
Dados meteorológicos	10 Hz (média de 1 min)	03/2014 a 09/2014
Proporções de mistura de CH ₄	30 minutos	06/2018 a 11/2018
Razões de mistura de CO em CH ₄ /CO	30 minutos	06/2018 a 11/2018
Taxas de mistura de CO em Carbono Negro/CO	30 minutos	06/2013 a 05/2018
Carbono Negro	30 minutos	06/2013 a 05/2018

Fonte: Botía et al. (2020).

O registro de proporção de mistura de CH₄ cobre o período de junho de 2013 a novembro de 2018, o que permitiu estudar a variabilidade diurna e sazonal nesse período. Usou-se dados meteorológicos de alta frequência (10 Hz), em particular todos os componentes do vento (u , v e C), a fim de associar regimes de turbulência com proporções de mistura de CH₄ em resolução de 15 min. Concentrações de massa equivalente de CO e carbono negro (CN) para avaliar a influência das emissões de queima de biomassa em sinais de CH₄. As concentrações de massa bruta de CN na resolução de tempo de 1 min foram obtidas usando uma absorção de partículas de aerossol depositadas em um filtro, que é convertido para a concentração de massa de CN, assumindo uma seção transversal de absorção de massa de 6,6 m²g⁻¹. Gradientes positivos de CH₄ foram associados à direção do vento usando o pacote Openair em R desenvolvido por Carslaw e Ropkins (2012). Este pacote R fornece funções predeterminadas úteis para interpretar as características da poluição do ar com base na velocidade do vento, direção do vento e

outras variáveis (Botía et al., 2020).

4. Conclusão

A principal novidade do presente estudo foi uma análise detalhada como uma síntese das principais metodologias usadas sobre os diferentes fluxos escalares e suas escalas de tempo dentro e acima de um dossel da floresta Amazônica no sítio experimental ATTO à noite. Então conclui-se que nesses artigos, se obtém dados de medidas diretas nas torres: direção do vento, velocidade do vento, temperatura do ar, radiação líquida, precipitação, umidade do solo, fluxos de CO, CO₂, O₃, CH₄ e CN. E assim foram calculados variâncias, fluxos de gases, número de Richardson (acima e dentro do dossel), calor sensível, calor latente, energia cinética turbulenta, velocidade horizontal média do vento e decomposição de multiresolução.

Espera-se num futuro próximo, onde a torre de 325 m esteja totalmente instrumentada e comece a operar continuamente em um futuro próximo no local da ATTO. Isso permitirá abordar questões como a sazonalidade da troca em diferentes escalas, bem como a espessura da camada limite, a natureza da troca escalar dentro e acima do dossel e o estudo sobre o gradiente positivo se estende às camadas superiores da camada limite noturna com muito mais detalhes.

Referências

- Acevedo, O. C., Costa, F. D., Oliveira, P. E. S., Puhales, F. S., Degrazia, G. A., & Roberti, D. R. (2014). The Influence of Submeso Processes on Stable Boundary Layer Similarity Relationships. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 71(1), 207–225. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-13-0131.1>
- 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., da Silva, N. F., Dias, N. L., Dias-Júnior, C. Q., Ditas, F., Ditz, R., Godoi, A. F. L., Godoi, R. H. M., Heimann, M., Hoffmann, T., ... Yáñez-Serrano, A. M. (2015). The Amazon Tall Tower Observatory (ATTO): Overview of pilot measurements on ecosystem ecology, meteorology, trace gases, and aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(18), 10723–10776. <https://doi.org/10.5194/acp-15-10723-2015>
- Aniversário dos marcos da ATTO. (2020, agosto 14). ATTO - Amazon Tall Tower Observatory. <https://www.attoproject.org/pt/atto-celebrates-anniversary-of-milestones/>
- Betts, A. K., Fisch, G., von Randow, C., Silva Dias, M. A. F., Cohen, J. C. P., da Silva, R., & Fitzjarrald, D. R. (2009). The Amazonian boundary layer and mesoscale circulations. In M. Keller, M. Bustamante, J. Gash, & P. Silva Dias (Orgs.), *Geophysical Monograph Series* (Vol. 186, p. 163–181). American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/2008GM000725>
- Botía, S., Gerbig, C., Marshall, J., Lavric, J. V., Walter, D., Pöhlker, C., Holanda, B., Fisch, G., de Araújo, A. C., Sá, M. O., Teixeira, P. R., Resende, A. F., Dias-Junior, C. Q., van Asperen, H., Oliveira, P. S., Stefanello, M., & Acevedo, O. C. (2020). Understanding nighttime methane signals at the Amazon Tall Tower Observatory (ATTO). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(11), 6583–6606. <https://doi.org/10.5194/acp-20-6583-2020>
- Bosveld, F. C., Holtslag, A. A. M., & Van Den Hurk, B. J. J. M. (1999). Nighttime convection in the interior of a dense Douglas fir forest. *Boundary-Layer Meteorology*, 93(2), 171–195. <https://doi.org/10.1023/A:1002039610790>
- Brown, A. R., & Wood, N. (2003). Properties and Parameterization of the Stable Boundary Layer over Moderate Topography. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 60(22), 2797–2808. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2003\)060<2797:PAPOTS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2003)060<2797:PAPOTS>2.0.CO;2)
- Campos, J. G., Acevedo, O. C., Tota, J., & Manzi, A. O. (2009). On the temporal scale of the turbulent exchange of carbon dioxide and energy above a tropical rain forest in Amazonia. *Journal of Geophysical Research*, 114(D8), D08124. <https://doi.org/10.1029/2008JD011240>
- Carlsaw, D. C., & Ropkins, K. (2012). openair—An R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software*, 27–28, 52–61. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.008>
- Cava, D., Giostra, U., Siqueira, M., & Katul, G. (2004). Organised Motion and Radiative Perturbations in the Nocturnal Canopy Sublayer above an Even-Aged Pine Forest. *Boundary-Layer Meteorology*, 112(1), 129–157. <https://doi.org/10.1023/B:BOUN.0000020160.28184.a0>
- Costa, F. D., Acevedo, O. C., Mombach, J. C. M., & Degrazia, G. A. (2011). A Simplified Model for Intermittent Turbulence in the Nocturnal Boundary Layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 68(8), 1714–1729. <https://doi.org/10.1175/2011JAS3655.1>
- Department Biogeochemical Processes | ATTO / Publications. ([s.d.]). <https://www.bgc-jena.mpg.de/bgp/index.php/ATTO/Publications>
- Drüe, C., & Heinemann, G. (2007). Characteristics of intermittent turbulence in the upper stable boundary layer over Greenland. *Boundary-Layer Meteorology*, 124(3), 361–381. <https://doi.org/10.1007/s10546-007-9175-8>
- Dupont, S., & Patton, E. G. (2012). Influence of stability and seasonal canopy changes on micrometeorology within and above an orchard canopy: The CHATS experiment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 157, 11–29. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.01.011>
- Estrela, C. (2018). *Metodologia científica: ciência, ensino, pesquisa*. Artes Médicas.

- Fitzjarrald, D. R., & Moore, K. E. (1990). Mechanisms of nocturnal exchange between the rainforest and the atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 95(D10), 16839. <https://doi.org/10.1029/JD095iD10p16839>
- Hoch, S. W., Calanca, P., Philipona, R., & Ohmura, A. (2007). Year-Round Observation of Longwave Radiative Flux Divergence in Greenland. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(9), 1469–1479. <https://doi.org/10.1175/JAM2542.1>
- Howell, J. F., & Mahrt, L. (1997). Multiresolution Flux Decomposition. *Boundary-Layer Meteorology*, 83(1), 117–137. <https://doi.org/10.1023/A:1000210427798>
- Köche, J. C. (2016). *Fundamentos de metodologia científica*. Editora Vozes.
- Mahrt, L. (1999). Stratified Atmospheric Boundary Layers. *Boundary-Layer Meteorology*, 90(3), 375–396. <https://doi.org/10.1023/A:1001765727956>
- Mammarella, I., Kolari, P., Rinne, J., Keronen, P., Pumpanen, J., & Vesala, T. (2007). Determining the contribution of vertical advection to the net ecosystem exchange at Hyytiälä forest, Finland. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 59(5), 900–909. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2007.00306.x>
- Nappo, C. J.: *An Introduction to Atmospheric Gravity Waves*, Amsterdam, Academic Press, 276 pp., 2002.
- Observatório de Torre Alta. ([s.d.]). ATTO - Amazon Tall Tower Observatory. Recuperado 24 de setembro de 2021, de <https://www.attoproject.org/pt/por-atto/por-atto/>
- Oliveira, P. E. S., Acevedo, O. C., Moraes, O. L. L., Zimmermann, H. R., & Teichrieb, C. (2013). Nocturnal Intermittent Coupling Between the Interior of a Pine Forest and the Air Above It. *Boundary-Layer Meteorology*, 146(1), 45–64. <https://doi.org/10.1007/s10546-012-9756-z>
- Oliveira, P. E. S., Acevedo, O. C., Sörgel, M., Tsokankunku, A., Wolff, S., Araújo, A. C., Souza, R. A. F., Sá, M. O., Manzi, A. O., & Andreae, M. O. (2018). Nighttime wind and scalar variability within and above an Amazonian canopy. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(5), 3083–3099. <https://doi.org/10.5194/acp-18-3083-2018>
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*.
- Ramos, F. M., Bolzan, M. J. A., Abreu Sá, L. D., & Rosa, R. R. (2004). Atmospheric turbulence within and above an Amazon forest. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 193(1–4), 278–291. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2004.01.026>
- Steenefeld, G. J., Holtslag, A. A. M., Nappo, C. J., van de Wiel, B. J. H., & Mahrt, L. (2008). Exploring the Possible Role of Small-Scale Terrain Drag on Stable Boundary Layers over Land. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(10), 2518–2530. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1816.1>
- 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. (2002). Intermittent Turbulence Associated with a Density Current Passage in the Stable Boundary Layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 105(2), 199–219. <https://doi.org/10.1023/A:1019969131774>
- Sun, J., Lenschow, D. H., Burns, S. P., Banta, R. M., Newsom, R. K., Coulter, R., Frasier, S., Ince, T., Nappo, C., Balsley, B. B., Jensen, M., Mahrt, L., Miller, D., & Skelly, B. (2004). Atmospheric Disturbances that Generate Intermittent Turbulence in Nocturnal Boundary Layers. *Boundary-Layer Meteorology*, 110(2), 255–279. <https://doi.org/10.1023/A:1026097926169>
- Sun, J., Mahrt, L., Banta, R. M., & Pichugina, Y. L. (2012). Turbulence Regimes and Turbulence Intermittency in the Stable Boundary Layer during CASES-99. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 69(1), 338–351. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-11-082.1>
- van Gorsel, E., Harman, I. N., Finnigan, J. J., & Leuning, R. (2011). Decoupling of air flow above and in plant canopies and gravity waves affect micrometeorological estimates of net scalar exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(7), 927–933. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.02.012>
- Vickers, D., & Mahrt, L. (2006). A Solution for Flux Contamination by Mesoscale Motions With Very Weak Turbulence. *Boundary-Layer Meteorology*, 118(3), 431–447. <https://doi.org/10.1007/s10546-005-9003-y>
- Voronovich, V., & Kiely, G. (2007). On the gap in the spectra of surface-layer atmospheric turbulence. *Boundary-Layer Meteorology*, 122(1), 67–83. <https://doi.org/10.1007/s10546-006-9108-y>
- Xu, X., Yi, C., & Kutner, E. (2015). Stably stratified canopy flow in complex terrain. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(13), 7457–7470. <https://doi.org/10.5194/acp-15-7457-2015>
- Zeri, M., Sá, L. D. A., Manzi, A. O., Araújo, A. C., Aguiar, R. G., von Randow, C., Sampaio, G., Cardoso, F. L., & Nobre, C. A. (2014). Variability of Carbon and Water Fluxes Following Climate Extremes over a Tropical Forest in Southwestern Amazonia. *PLoS ONE*, 9(2), e88130. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088130>