

EFEITOS DA QUEIMA DE BIOMASSA NAS TAXAS DE EMISSÃO DE ISOPRENO



<https://doi.org/10.56238/arev7n1-025>

Data de submissão: 02/12/2024

Data de publicação: 02/01/2025

Anahi Chimini Sobral

Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
E-mail: anahicsobral@gmail.com

Willian José Ferreira

Doutoramento em Geofísica Espacial
Universidade da República do México (UNITAU)
E-mail: willian.jferreira@unitau.br

Plínio Carlos Alvalá

Doutoramento em Geofísica Espacial
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
E-mail: plinio.alvala@inpe.br

Kelly Ribeiro

Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
E-mail: kelly.ribeiro@inpe.br

Widinei Alves Fernandes

Doutoramento em Geofísica Espacial
Federal University of Mato Grosso do Sul (UFMS)
E-mail: widinei.fernandes@ufms.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9481-3413>

Celso von Randow

Doutoramento em Ciências do Ambiente
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
E-mail: celso.vonrandow@inpe.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1045-4316>

RESUMO

Os compostos orgânicos voláteis biogênicos desempenham um papel fundamental nas funções ecológicas e influenciam a química atmosférica e o clima regional. Este estudo investigou como as condições ambientais específicas no Pantanal, como padrões hidrológicos sazonais e queimadas, influenciam as emissões de isopreno em comparação com a Amazônia. Campanhas realizadas em 2016 e 2017 durante a estação seca correlacionaram as emissões de isopreno com fatores meteorológicos, como temperatura e radiação solar, e avaliaram o impacto dos incêndios. Observou-se que em 2017, as emissões de isopreno no Pantanal foram menores do que em 2016, devido às temperaturas mais baixas, menor radiação solar e maior capacidade oxidativa da atmosfera causada pelas queimadas. Em contraste, na Amazônia, as emissões foram consistentemente maiores em 2016, refletindo condições

ambientais favoráveis e maior densidade e diversidade de vegetação no bioma. Esses resultados confirmam que as emissões de isopreno no Pantanal são fortemente moduladas por suas condições ambientais específicas, destacando a influência dos incêndios na química atmosférica do isopreno. As conclusões destacam a necessidade de políticas que enfrentem a degradação ambiental e promovam a conservação dos ecossistemas do Pantanal, garantindo sua resiliência e a continuidade dos serviços ecossistêmicos essenciais, tanto para as comunidades locais quanto para a mitigação das mudanças climáticas globais.

Palavras-chave: Química Atmosférica. Fogo. Emissões Biogênicas. Pantanal.

1 INTRODUÇÃO

Compostos orgânicos voláteis biogênicos (BVOCs) são produtos químicos que influenciam a química atmosférica e as interações ecológicas, desempenhando um papel central na dinâmica atmosfera-ecossistema (Šimpraga *et al.*, 2019). Nos ecossistemas florestais, especialmente naqueles com elevada biodiversidade, as emissões de BVOCs, como o isopreno (C₅H₈), têm um impacto significativo na formação de aerossóis e na regulação da química atmosférica, afetando a formação de nuvens e a dispersão da radiação solar (Guenther *et al.*, 2012). De acordo com Arneth *et al.* (2010), esses processos podem alterar o equilíbrio radiativo da Terra, com efeitos potenciais no clima global.

Os BVOCs são emitidos por vegetação, bactérias, algas, fungos e animais, com suas taxas de emissão influenciadas por fatores bióticos e abióticos (Laothawornkitkul *et al.*, 2009). A vegetação, especialmente as árvores tropicais, é a principal fonte desses compostos, respondendo por cerca de 80% das emissões globais de terpenóides e 50% de outros BVOCs (Harley *et al.*, 2004; Guenther *et al.*, 2012). Entre eles, o isopreno se destaca por seu impacto na capacidade oxidativa da atmosfera e por ser um precursor do ozônio troposférico (Karl *et al.*, 2010; Bela *et al.*, 2015). O isopreno também contribui para a formação de aerossóis orgânicos secundários (SOA) via foto-oxidação, afetando a saúde humana (Wells *et al.*, 2020), e devido à sua relevância na biosfera, as emissões de isopreno e seus processos oxidativos têm sido amplamente estudados em todo o mundo (Langford *et al.*, 2022).

Devido ao seu impacto significativo na qualidade do ar e no clima, as emissões biogênicas de isopreno agora são comumente integradas em modelos climáticos e químicos acoplados, incluindo modelos regionais e globais de qualidade do ar e do sistema terrestre (Jiang *et al.*, 2018). Apesar dos avanços na estimativa das emissões biogênicas de isopreno por meio de modelagem numérica, persistem incertezas substanciais em relação à magnitude e variabilidade dessas emissões, tanto em medições de campo quanto em estimativas de modelos (Arneth *et al.*, 2010; Guenther *et al.*, 2012; Wells *et al.*, 2020).

No Brasil, a Amazônia, que abriga metade das florestas tropicais do mundo, desempenha um papel vital nos ciclos de energia, água e carbono, armazenando 50% do carbono das florestas tropicais e abrigando a maior biodiversidade do planeta (Ter Steege *et al.*, 2013; Andreae *et al.*, 2015; Yáñez-Serrano *et al.*, 2020). Este ecossistema emite quantidades significativas de isopreno, com efeitos que se estendem dentro e acima do dossel da floresta amazônica. Estima-se que a vegetação amazônica possa emitir cerca de 150 mg m⁻² dia⁻¹ de isopreno (Guenther *et al.*, 2012). Além disso, devido à sua sensibilidade às mudanças climáticas e ao uso da terra, as atividades humanas recentes estão alterando as condições na Amazônia, tornando mais complexa a compreensão do isopreno na região (Shrivastava *et al.*, 2019). No entanto, é importante ressaltar que a estimativa das emissões globais anuais de

isopreno ainda apresenta incertezas, e sua dinâmica em outros biomas brasileiros permanece pouco estudada.

O Pantanal, o menor bioma do Brasil, abrange aproximadamente 150.355 km², representando cerca de 1,7% da área total do país (Correa *et al.* 2022). Ao contrário da Amazônia, o Pantanal é caracterizado por sua vegetação e clima únicos, sendo uma vasta área úmida com dinâmica hidrológica complexa, marcada por precipitação sazonal, pulsos de cheia anuais e vegetação caducifólia durante a estação seca. Ao longo das décadas, o ambiente natural desse bioma passou por transformações significativas devido ao desmatamento, queimadas e expansão da pecuária extensiva, o que levou à conversão de áreas naturais em pastagens e terras agrícolas (Wantzen *et al.*, 2024).

Atualmente, há escassez de pesquisas sobre emissões de isopreno no Pantanal, um bioma de grande importância para a biodiversidade, com ecossistemas únicos e vulneráveis às mudanças climáticas e às atividades humanas (Silva *et al.*, 2024). As medições de isopreno podem revelar como o Pantanal está respondendo a essas mudanças e como essas emissões influenciam a química atmosférica e a dinâmica climática local e regional. Esta investigação é particularmente relevante no contexto da Agenda 2030 da ONU, especialmente dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 13 e 15, que enfatizam a proteção de ecossistemas vulneráveis e a mitigação dos impactos climáticos. Como um bioma sensível a essas mudanças, o Pantanal desempenha um papel essencial na regulação do clima e na manutenção dos serviços ecossistêmicos, e a análise dessas emissões pode contribuir significativamente para as metas globais de conservação e ação climática (ONU, 2024).

Nesse contexto, surge o questionamento: "Como as condições ambientais específicas no Pantanal, como padrões hidrológicos sazonais e ocorrência de incêndios, influenciam as emissões de isopreno em comparação com a Amazônia?" A investigação desta questão permitirá uma compreensão da dinâmica química e ecológica do Pantanal relacionada aos BVOCs e fornecerá dados comparativos essenciais para a formulação de estratégias de conservação e mitigação em ambos os ecossistemas. Nesse contexto, investigar como as condições ambientais específicas do Pantanal, como padrões hidrológicos sazonais e ocorrência de incêndios, influenciam as emissões de isopreno em comparação com a Amazônia permitirá uma melhor compreensão da dinâmica química e ecológica do Pantanal e fornecerá dados comparativos essenciais para a formulação de estratégias de conservação e mitigação em ambos os ecossistemas.

Com o objetivo de quantificar as emissões de isopreno e avaliar suas correlações com fatores ambientais, este estudo apresenta as primeiras medidas de proporções de mistura de isopreno no bioma Pantanal. Por meio da avaliação do ciclo diurno das emissões na Base de Estudos do Pantanal, em Miranda, Mato Grosso do Sul, e na Reserva Biológica de Cuieiras, na Amazônia Central, foi realizada

uma análise comparativa para determinar a magnitude e as diferenças nas razões de mistura de isopreno entre essas regiões. A análise dessas correlações contribuirá para uma melhor compreensão da química do isopreno na região, com implicações para o aprimoramento dos modelos climáticos e para o apoio a estratégias de conservação e mitigação dos impactos das mudanças climáticas.

2 MATERIAL E MÉTODO

2.1 DESCRIÇÃO DO SITE

2.1.1 Pantanal

As medições foram realizadas na torre de fluxo PTN, localizada na Base de Pesquisas do Pantanal da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (BEP-UFMS) (19° 34' S, 57° 01' W, 90 m), próximo ao rio Miranda na bacia hidrográfica do Paraguai, que representa uma paisagem típica do Pantanal (Oliveira *et al.*, 2006). O relevo nessa área é composto por planícies de inundação com superfícies horizontais e declividade variando de 0 a 3% (Theodorovisck, 2010), o que favorece a prevalência de solos hidromórficos (Fernandes *et al.*, 2007). A vegetação é constituída por matas ciliares e uma camada de arbustos herbáceos, com árvores que atingem uma altura de até 10 metros, com predominância de *Tabebuia aurea*, (De Paula *et al.*, 1995; Mota *et al.*, 2011). O clima é tropical úmido, caracterizado por estações chuvosas e secas distintas, com precipitação média mensal variando entre 1.000 mm durante a estação chuvosa (outubro a março) e menos de 100 mm durante a estação seca (abril a setembro) (De Paula *et al.*, 1995). A temperatura média no verão é de 25°C e no inverno chega a 10°C. Apenas duas campanhas foram realizadas devido a dificuldades de acesso à região do Pantanal, restrições logísticas e necessidade de extenso trabalho de campo.

2.1.2 Amazona

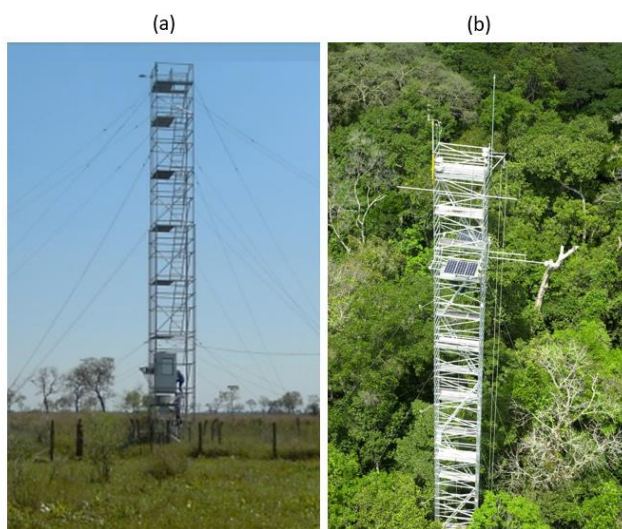
As medições foram realizadas na torre de fluxo K34, localizada na Reserva Biológica de Cuieiras (2° 36' S, 60° 12' W, 130 m), gerenciada pelo Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). Esta reserva representa uma área de planalto caracterizada por solos predominantemente argilosos e altamente porosos (Zanchi *et al.*, 2012). A vegetação é constituída por um denso mosaico de floresta tropical de terra firme, com alturas de copa variando de 35 a 45 metros, e florestas de várzea caracterizadas por campinarana e matas ciliares, cuja presença é influenciada por fatores como declividade, tipo de solo, teor de nutrientes e condições de drenagem (Luizão *et al.*, 2007). A área experimenta um clima tropical úmido (Silva *et al.*, 2009), com precipitação pluviométrica média anual de 2.286 mm. A estação chuvosa se estende de outubro a junho, com precipitação mensal ocasionalmente superior a 300 mm, enquanto a estação seca ocorre entre julho e setembro, com

precipitação mensal abaixo de 100 mm. A temperatura média anual é de 26,7°C (Da Rocha *et al.*, 2009).

2.3 DESCRIÇÃO DA AMOSTRAGEM E ANÁLISE DOS DADOS

As amostragens foram realizadas durante a estação seca tanto no Pantanal quanto na Amazônia. A primeira campanha no Pantanal ocorreu de 30 de agosto a 2 de setembro de 2016, seguida por uma segunda campanha de 13 a 15 de setembro de 2017. Na Amazônia, as amostragens ocorreram de 4 a 6 de outubro de 2016. As medidas da razão de mistura de isopreno foram feitas a 15 metros acima do dossel no Pantanal (Figura 1a) e 36 metros acima do dossel na Amazônia (Figura 1b). As medições foram realizadas entre 8h e 17h no Pantanal e entre 8h e 16h na Amazônia, ambas no horário local, utilizando-se um amostrador automático sequencial (STS-25, Perkin Elmer), que foi calibrado diariamente antes do trabalho de campo, com vazão média de 60 mL^{min-1} e duração da amostragem de 90 minutos.

Figura 1. Locais de medição para proporções de mistura de isopreno no Pantanal (1a) e na Amazônia (1b).



Fonte: Autores.

Amostras de ar foram coletadas em tubos de adsorção de aço inoxidável pré-condicionados (Perkin Elmer, Air Toxics) e a análise cromatográfica foi realizada no laboratório LAPBIO (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE). As amostras foram pré-concentradas em um dessorvente térmico (Turbo Matrix ATD350, Perkin Elmer) a 0°C e dessorvidas a 280°C. A cromatografia gasosa (GC-FID) (Clarus 580, Perkin Elmer) foi utilizada para a separação química do isopreno utilizando uma coluna capilar Rt-Alumina Bond-Na2SO4 (50 m x 0,32 mm) com rampa de temperatura de 45°C a 290°C durante 18 minutos e fluxo portador de 4 ml^{min-1}.

A quantificação dos compostos foi realizada usando curvas de calibração diárias geradas pela diluição de um gás padrão (isopreno de 300 ppb). Tubos de adsorção Air Toxics foram utilizados para a análise de hidrocarbonetos de C2 a C6. O limite de detecção do método, calculado por regressão linear, correspondeu a uma injeção mínima de 0,23 ppb ($0,2 \mu\text{g m}^{-3}$) de isopreno, com precisão relativa de 4% em sete injeções da mesma proporção de mistura padrão.

O ciclo diurno da proporção da mistura de isopreno foi determinado pelo cálculo de médias horárias. As concentrações de isopreno foram comparadas com a temperatura e a radiação solar recebida para avaliar os fatores que afetam as emissões de isopreno da vegetação (Bai, 2015). Cada amostra foi analisada individualmente e todos os dados são apresentados em horário local.

Os dados de temperatura do ar e radiação solar global para o Pantanal foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) na estação meteorológica automática de Miranda, Mato Grosso do Sul. Para a Amazônia, os dados foram fornecidos pelo Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA).

Análises estatísticas foram realizadas para avaliar as diferenças nas concentrações de isopreno entre locais e anos. Uma análise de variância (ANOVA) unidirecional foi usada para determinar diferenças significativas nos níveis médios de isopreno, seguida por um teste post-hoc de Tukey HSD para identificar diferenças específicas de grupo. As análises foram conduzidas ao nível de significância de 0,05.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, apresentamos os resultados de nosso estudo sobre as emissões de isopreno nos biomas Pantanal e Amazônia, enfatizando a influência de fatores ambientais como temperatura, radiação solar e atividade do fogo. A análise baseia-se nas proporções de mistura de isopreno medidas durante campanhas de campo em 2016 e 2017, oferecendo uma perspectiva detalhada sobre os padrões de emissão nesses ecossistemas contrastantes.

Os resultados estão organizados em dois aspectos principais. Primeiro, fornecemos uma análise comparativa das proporções de mistura de isopreno entre os dois biomas, destacando as distintas condições ecológicas e climáticas que moldam essas emissões. Em segundo lugar, examinamos como a dinâmica sazonal e os eventos de fogo contribuem para as variações nas emissões de isopreno, com foco nas diferentes respostas do Pantanal e da Amazônia aos ciclos naturais e distúrbios antropogênicos.

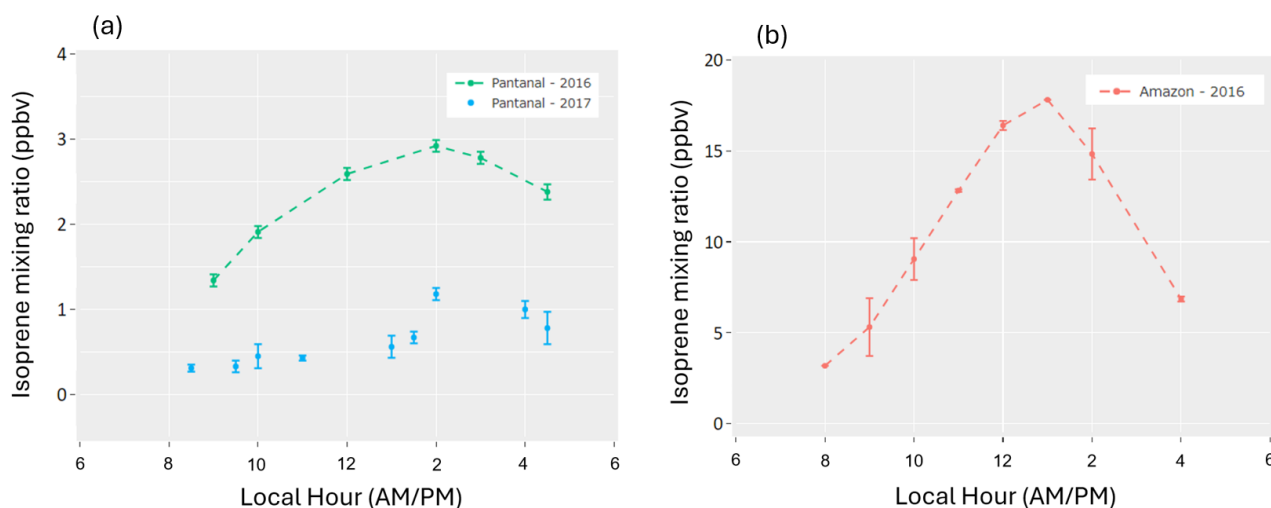
Por fim, discutimos as implicações atmosféricas mais amplas dessas descobertas, considerando como as emissões de isopreno desses biomas influenciam a qualidade do ar e os processos químicos

em escalas regionais e globais. Ao integrar dados sobre tendências sazonais e impactos de incêndios, este estudo resalta as complexas interações entre sistemas ecológicos e atividades humanas, oferecendo insights sobre o papel dos biomas tropicais na química atmosférica.

3.1 PROPORÇÃO DE MISTURA DE ISOPRENO PARA O PANTANAL E AMAZÔNIA

As Figuras 2a e 2b ilustram os ciclos diurnos da razão de mistura de isopreno medida no final da estação seca nos dois biomas: Pantanal, em 2016 e 2017, e Amazônia, em 2016. Em ambos os biomas, as linhas tracejadas, em verde e vermelho, indicam a tendência desses ciclos em condições de céu sem nuvens.

Figura 2. Ciclos diurnos das razões de mistura de isopreno medidas durante a estação seca em ambos os biomas: (a) Pantanal em 2016 e 2017, e (b) Amazônia em 2016. As linhas tracejadas representam a tendência do ciclo diurno em condições de céu sem nuvens.



Fonte: Autores.

As diferenças nas concentrações médias de isopreno entre os biomas Pantanal e Amazônico são evidentes a partir dos resultados das medições de isopreno. Em 2016, o Pantanal apresentou uma concentração média de isopreno de $2,32 \pm 0,57$ ppbv, com base em 12 medições. No mesmo ano, a Amazônia exibiu uma concentração média de isopreno de $10,38 \pm 5,17$ ppbv, com um total de 18 medições. No ano seguinte, em 2017, as medições no Pantanal mostraram uma redução na média de isopreno em relação a 2016, registrando $0,65 \pm 0,30$ ppbv de 22 medições.

Os dados obtidos para o Pantanal em 2016 e 2017 são consistentes com os valores encontrados por Donoso *et al.* (1996) e Holzinger *et al.* (2002) em ambientes de savana na Venezuela durante a estação seca. Holzinger *et al.* (2002) relataram valores médios de razão de mistura de isopreno de $0,8 \pm 0,2$ ppbv em uma savana florestal e $0,6 \pm 0,1$ ppbv em uma savana gramínea, mostrando uma

semelhança com os valores obtidos no Pantanal. Da mesma forma, os resultados de Yáñez-Serrano *et al.* (2015) na Amazônia indicaram uma mediana de isopreno de $7,6 \pm 6,1$ ppbv, que está na mesma faixa de magnitude das medições realizadas nesta pesquisa para a Amazônia em 2016, que apresentou média de $10,38 \pm 5,17$ ppbv. Essa correspondência valida a consistência dos dados obtidos neste estudo e destaca as diferentes taxas de emissão entre os biomas.

Os resultados da ANOVA indicam que existem diferenças estatisticamente significativas nas médias das concentrações de isopreno entre os grupos analisados (Pantanal 2016, Pantanal 2017 e Amazônia 2016), com um valor de F de 53,43 e um valor de p de $4,88e-13$, sugerindo que pelo menos uma das médias difere estatisticamente das demais. O teste de Tukey, realizado como análise post-hoc, confirmou essas diferenças: a comparação entre Amazônia 2016 e Pantanal 2016 revelou uma diferença média de $-8,06$ ppbv ($p < 0,05$), enquanto a comparação entre Amazônia 2016 e Pantanal 2017 mostrou uma diferença média ainda maior de $-9,73$ ppbv ($p < 0,05$), ambas as diferenças sendo estatisticamente significativas. Por outro lado, a comparação entre o Pantanal 2016 e o Pantanal 2017, apesar de mostrar uma diferença média de $-1,67$ ppbv, não foi estatisticamente significativa ($p = 0,2913$). Esses resultados indicam que as emissões de isopreno são substancialmente maiores na Amazônia em comparação com o Pantanal e que, no Pantanal, houve uma redução nas proporções de mistura de isopreno de 2016 a 2017. Em 2016, a proporção média de mistura de isopreno no Pantanal foi aproximadamente 77,6% menor do que na Amazônia, enquanto em 2017 essa diferença aumentou para aproximadamente 93,7%.

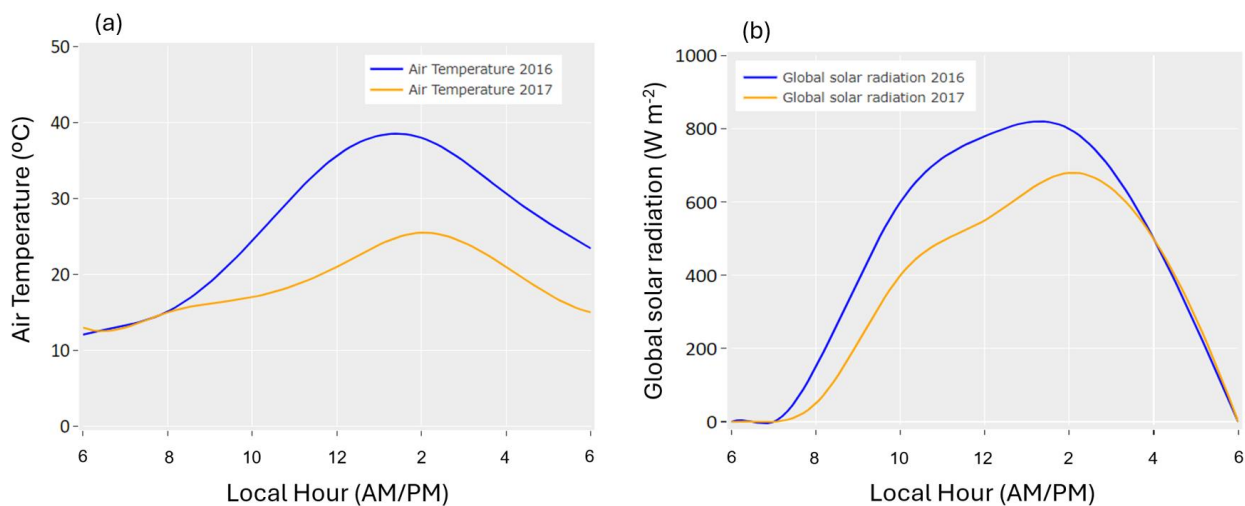
As menores concentrações de isopreno observadas no Pantanal em comparação com a Amazônia podem ser atribuídas a uma combinação de fatores ecológicos e ambientais. O bioma amazônico, caracterizado por sua maior diversidade e densidade de vegetação, tende a suportar emissões de isopreno mais intensas. Em contraste, o Pantanal, com sua vegetação sazonal, menor densidade de plantas e a presença de espécies decíduas, juntamente com suas condições ambientais distintas, podem resultar em emissões reduzidas.

A partir das figuras (2a e 2b) que descrevem os dados de 2016, padrões diurnos semelhantes são observados em ambos os biomas. No Pantanal, a maior proporção de mistura de isopreno ocorre por volta das 14h, enquanto na Amazônia, o pico é registrado por volta das 13h00, ambos os horários locais. O rápido aumento da proporção de mistura durante a manhã, com pico no início da tarde, é atribuído à influência da temperatura e da radiação solar nas emissões de isopreno (Sanadze, 1969), levando a uma variação diurna pronunciada.

3.2 IMPACTO DA VARIAÇÃO SAZONAL E DOS INCÊNDIOS NAS EMISSÕES DE ISOPRENO

As Figuras 3a e 3b ilustram a variação sazonal da temperatura do ar e da radiação solar global no final da estação seca no Pantanal durante 2016 e 2017. A Figura 3a mostra que as temperaturas foram consistentemente mais altas em 2016 em relação a 2017, atingindo valores dentro da faixa ideal para produção e emissão de isopreno, entre 30°C e 35°C, conforme sugerido por Langford *et al.* (2022). A Figura 3b revela que a radiação solar incidente também foi mais intensa em 2016, com um pico mais pronunciado ao longo do dia, atingindo 820 W m⁻² em 2016 e 680 W m⁻² em 2017. De acordo com Alves *et al.* (2018), nessas condições, as plantas tendem a produzir e emitir isopreno de forma mais intensa, pois a atividade das enzimas envolvidas na biossíntese de isopreno é maximizada e a estabilidade da membrana celular é mantida, facilitando a liberação do composto na atmosfera. Apoiando essa observação, durante a campanha de 2016, a proporção de mistura de isopreno mostrou uma correlação mais forte com a radiação solar ($r = 0,91$) do que com a temperatura ($r = 0,84$), indicando que a radiação solar foi o principal impulsionador das emissões de isopreno naquele ano. Por outro lado, na campanha de 2017, a relação foi invertida: a correlação com a temperatura ($r = 0,80$) excedeu a correlação com a radiação solar ($r = 0,73$), sugerindo que a temperatura se tornou o fator dominante nas emissões de isopreno nas condições daquele ano.

Figura 3. Temperatura do ar (a) e radiação solar global (b) no sítio Pantanal durante as campanhas de amostragem da estação seca em 2016 e 2017.



Fonte: Autores.

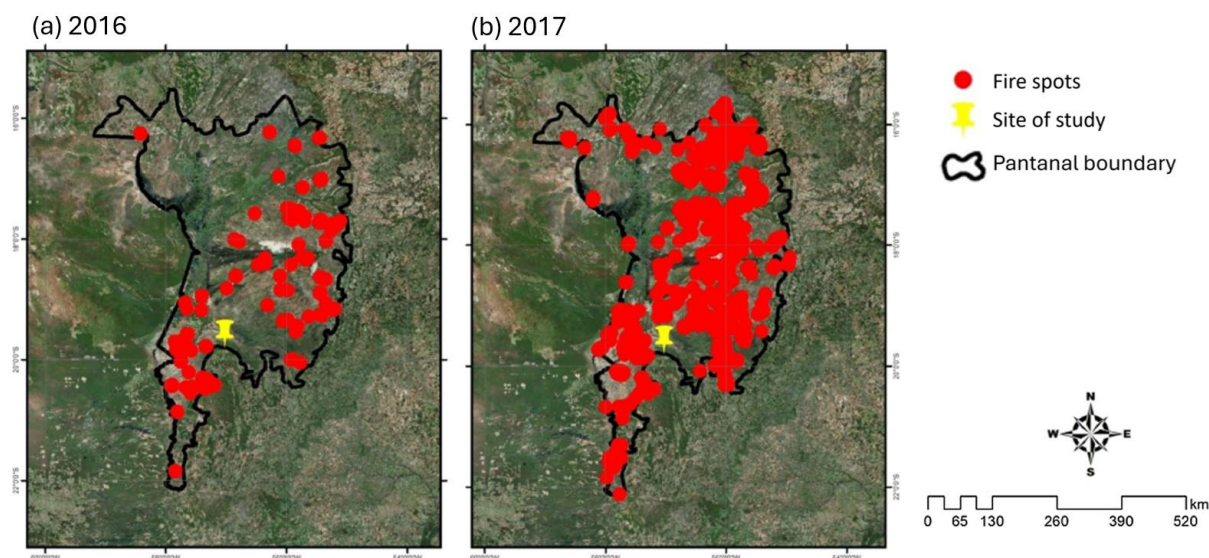
Conforme observado por Langford *et al.* (2022), as variações sazonais da radiação solar e da temperatura impactam diretamente nas emissões de isopreno, que seguem um ciclo sazonal, com maior proporção de mistura durante a estação seca, em resposta às condições meteorológicas, como maior temperatura e radiação solar. Nesse cenário, outros fatores ambientais, como umidade do solo e

precipitação, também podem desempenhar um papel representativo na regulação das emissões de isopreno, especialmente em regiões como o Pantanal. Além disso, segundo esses autores, a interferência de poluentes antrópicos, como o aumento das concentrações de óxidos de nitrogênio reativo (NOx) devido a incêndios, pode alterar a química atmosférica do isopreno, alterando suas vias de oxidação. Esse contexto sugere que as condições ambientais em 2017, aliadas a possíveis influências antrópicas, contribuíram para a redução significativa das concentrações de isopreno no Pantanal em relação a 2016.

Uma análise da atividade do fogo durante os períodos de amostragem no Pantanal revelou diferenças significativas entre 2016 e 2017. Dados de satélite do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2024) mostraram que entre 28 de agosto e 3 de setembro de 2016, foram registrados 474 focos de incêndio. Em contraste, de 10 a 16 de setembro de 2017, o número de focos de incêndio subiu para 8.384, um aumento de mais de 15 vezes em relação ao ano anterior.

As Figuras 4a e 4b ilustram a distribuição espacial dessas manchas de incêndio, com pontos vermelhos indicando locais de incêndio e o marcador amarelo denotando o local de amostragem (Sobral, 2019). Este aumento substancial na atividade de incêndio em 2017 provavelmente teve um impacto direto nas condições ambientais e nos dados de isopreno coletados durante as campanhas de amostragem.

Figura 4. Focos de incêndio registrados por satélite dentro dos limites do Pantanal para 2016 (a) e 2017 (b). Os pontos vermelhos representam manchas de incêndio e o marcador amarelo indica o local de amostragem.



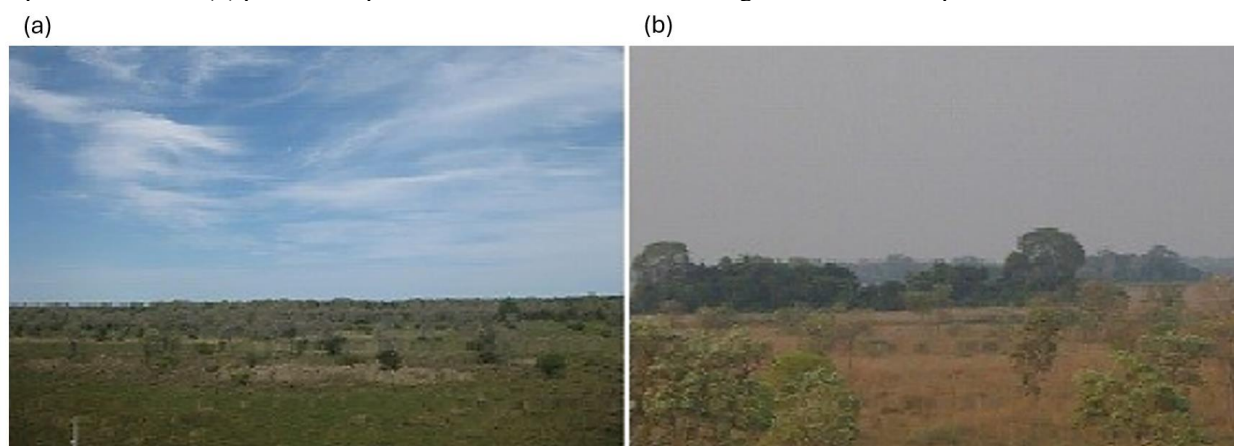
Fonte: Sobral (2019).

Mudanças sazonais na radiação solar e na temperatura são os principais impulsionadores das emissões de isopreno, com concentrações mais altas normalmente observadas durante a estação seca

(Langford *et al.*, 2022). Mas, além disso, fatores ambientais, como umidade do solo e precipitação, juntamente com influências antropogênicas, como níveis elevados de NO_x causados por incêndios, podem alterar significativamente a química atmosférica e as vias de emissão do isopreno, particularmente em ecossistemas sensíveis como o Pantanal.

Para efeito de comparação, as Figuras 5a e 5b apresentam fotos que caracterizam a paisagem da região no final da estação seca durante as campanhas no Pantanal em 2016 e 2017. Na imagem (5a), de 2016, observa-se um céu predominantemente ensolarado, ilustrando as condições atmosféricas típicas da estação seca. Em contraste, a imagem (5b), de 2017, mostra a presença de plumas de fogo que obscurecem o céu, refletindo a influência dos incêndios na região durante aquele ano. Isso também é confirmado pelas trajetórias de retorno (não mostradas) construídas para os dois períodos, que demonstram a influência das plumas de fogo na região de amostragem em 2017.

Figura 5. Fotos obtidas da torre de fluxo PTN no BEP-UFMS: (a) céu claro observado no local de amostragem durante a campanha de 2016 e (b) plumas de queima visíveis no local de amostragem durante a campanha de 2017.



Fonte: Sobral (2019).

A diminuição observada nas proporções de mistura de isopreno em 2017 pode ser atribuída em grande parte à influência de fatores antropogênicos, particularmente os extensos incêndios na região. Essa observação é consistente com os achados de Lee *et al.* (2016) e Langford *et al.* (2022) na Amazônia, onde a poluição por incêndios regionais, principalmente durante a estação seca, aumenta significativamente as concentrações de NO_x. Esses níveis elevados de NO_x podem desviar a oxidação do isopreno de suas vias naturais, favorecendo a formação de produtos alternativos menos propícios à formação de SOA. Isso sugere que, embora as emissões naturais de isopreno estejam presentes, a introdução de poluentes antropogênicos pode alterar significativamente a química atmosférica desse composto.

Embora medições diretas de ozônio ou NO_x não tenham sido feitas neste estudo, o aumento dramático de incêndios em 2017 provavelmente injetou uma quantidade significativa desses compostos reativos na atmosfera. O resultado foi um aumento da capacidade oxidativa, levando a uma oxidação de isopreno mais extensa em comparação com 2016. Isso é consistente com os achados de Santos *et al.* (2018), que relataram que a queima de biomassa não só aumenta os níveis de NO_x e CO, mas também facilita o transporte vertical desses poluentes, afetando processos oxidativos em diferentes altitudes.

Além disso, as taxas de mistura de isopreno mais baixas observadas em 2017 também podem ser devidas à redução da radiação solar e da temperatura, ambos fatores críticos das emissões de isopreno. No entanto, a presença de plumas de fogo sugere que os subprodutos da combustão, particularmente o NO_x, desempenharam um papel importante na alteração do comportamento atmosférico do isopreno. A interação desses fatores naturais e antropogênicos provavelmente resultou na redução dos níveis de isopreno em comparação com as condições mais claras e menos poluídas de 2016.

Para entender completamente essa dinâmica, um estudo abrangente que incluía medições de outros compostos orgânicos voláteis, como acetonitrila e acetaldeído, além do isopreno, seria benéfico. Tal abordagem, especialmente se conduzida durante a estação chuvosa, forneceria uma compreensão mais profunda dos processos oxidativos em jogo no Pantanal, dado seu contexto ambiental único em comparação com a Amazônia. Como destacado por Santos *et al.* (2018), a proporção de isopreno para seus produtos de oxidação pode servir como uma métrica valiosa para avaliar a extensão da oxidação do isopreno e seu impacto na química atmosférica.

Abordando a questão de pesquisa "Como as condições ambientais específicas no Pantanal, como padrões hidrológicos sazonais e ocorrência de incêndios, influenciam as emissões de isopreno em comparação com a Amazônia?", os resultados sugerem que as condições ambientais distintas do Pantanal levam a diferentes respostas ao forçamento sazonal e antropogênico. A interação de fogo, temperatura e radiação modula de forma única as emissões de isopreno neste bioma, ressaltando sua sensibilidade a mudanças naturais e induzidas pelo homem.

No contexto mais amplo da Agenda 2030 da ONU, particularmente os ODS 13 e 15, que enfatizam a ação climática e a conservação de ecossistemas vulneráveis, essas descobertas são críticas. Como bioma vital, o Pantanal contribui significativamente para a regulação do clima e serviços ecossistêmicos. Compreender os fatores que influenciam as emissões de isopreno nesta região pode informar estratégias globais de conservação e ação climática, destacando a importância de gerenciar

fatores naturais e antropogênicos para preservar o papel do Pantanal na estabilidade climática global e na saúde do ecossistema.

4 CONCLUSÕES

O objetivo primário desta pesquisa foi quantificar as emissões de isopreno no Pantanal e compará-las com as da Amazônia, avaliando suas correlações com fatores ambientais como temperatura, radiação solar e ocorrência de incêndios. Este estudo, que apresenta as primeiras medidas de razões de mistura de isopreno no bioma Pantanal, teve como objetivo entender como essas emissões são moduladas pelas condições ambientais únicas da região. Os insights obtidos contribuem para uma melhor compreensão da química do isopreno em biomas tropicais, com implicações significativas para o aprimoramento dos modelos climáticos, apoio a estratégias de conservação e mitigação dos impactos das mudanças climáticas.

A principal descoberta deste estudo confirma que fatores ambientais, particularmente a ocorrência de incêndios e o aumento associado de óxidos de nitrogênio reativos (NO_x), alteram significativamente a química atmosférica do isopreno no Pantanal. Especificamente, a pesquisa demonstrou que as proporções de mistura de isopreno foram notavelmente mais baixas em 2017, um ano caracterizado por radiação e temperatura reduzidas, juntamente com um aumento da capacidade oxidativa da atmosfera devido à poluição relacionada ao fogo. Esse achado fundamenta o objetivo do estudo, demonstrando que as emissões de isopreno do Pantanal são de fato moduladas por suas condições ambientais únicas.

Em um nível prático, essas descobertas podem informar as estratégias de gestão ambiental no Pantanal, particularmente na mitigação do impacto das queimadas e na preservação do papel crítico do bioma na regulação do clima. Em concordância com Ferreira *et al.* (2023a; 2023b), a pesquisa também traz implicações sociais, enfatizando a necessidade de políticas que abordem a degradação ambiental causada por incêndios, que podem ter efeitos de longo alcance na qualidade do ar e na saúde pública. Além disso, compreender o papel das emissões de isopreno na dinâmica climática pode contribuir para os esforços globais de combate às mudanças climáticas, alinhando-se com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 13 e 15 da ONU.

Uma limitação desta pesquisa é a ausência de medições diretas de outros BVOCs e NO_x, o que poderia ter proporcionado uma compreensão mais abrangente dos processos atmosféricos que influenciam as emissões de isopreno no Pantanal. Além disso, o estudo foi confinado à estação seca, e os resultados podem não capturar totalmente a variabilidade sazonal das emissões de isopreno neste bioma.

Pesquisas futuras devem se concentrar em expandir o escopo das medições para incluir uma gama mais ampla de compostos orgânicos voláteis biogênicos (BVOCs) e óxidos de nitrogênio (NOx), que são essenciais para entender as complexas interações entre fatores naturais e antropogênicos que influenciam as emissões de isopreno. Esses dados forneceriam insights mais profundos sobre os processos químicos que ligam as emissões à dinâmica atmosférica nas regiões tropicais. Além disso, a inclusão da estação chuvosa em estudos futuros preencheria uma lacuna crítica e forneceria uma perspectiva completa sobre as variações sazonais das emissões de isopreno no Pantanal. Isso melhoraria nossa compreensão de como as chuvas, a atividade da vegetação e outros fatores climáticos moldam os padrões de emissão ao longo do ano.

Finalmente, é essencial estudar os efeitos das mudanças no uso da terra, como desmatamento e expansão agrícola, nas emissões de isopreno. Essas mudanças alteram significativamente a dinâmica do ecossistema e os padrões de emissão, tornando importante avaliar suas implicações para a sustentabilidade do Pantanal sob crescentes pressões ambientais. Tais estudos apoiariam o desenvolvimento de estratégias de conservação e contribuiriam para os esforços globais para mitigar os desafios climáticos e de biodiversidade.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores agradecem ainda ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Sistema Terrestre (PPG-CST) e ao Laboratório de Biogeoquímica Ambiental do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), bem como à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), pelo apoio técnico e institucional.

REFERÊNCIAS

- ALVES, E. G. et al. Leaf phenology as one important driver of seasonal changes in isoprene emissions in central Amazonia. *Biogeosciences*, v. 15, n. 13, p. 4019-4032, 2018.
- 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, n. 18, p. 10723-10776, 2015.
- ARNETH, A. et al. Terrestrial biogeochemical feedbacks in the climate system. *Nature Geoscience*, v. 3, n. 8, p. 525-532, 2010.
- BARKET JR, D. J. et al. A study of the NO_x dependence of isoprene oxidation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 109, n. D11, 2004.
- BELA, M. M. et al. Ozone production and transport over the Amazon Basin during the dry-to-wet and wet-to-dry transition seasons. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 15, n. 2, p. 757-782, 2015.
- CICCIOLI, P.; CENTRITTO, M.; LORETO, F. Biogenic volatile organic compound emissions from vegetation fires. *Plant, Cell and Environment*, v. 37, n. 8, p. 1810-1825, 2014.
- CORREA, D. B. et al. Increased burned area in the Pantanal over the past two decades. *Science of the Total Environment*, v. 835, 2022.
- DA ROCHA, H. R. et al. Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, v. 114, n. G1, 2009.
- DE PAULA, J. E.; CONCEIÇÃO, C. A.; MACÊDO, M. Contribuição para o conhecimento do Pantanal Passo do Lontra. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 30, n. 5, p. 583-594, 1995.
- DONOSO, L. et al. Natural and anthropogenic C₂ to C₆ hydrocarbons in the central-eastern Venezuelan atmosphere during the rainy season. *Journal of Atmospheric Chemistry*, v. 25, p. 201-214, 1996.
- FERNANDES, F. A. et al. Atualização do mapa de solos da planície pantaneira para o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. *EMBRAPA. Comunicado Técnico*, v. 61, p. 1-6, 2007.
- FERREIRA, W. J.; DA SILVA RICHETTO, K. C.; CHAGAS, E. V. Educação ambiental: Um caminho sustentável para combater as mudanças climáticas. *Revista Biociências*, v. 29, especial, 2023a.
- FERREIRA, W. J. et al. Math phobia and maths anxiety: Multidisciplinary approaches for a more inclusive and equitable education in Brazil. *Concilium*, v. 23, n. 17, p. 663-677, 2023b.
- GUENTHER, A. B. et al. The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2.1 (MEGAN2. 1): An extended and updated framework for modeling biogenic emissions. *Geoscientific Model Development*, v. 5, n. 6, p. 1471-1492, 2012.
- HARLEY, P. et al. Variation in potential for isoprene emissions among Neotropical forest sites. *Global Change Biology*, v. 10, n. 5, p. 630-650, 2004.

- HOLZINGER, R. et al. Diurnal cycles and seasonal variation of isoprene and its oxidation products in the tropical savanna atmosphere. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 16, n. 4, p. 22-1, 2002.
- INPE. National Institute for Space Research. Fire database. 2024. Disponível em: <<http://www.inpe.br/queimadas/bdqueimadas/>>.
- JIANG, X. et al. Isoprene emission response to drought and the impact on global atmospheric chemistry. *Atmospheric Environment*, v. 183, p. 69-83, 2018.
- KARL, T. et al. Efficient atmospheric cleansing of oxidized organic trace gases by vegetation. *Science*, v. 330, n. 6005, p. 816-819, 2010.
- LANGFORD, B. et al. Seasonality of isoprene emissions and oxidation products above the remote Amazon. *Environmental Science: Atmospheres*, v. 2, n. 2, p. 230-240, 2022.
- LAOTHAWORNKITKUL, J. et al. Biogenic volatile organic compounds in the Earth system. *New Phytologist*, v. 183, n. 1, p. 27-51, 2009.
- LEE, S. H. et al. Isoprene suppression of new particle formation: Potential mechanisms and implications. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 121, n. 24, p. 14-621, 2016.
- LUIZÃO, F. J.; LUIZÃO, R. C.; PROCTOR, J. Soil acidity and nutrient deficiency in central Amazonian heath forest soils. *Plant Ecology*, v. 192, p. 209-224, 2007.
- SANADZE, G. A. Light-dependent excretion of molecular isoprene. *Progress in Photosynthesis Research*, v. 2, p. 701-706, 1969.
- SANTOS, F. et al. Biomass burning emission disturbances of isoprene oxidation in a tropical forest. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 18, n. 17, p. 12715-12734, 2018.
- SHRIVASTAVA, M. et al. Urban pollution greatly enhances formation of natural aerosols over the Amazon rainforest. *Nature Communications*, v. 10, p. 1046, 2019.
- SILVA, F. M.; SANTOS, M. dos; LIMA, Z. M. C. *Geografia Física II: Sistemas sinóticos e classificação climática*. Notas de aula. Natal: EDUFRN, 2009.
- SILVA, P. S. et al. Joining forces to fight wildfires: Science and management in a protected area of Pantanal, Brazil. *Environmental Science & Policy*, v. 159, p. 103818, 2024.
- ŠIMPRAGA, M. et al. Unravelling the functions of biogenic volatiles in boreal and temperate forest ecosystems. *European Journal of Forest Research*, v. 138, p. 763-787, 2019.
- SOBRAL, A. C. *Caracterização dos fluxos de isopreno nos biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal*. 2019. Thesis (PhD in Earth System Science) – National Institute for Space Research, São José dos Campos.
- TER STEEGE, H. et al. Hyperdominance in the Amazonian tree flora. *Science*, v. 342, n. 6156, p. 1243092, 2013.

UN. United Nations. Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. 2024. Disponível em: <<https://sdgs.un.org/2030agenda>>.

WANTZEN, K. M. et al. The end of an entire biome? World's largest wetland, the Pantanal, is menaced by the Hidrovia project which is uncertain to sustainably support large-scale navigation. *Science of The Total Environment*, v. 908, p. 167751, 2024.

WELLS, K. C. et al. Satellite isoprene retrievals constrain emissions and atmospheric oxidation. *Nature*, v. 585, n. 7824, p. 225-233, 2020.

YÁÑEZ-SERRANO, A. M. et al. Amazonian biogenic volatile organic compounds under global change. *Global Change Biology*, v. 26, n. 9, p. 4722-4751, 2020.

YÁÑEZ-SERRANO, A. M. et al. Diel and seasonal changes of biogenic volatile organic compounds within and above an Amazonian rainforest. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 15, n. 6, p. 3359-3378, 2015.