

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

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

Una revisión narrativa de los principales resultados obtenidos en el estudio de las turbulencias nocturnas en y sobre la selva amazónica a través del sitio experimental del Observatorio Amazon Tall Tower

Recebido: 24/10/2021 | Revisado: 01/11/2021 | Aceito: 02/11/2021 | Publicado: 05/11/2021

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 entender e documentar quais são os principais resultados obtidos dos estudos de eventos turbulentos intermitentes de intensidade e periodicidade variáveis, que fornecem conexão episódica junto do dossel e a atmosfera e podem provocar procedimentos oscilatórios na camada limite noturna (CLN) feitos exclusivamente 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, 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. Todos os artigos foram revisados e destacados aqui de forma que os principais resultados fossem descritos, então a partir de 81 publicações no total desse banco de dados apenas 3 artigos são categorizados como estudos sobre eventos turbulentos intermitentes na CLN. Conclui-se que dentro do dossel, os fluxos de CO₂ e o calor latente são dependentes dos processos com longas escalas de tempo. Visto que essa troca de baixa frequência inclina a ser aumentada em condições muito estáveis, o fluxo escalar total dentro do dossel pode ser maior em noites muito estáveis do que em noites fracamente estáveis. Em noites muito estáveis, os fluxos turbulentos são efetivamente suprimidos a 80 m, apontando que a espessura da camada limite rasa pode encontrar-se nessas situações.

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

Abstract

This paper aims to understand and document the main results obtained from studies of intermittent turbulent events of variable intensity and periodicity, which provide episodic connection between the canopy and the atmosphere and can cause oscillatory procedures in the nocturnal boundary layer (CLN) performed exclusively on the Amazon Tall Tower Observatory (ATTO) experimental site 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, accessed on September 24, 2021, where this database has all peer-reviewed publications in journals made in the ATTO project between 2012 and 2021. All articles were reviewed and highlighted here so that the main results were described, then from 81 publications in this total. database only 3 articles are categorized as studies on turbulent events as intermittent in the CLN. It is concluded that inside the canopy, CO₂ fluxes and latent heat are dependent on processes with long time scales. Since this low frequency shift tends to be increased under very stable conditions, the total scalar flow within the canopy may be greater on very stable nights than on weakly stable nights. On very stable nights, turbulent fluxes are effectively suppressed at 80 m, pointing out that the thickness of the shallow boundary layer can be found in these situations.

Keywords: ATTO; Amazon rainforest; Night turbulence.

Resumen

Este artículo tiene como objetivo comprender y documentar los principales resultados obtenidos de estudios de eventos turbulentos intermitentes de intensidad y periodicidad variable, que proporcionan conexión episódica entre el dosel y la atmósfera y pueden provocar procedimientos oscilatorios en la capa límite nocturna (CLN) realizados exclusivamente en el Sitio experimental del Amazon Tall 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, accedida el 24 de septiembre de 2021, donde esta base de datos tiene todas las publicaciones revisadas por pares en revistas realizadas en el proyecto ATTO entre 2012 y 2021. Todos los artículos fueron revisados y resaltados aquí para que se describieron los principales resultados, luego de 81 publicaciones en este total. En la base de datos sólo 3 artículos están categorizados como estudios sobre eventos turbulentos intermitentes en el CLN. Se concluye que dentro del dosel, los flujos de CO₂ y el calor latente dependen de procesos con escalas de tiempo prolongadas. Dado que este cambio de baja frecuencia tiende a incrementarse en condiciones muy estables, el flujo escalar total dentro del dosel puede ser mayor en noches muy estables que en noches débilmente estables. En noches muy estables, los flujos turbulentos se suprimen eficazmente a 80 m, lo que indica que el espesor de la capa límite poco profunda se puede encontrar en estas situaciones.

Palabras clave: ATTO; Selva amazónica; Turbulencia nocturna.

1. Introdução

A estrutura de turbulência acima das copas florestais tem sido um importante assunto de pesquisa nas últimas décadas. Esse conhecimento é essencial para responder às questões científicas relevantes, como a quantificação da troca de escalares entre os ecossistemas florestais e a atmosfera. Na região amazônica, os estudos precursores neste campo foram realizados durante projetos como o Experimento de Camada Limite Atmosférica (Fan et al., 1990). Projetos subsequentes nesta região que mantiveram o foco neste assunto incluem o Estudo de Observação Climática da Amazônia Anglo-Brasileira (Krujic et al., 2000), o Estudo de Grande Escala Experimento da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (Miller et al., 2004). Uma das questões mais relevantes que esses projetos visavam responder é o papel da chuva na Amazônia como um sumidouro líquido ou uma fonte de CO₂ para a atmosfera (Oliveira et al., 2018). 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 (“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. 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 adicionais 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). 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.]).

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. 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, divergência vertical de radiação, intermitência global, interações atmosfera-superfície e ondas de gravidade.

O comportamento oscilatório na camada limite noturna é caracterizado por breves episódios de turbulência com períodos intermediários de flutuações relativamente fracas ou incomensuravelmente pequenas. 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. 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).

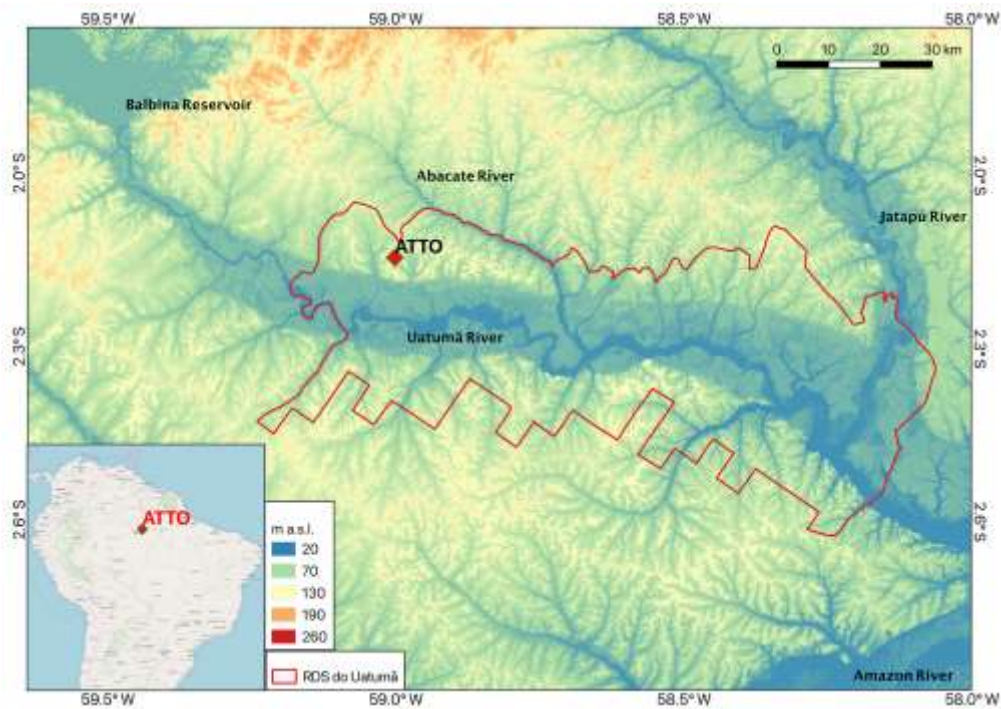
Então, de acordo com Andreae et al (2015), uma compreensão adequada dos perfis e fluxos verticais noturnos de escalares acima de qualquer dossel da floresta depende, portanto, da explicação dos controles atmosféricos na turbulência intermitente no nível do dossel. Na Floresta Amazônica, essa necessidade 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. 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. 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.

Este presente artigo tem o objetivo de entender e documentar quais são os principais resultados obtidos dos estudos de 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, a metodologia de pesquisa é qualitativa e o método empregado foi o estudo de caso, baseado na literatura de Pereira et al. (2018), e Ludke & Andre (1986).

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.



Fonte: Botía et al., (2020).

Na Figura 1, 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.

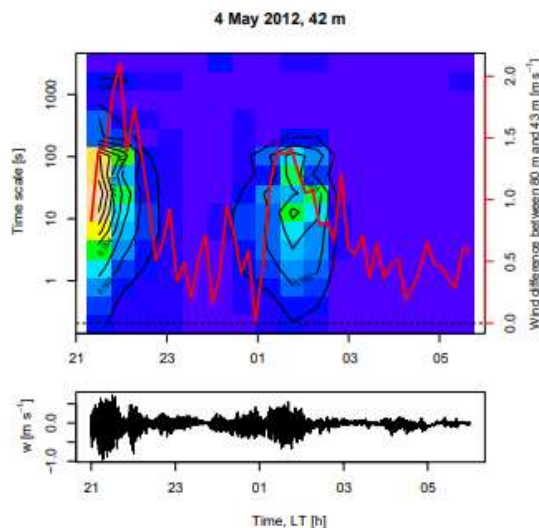
Uma pesquisa bibliográfica foi realizada no banco de dados do projeto ATTO, acessado em 24 de setembro de 2021, onde esse banco de dados tem todas as publicações revisadas por pares em periódicos feitas no projeto ATTO entre 2012 a 2021 (Department Biogeochemical Processes | ATTO / Publications, [s.d.]) através de uma revisão narrativa de literatura dos principais artigos publicados durante o período de 2012 até 2021, a metodologia de pesquisa é qualitativa e o método empregado foi o estudo de caso, baseado na literatura de Pereira et al. (2018) e Ludke & Andre (1986). Todos os artigos foram completamente revisados e destacados aqui de forma que seja uma revisão narrativa, 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. A partir disso, foi feita uma síntese dos principais resultados obtidos nos artigos de Andreae et al. (2015), Oliveira et al. (2018) e Botía et al. (2020).

3. Resultados e Discussão

De acordo com os resultados de Andreae et al. (2015), evidências da ATTO indicam que é possível associar os eventos intermitentes no nível do dossel com o cisalhamento médio do vento acima do dossel. Na Figura 2, é evidente que os dois eventos intensos aos 42 m, por volta das 21h30 e 02h00 Hora Local, são desencadeados por episódios de cisalhamento do vento intenso entre 42 e 80 m. Em condições onde o campo de vento de 80 m é dominado por processos “submeso”, como nos exemplos das Figuras 2 e 3, é essa porção do fluxo que determina a ocorrência de episódios de cisalhamento intenso. Submeso é uma classificação de padrões não turbulentos que foram recentemente classificados. O fluxo submeso tem baixa intensidade, com grande variabilidade temporal aparentemente imprevisível. Geralmente está presente na camada limite atmosférica, tornando-se dominante em condições em que as escalas turbulentas são muito reduzidas, como na camada limite noturna desacoplada. Além

disso, fica claro a partir desses exemplos que os padrões de fluxo em níveis tão altos quanto 80m exercem controles importantes sobre a troca de escalares no nível do dossel.

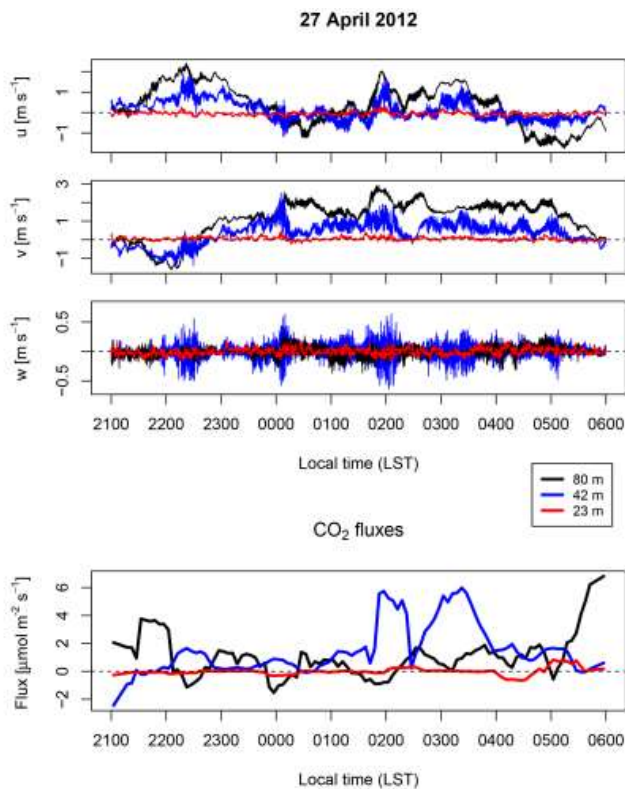
Figura 2 - O painel superior é a multirresolução de velocidade vertical de 42 m espectros para a noite de 4 de maio de 2012 (cores e contornos).
2012 (cores e contornos).



Fonte: Andreae et al., (2015).

Na Figura 2, significa a diferença de vento entre os níveis de 80 e 42 m (linha vermelha, escala no lado direito). O painel inferior é a evolução temporal da velocidade vertical ao nível de 42 m para a mesma noite.

Figura 3 - Nos painéis superiores é a evolução temporal dos três componentes do vento.

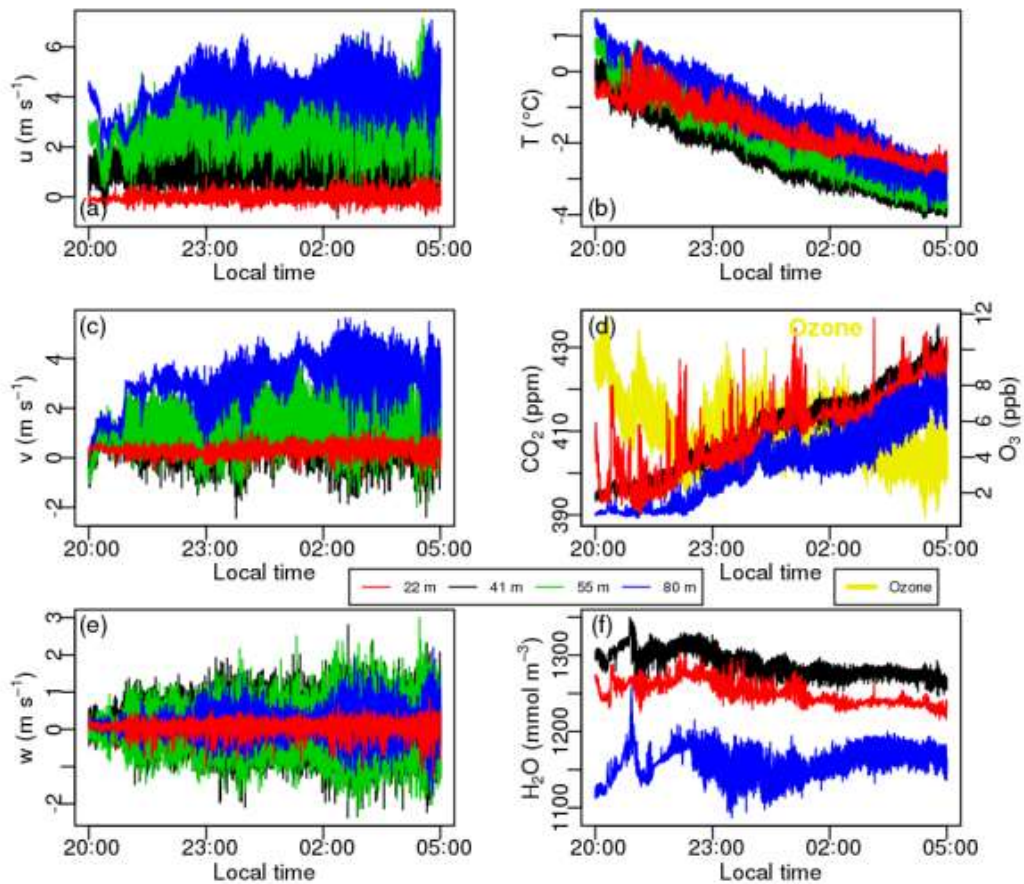


Fonte: Andreae et al., (2015).

Na Figura 3, os painéis superiores são a evolução temporal dos três componentes do vento para a noite de 27 de abril de 2012 em cada um dos níveis das observações ATTO. O painel inferior mostra os fluxos correspondentes de covariância parasita de CO₂.

Para os resultados de Oliveira et al. (2018), o fluxo noturno no local é caracterizado pela superposição de flutuações turbulentas e não turbulentas. Em uma noite totalmente turbulenta, como 15 de novembro de 2015 (Figura 4), há uma direção clara do vento dominante em todos os níveis. Neste caso, é muito raro que os componentes do vento horizontal mudem de sinal acima do dossel. Em contraste, durante a noite intermitente de 14 de novembro de 2015 (Figura 5), não há direção do vento dominante em qualquer nível acima do dossel, já que ambos os componentes horizontais mudam de sinal muitas vezes ao longo da noite. As flutuações de baixa frequência se sobrepõem às flutuações turbulentas, fazendo com que a direção média do vento mude de quadrante com frequência durante a noite. Tais flutuações foram recentemente atribuídas ao submeso, enquanto os fenômenos semelhantes da comunidade de dispersão de poluentes são frequentemente chamados de meandros. A diferença mais relevante entre as duas noites diz respeito à magnitude da mistura turbulenta (Tabela 1). Todas as estatísticas de turbulência relevantes são significativamente maiores em 15 de novembro do que em 14 de novembro. A diferença relativa das estatísticas de turbulência entre as noites aumenta continuamente na vertical. Por exemplo, energia cinética turbulenta (TKE) em 41m é 3,4 vezes maior na noite turbulenta do que no caso intermitente, enquanto em 80m o TKE é 8,2 vezes maior na noite turbulenta.

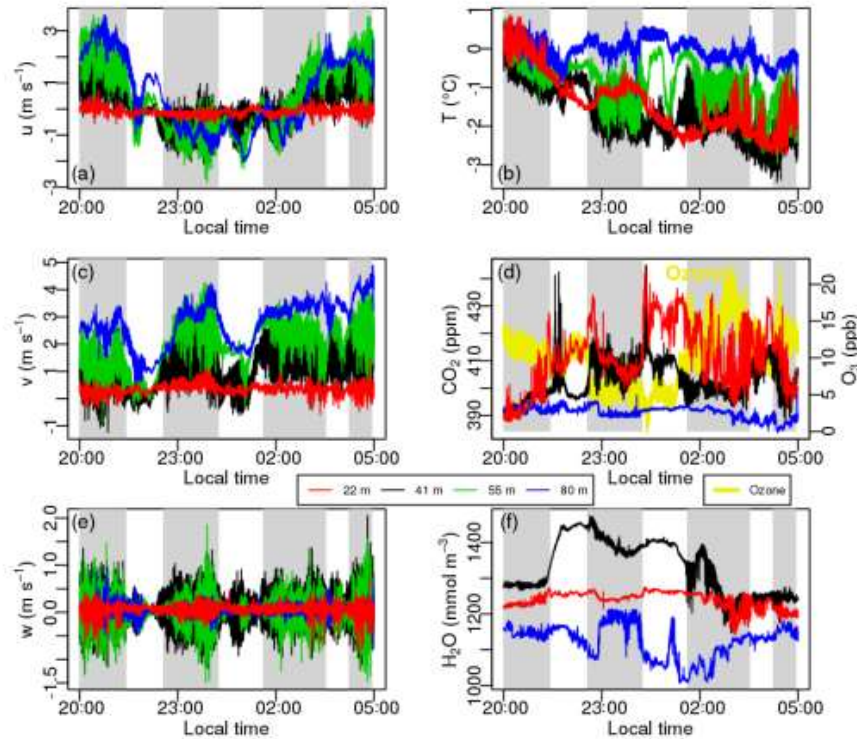
Figura 4 - Séries temporais de componentes do vento horizontal.



Fonte: Oliveira et al., (2018).

Na Figura 4 o (a e c) é vertical (e) é a perturbação da temperatura a partir do valor LT 20:00 a 41 m (b) é de concentrações de CO₂ e O₃ (d) é vapor d'água e (f) é para a noite turbulenta.

Figura 5 - Igual à Figura 4, mas para a noite intermitente.



Fonte: Oliveira et al., (2018).

Na Figura 5 as áreas sombreadas indicam explosões de turbulência intermitentes.

Tabela 1 - Estatísticas de turbulência de cinco minutos em média para cada noite analisada.

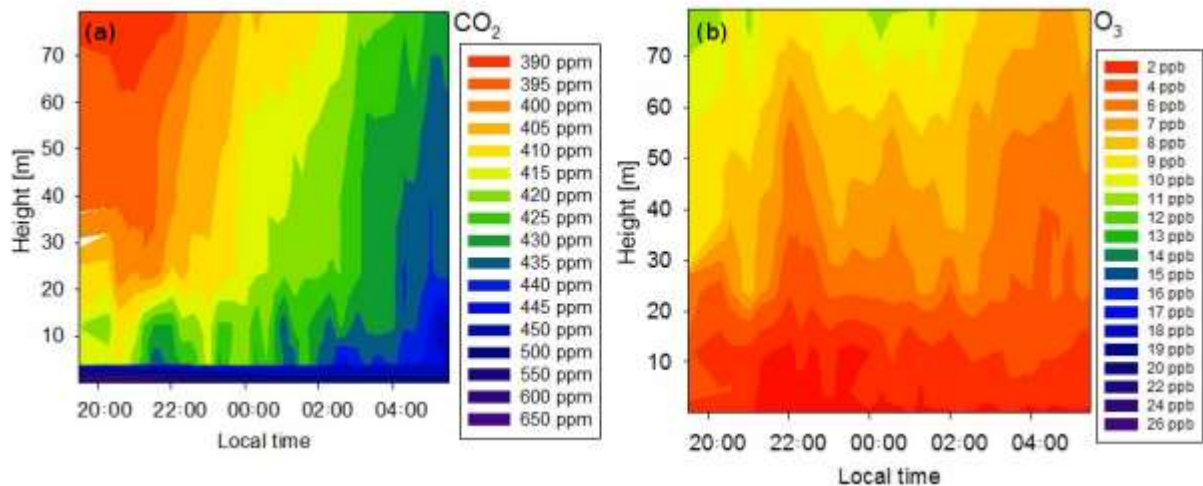
level (m)	14 November 2015 intermittent night			15 November 2015 turbulent night		
	σ_w (m s^{-1})	$(\overline{u'w'^2} + \overline{v'w'^2})^{1/4}$ (m s^{-1})	TKE ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$)	σ_w (m s^{-1})	$(\overline{u'w'^2} + \overline{v'w'^2})^{1/4}$ (m s^{-1})	TKE ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$)
22	0.07	0.04	0.01	0.11	0.07	0.03
41	0.19	0.14	0.13	0.39	0.30	0.44
55	0.15	0.10	0.10	0.37	0.27	0.41
80	0.06	0.04	0.02	0.18	0.13	0.16

Fonte: Oliveira et al., (2018).

Outra característica interessante que indica um contraste entre as duas noites mostradas na Figura 4 e 5 diz respeito ao grau de acoplamento vertical entre os níveis, fenômeno que foi observado por Jocher et al. (2017). Na noite turbulenta, as temperaturas eram sempre semelhantes entre os níveis de 41 e 55 m, enquanto que aos 80m era um pouco mais quente mas com a mesma tendência de resfriamento ao longo do período. CO₂ foi correspondentemente semelhante entre 22 e 41 m, com as mesmas tendências e valores ligeiramente inferiores a 80 m. Embora a tendência média seja semelhante em 22 e 41 m, desvios substanciais de curto tempo em direção a CO₂ mais alto dos valores foram observados a 22 m (Figura 4). Isso está de acordo com a maior variabilidade em valores de CO₂ no dossel inferior, conforme podem ser vistos nos perfis (Figura 6). Esta maior variabilidade e gradiente mais forte (em ambos CO₂ e O₃) no dossel inferior apontam para um desacoplamento do sub-dossel, mesmo numa noite turbulenta. Como o nível de 22 m está dentro do máximo do índice de área foliar (~ 24 m), que separa o

dossel superior do inferior, será influenciado por ambos os regimes. Os gradientes entre 24 e 38 m são sempre positivos para O₃ e negativo para CO₂. Isso pode estar relacionado à reatividade de O₃ uma vez que reage com compostos emitidos do solo e plantas não é apenas absorvido pelos estômatos, mas também é depositado nas superfícies das folhas em quantidades consideráveis, especialmente em condições úmidas (Fuentes e Gillespie, 1992; Rummel et al., 2007). À noite, CO₂ é emitido pelos solos e plantas devido à respiração, causando um gradiente negativo.

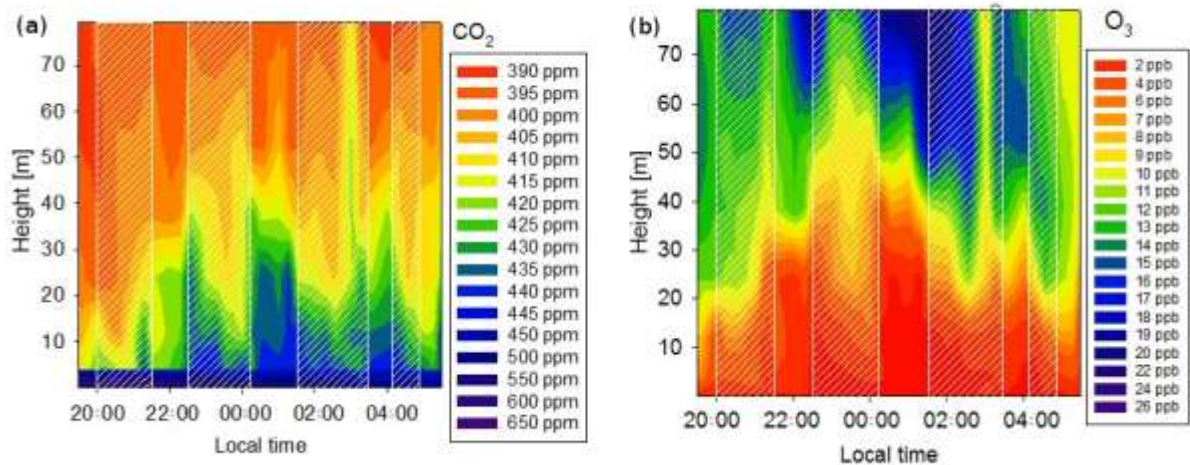
Figura 6 - Concentrações de (a) CO₂ e (b) O₃ em função do tempo e da altura para a noite turbulenta.



Fonte: Oliveira et al., (2018).

Todas as quantidades mostraram uma variação muito maior entre os níveis na noite intermitente (Figura 5). Além disso, esporádicos eventos de acoplamento ocorreram durante rajadas de turbulência intermitente (Figura 5, áreas sombreadas). Durante esses eventos de acoplamento, os gradientes de temperatura e CO₂ a concentração tornou-se esporadicamente menor na vertical, exceto para o nível de 80 m, indicando que o acoplamento induzido pelos eventos se estendeu sobre uma camada mais rasa que 80 m. Em geral, a evolução temporal de todos os escalares mostra um aumento monotônico (em CO₂) ou diminuição (na temperatura e O₃) ao longo da noite turbulenta em todos os níveis (Figura 4). Na noite intermitente, por outro lado, grandes aumentos e diminuições em todos os escalares ocorrem em pequenos períodos de tempo em todos os níveis, exceto a 80 m. Como CO₂ tem uma fonte clara no solo e O₃ possui uma pia desobstruída no solo, pode-se identificar pelos perfis se o ar está vindo de cima ou de baixo (Figura 7). O ar de cima é rico em O₃ e menor em CO₂, enquanto o ar de baixo é rico em CO₂ mas esgotado em O₃. Dessa perspectiva, no primeiro evento o ar é misturado para baixo do alto, enquanto no segundo evento o ar é misturado para cima e para baixo a partir do topo do velame. No terceiro evento, o ar é primeiro misturado para baixo e, finalmente, há uma rajada de ar subindo do dossel. A 80 m, temperatura (Figura 5b) e CO₂ (Figura 5d) mostram flutuações muito menores do que nos outros níveis. Esta é mais uma evidência de que a espessura da camada limite estável é mais rasa durante a noite intermitente, de modo que os fluxos de troca do dossel não afetam o estado da atmosfera a 80 m. Este fato contrasta fortemente com as tendências constantes em ambos os escalares a 80 m durante a noite turbulenta (Figura 4b e Figura 4d), o que indica que, neste caso, este nível está totalmente acoplado por turbulência ao topo do dossel. Enquanto na noite turbulenta, os fluxos escalares não variaram substancialmente ao longo do período, os fluxos turbulentos mais intensos de calor sensível, CO₂, O₃ e o calor latente durante a noite intermitente ocorreram durante esses períodos de acoplamento.

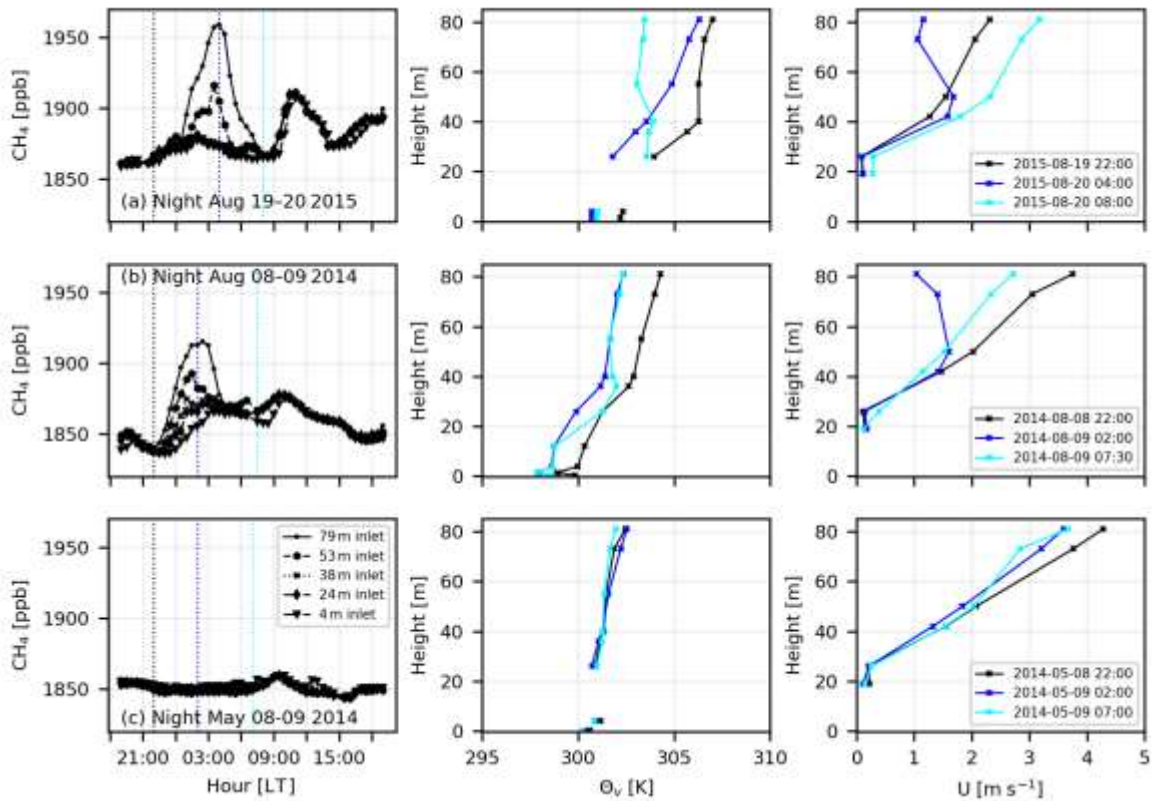
Figura 7 - Igual à Figura 6, mas para a noite intermitente.



Fonte: Oliveira et al., (2018).

Para os resultados de Botfá et al. (2020), observamos na Figura 8a uma noite em que ocorreu um gradiente positivo muito ocorreu depois das 00:00 hora local e antes das 01:00 hora local, há uma divergência repentina e abrupta das proporções de mistura de CH₄ a 79m. Este aumento no CH₄ não é visto nos primeiros três níveis de medição, enquanto a 53 m é observado com algum atraso e com menos intensidade. A divergência em 79 m atinge um pico de CH₄ de 1960 ppb por volta das 04:00 LT, no qual aponta as três entradas mais baixas mostram razões de mistura de CH₄ mais baixas do que 1880 ppb. Neste momento, há uma forte inversão térmica vista para o ar acima do dossel e a velocidade do vento a 81 m diminui para quase 1 ms⁻¹. A duração deste gradiente positivo, considerando o tempo em que a entrada de 79 m teve relações de mistura de medição superiores a 1880 ppb, foi de cerca de 5 h. Estes eventos positivos de gradiente são muito comuns em nossa série temporal e eles variam principalmente em duração e magnitude. Para o caso mostrado em Figura 8a, podemos ver que o desacoplamento entre o ar acima e dentro do dossel era muito forte até 53 m. Ao nível de 53m, o sinal, medido pela primeira vez a 79m, chegou a cerca de 30 minutos depois, quando a proporção de mistura de CH₄ começou a aumentar, mas nos níveis mais baixos, o comportamento é completamente independente. As condições dissociadas podem ser explicadas por uma forte inversão térmica que obstrui a mistura vertical, o que poderia ser desencadeada por cisalhamento de vento em condições estáveis.

Figura 8 - Série temporal de CH₄ para três noites selecionadas.

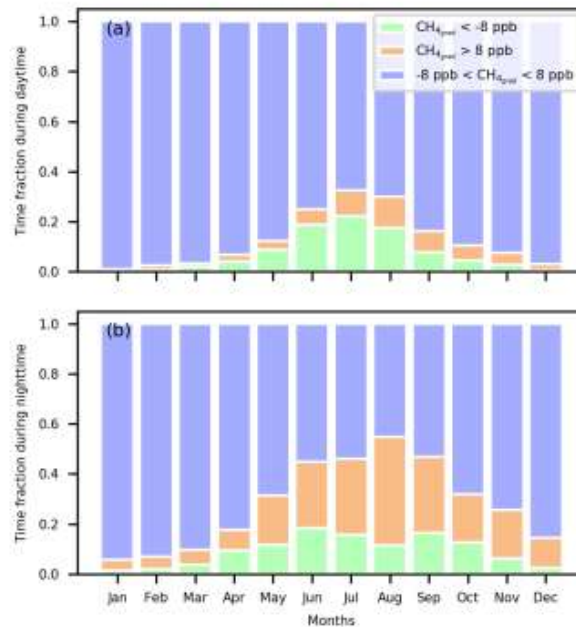


Fonte: Botía et al., (2020).

Na Figura 8, (a – c) mostram um intervalo de 24 h, temperatura potencial virtual e perfis médios de vento para três períodos selecionados da série temporal do CH₄. Os tempos em que os perfis são plotados são destacados na série temporal CH₄ com as mesmas cores. A altura do dossel é de aproximadamente 35 m. Observe que, devido ao mau funcionamento do instrumento, os perfis 2v estão sem dados em 12 m. Os perfis de velocidade do vento cobrem de 19 a 81 m.

Ainda sobre Botía et al. (2020), as medições noturnas, em geral, mostram uma maior contribuição de gradientes positivos ao tempo total (Figura 9b). Gradientes positivos noturnos ocorrem em todos os meses do ano, a partir de 4,1% do tempo em janeiro para 43,3% do tempo em agosto. Os maiores percentuais são registrados durante a estação seca nos meses de julho (30,2%), agosto (43,3%) e setembro (30,2%). Não é novidade que esses meses também têm os maiores gradientes noturnos médios, com $2,6 \pm 23$, $9,7 \pm 21$ e $6,2 \pm 23$ ppb para julho, agosto e setembro, respectivamente. Os gradientes positivos noturnos máximos foram observados entre 03:00 e 06:00 (hora local, não mostrada), com valores maiores que 130 ppb. Durante o dia, os gradientes positivos máximos ocorreram entre 07:00 e 08:00 hora local, com valores acima de 150 ppb. Observe que esses gradientes são gerados durante a noite e pode persistir por algumas horas até a erosão da camada limite noturna e crescimento frequente da camada limite convectiva, que ocorre entre 08:00 e 09:00 hora local. (Fisch et al., 2004; Carneiro, 2018).

Figura 9 - Frações de tempo para (a) medições diurnas e (b) noturnas de CH₄.



Fonte: Botía et al., (2020).

Na Figura 9, a noite é definida como entre 20:00 e 06:00 hora local e horário diurno entre 07:00 e 18:00 hora local.

A troca vertical noturna pode ser conduzida por turbulência, ondas gravitacionais, fluxos catabáticos ou drenagem, e brisas noturnas terrestres-fluviais. Inter-turbulência mitigante ocorre principalmente como rajadas de cima para baixo que pode conectar as camadas superiores da camada limite noturna com o dossel e até mesmo penetrar na parte superior dele, como mostrou ser importante para os fluxos de ozônio e CO₂ no Site ATTO de Oliveira et al. (2018). No entanto, como a intermitente turbulência é observada principalmente como intrusões de cima para baixo, foi descartado como um mecanismo de transporte vertical nos locais de origem fornecidos que a fonte de CH₄ tem que estar na superfície. Ondas gravitacionais mostraram ser responsáveis pelo transporte de massa para fora do camada do subcanopy durante condições de estabilidade fortes e límpidas noites, mas sugere-se que os movimentos das ondas não desempenham um papel importante no transporte escalar sobre uma floresta de pinheiros, com base no fato de que um período de onda teve fluxo médio zero (Botía et al., 2020).

Tendo descartado esses mecanismos, em Botía et al. (2020) que as brisas terrestres e fluxos de drenagem são as causas mais prováveis que induzem o transporte vertical no rio Uatumã e nos vales perto de ATTO. Durante a noite, devido ao resfriamento por radiação diferencial sobre a terra e a água, o rio é mais quente do que a floresta, levando a um ar ligeiramente mais quente sobre a água. Isso leva a uma brisa da terra para a água que pode transportar gases residuais da floresta ao rio. Considerando que rios de água negra, como o rio Uatumã, são mais quentes do que rios de água branca, como o rio Amazonas, é muito provável que o rio Uatumã seja mais quente que a floresta circundante. A diferença de temperatura produz um gradiente de pressão à medida que o ar quente e menos denso se move verticalmente acima do rio. Esses pacotes aéreos podem transportar CH₄ verticalmente para as partes superiores da camada limite noturna. Acredita-se que correntes ascendentes impulsionadas pela convergência do ar forçada por fluxos de drenagem podem levar ao transporte vertical. Posteriormente, Araújo et al. (2008) mostrou que o fluxo catabático noturno do planalto para o vale não afeta apenas a distribuição horizontal das taxas de mistura de CO₂ ao longo de um gradiente topográfico, mas também o perfil vertical de Taxas de mistura de CO₂ sobre o vale.

4. Conclusão

Conclui-se que dentro do dossel, fluxos de CO₂ e o calor latente são dominados por processos com longas escalas de tempo. Dado que essa troca de baixa frequência tende a ser aumentada em condições muito estáveis, o fluxo escalar total dentro do dossel pode ser maior em noites muito estáveis do que em noites fracamente estáveis. Em noites muito estáveis, os fluxos turbulentos são efetivamente suprimidos a 80 m, indicando que a espessura da camada limite rasa pode existir nessas situações. A turbulência intermitente pode produzir fluxos muito grandes e afetam as concentrações de CO₂ e O₃ de perto do topo da camada limite até o meio do dossel. Embora as concentrações de baixa frequência para os fluxos sejam aumentadas durante noites muito estáveis, sua inclusão nos orçamentos escalares não é suficiente para trazer os fluxos noturnos nas noites muito estáveis perto daqueles observados durante condições totalmente turbulentas. Processos como fluxos de drenagem ou armazenamento local podem ser responsáveis pelas diferenças. A troca turbulenta é sempre importante logo acima do dossel (nível de 41 m neste caso), mas em noites muito estáveis a contribuição não turbulenta também deve ser considerada.

Os mecanismos de transporte atmosférico foram divididos naqueles responsáveis pela advecção horizontal de CH₄ dos locais de origem para o site ATTO e aqueles que transportam ar verticalmente a partir do local da fonte para as camadas superiores da camada limite noturna. Sugere-se que o transporte vertical sobre o rio Uatumã resulta do diferencial de resfriamento radiativo diferencial da floresta e da água, produzindo uma diferença de pressão horizontal que causa um deslocamento para cima de parcelas aéreas sobre o rio e transporte de CH₄ em altitude. Essas parcelas aéreas são, então, advectadas pelo horizonte predominante de vento em direção ao local ATTO e, subsequentemente, medido no nível de 79 m.

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

- 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>
- Araújo, A. C. de, Kruijt, B., Nobre, A. D., Dolman, A. J., Waterloo, M. J., Moors, E. J., & Souza, J. S. de. (2008). nocturnal accumulation of co₂ underneath a tropical forest canopy along a topographical gradient. *Ecological Applications*, 18(6), 1406–1419. <https://doi.org/10.1890/06-0982.1>
- 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>
- Carneiro, R. G. (2018). *Erosão da camada limite noturna e suas implicações no crescimento da camada limite convectiva na região central da Amazônia (experimento GOAMAZON 2014/15) (Doctoral dissertation, Doctoral thesis, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brazil. 152p.(http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m21b/2018/01.18.01.59))*.
- Department Biogeochemical Processes | ATTO / Publications. ([s.d.]). Recuperado 24 de setembro de 2021, de <https://www.bgc-jena.mpg.de/bgp/index.php/ATTO/Publications>
- Fan, S.-M., Wofsy, S. C., Bakwin, P. S., Jacob, D. J., & Fitzjarrald, D. R. (1990). Atmosphere-biosphere exchange of CO₂ and O₃ in the central Amazon Forest. *Journal of Geophysical Research*, 95(D10), 16851. <https://doi.org/10.1029/JD095iD10p16851>
- Fisch, G., Tota, J., Machado, L. A. T., Silva Dias, M. A. F., da F. Lyra, R. F., Nobre, C. A., Dolman, A. J., & Gash, J. H. C. (2004). The convective boundary layer over pasture and forest in Amazonia. *Theoretical and Applied Climatology*, 78(1–3). <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0043-x>
- Fuentes, J. D., & Gillespie, T. J. (1992). A gas exchange system to study the effects of leaf surface wetness on the deposition of ozone. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 26(6), 1165–1173. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(92\)90048-P](https://doi.org/10.1016/0960-1686(92)90048-P)
- Jocher, G., Ottosson Löfvenius, M., De Simon, G., Hörnlund, T., Linder, S., Lundmark, T., Marshall, J., Nilsson, M. B., Näsholm, T., Tarvainen, L., Öquist, M., & Peichl, M. (2017). Apparent winter CO₂ uptake by a boreal forest due to decoupling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.002>

Kruijt, B., Malhi, Y., Lloyd, J., Norbre, A. D., Miranda, A. C., Pereira, M. G. P., Culf, A., & Grace, J. (2000). Turbulence Statistics Above And Within Two Amazon Rain Forest Canopies. *Boundary-Layer Meteorology*, 94(2), 297–331. <https://doi.org/10.1023/A:1002401829007>

Ludke, M., & André, M. (1986). Pesquisa em educação: abordagens qualitativas. *Em Aberto*, 5(31).

Miller, S. D., Goulden, M. L., Menton, M. C., da Rocha, H. R., de Freitas, H. C., Figueira, A. M. e S., & Dias de Sousa, C. A. (2004). biometric and micrometeorological measurements of tropical forest carbon balance. *Ecological Applications*, 14(sp4), 114–126. <https://doi.org/10.1890/02-6005>

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., 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.

Rummel, U., Ammann, C., Kirkman, G. A., Moura, M. A. L., Foken, T., Andreae, M. O., & Meixner, F. X. (2007). Seasonal variation of ozone deposition to a tropical rain forest in southwest Amazonia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(20), 5415–5435. <https://doi.org/10.5194/acp-7-5415-2007>