

## **Análise estatística de modelo global de emissões biogênicas para a qualidade do ar do estado do Rio de Janeiro**

Daniela Anacleto de Melo<sup>1</sup>; 0009-0009-1196-9259

Thiago da Fonseca Costa<sup>1</sup>; 0000-0003-1743-6268

Eduardo Monteiro Martins<sup>1</sup>; 0000-0003-4164-0218

1 – UERJ, Faculdade de Tecnologia, Resende, RJ.

[daniela.anacleto@discentes.fat.uerj.br](mailto:daniela.anacleto@discentes.fat.uerj.br)

**Resumo:** Os compostos orgânicos voláteis (COVs) biogênicos desempenham papel essencial na química atmosférica, sendo emitidos principalmente pela vegetação, incluindo isopreno, terpenos e metanol, que contribuem para a formação de ozônio troposférico e aerossóis orgânicos secundários. Este estudo avaliou a aplicabilidade do modelo MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) para estimar emissões de COVs biogênicos no estado do Rio de Janeiro, considerando cobertura vegetal, tipos funcionais de plantas e variáveis meteorológicas. Os dados de uso e ocupação do solo foram obtidos a partir de MapBiomas e MODIS, e as variáveis meteorológicas foram fornecidas pelo modelo WRF. A análise de Pareto identificou os compostos responsáveis pela maior contribuição ao total. Os resultados indicam que terpenos, isopreno e metanol foram os compostos dominantes, com forte dependência do tipo de vegetação e das condições sazonais. O modelo MEGAN demonstrou capacidade consistente de estimar padrões de emissão, embora ajustes regionais sejam necessários para melhor representar a diversidade da Mata Atlântica e do contexto ambiental fluminense. Este estudo fornece subsídios para futuros inventários regionais e políticas de mitigação da poluição atmosférica.

**Palavras-chave:** compostos orgânicos voláteis. emissão biogênica. MEGAN. isopreno. terpenos.

## INTRODUÇÃO

Os compostos orgânicos voláteis (COVs) biogênicos desempenham papel fundamental na composição química da atmosfera, sendo emitidos principalmente pela vegetação por meio de processos fisiológicos e bioquímicos. Entre os COVs mais relevantes estão o isopreno, os terpenos, o metanol e outros compostos oxigenados, que participam de mecanismos de formação de ozônio troposférico, material particulado secundário e produtos oxidativos de importância climática e ambiental. A emissão desses compostos está intimamente relacionada ao tipo de vegetação, à temperatura, à radiação solar e à sazonalidade, conferindo grande variabilidade espacial e temporal às concentrações atmosféricas observadas (OTTER et al., 2003).

Modelos de emissão, como o MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature), são amplamente utilizados para estimar fluxos de COVs biogênicos em diversas regiões globais. O MEGAN baseia-se em variáveis como índice de área foliar (LAI), tipos funcionais de vegetação, temperatura da superfície foliar, radiação fotossinteticamente ativa e condições de estresse vegetativo (GUENTHER et al., 2006; HOINASKI et al., 2023). Esses modelos são essenciais para subsidiar inventários atmosféricos, apoiar políticas de qualidade do ar e auxiliar na mitigação das mudanças climáticas.

No Brasil, a vegetação da Mata Atlântica apresenta alto potencial emissor de compostos como isopreno e terpenos, devido à sua riqueza arbórea e diversidade biológica. Entretanto, áreas de vegetação secundária, pastagens e capoeiras também influenciam o perfil regional de emissões, alterando a proporção entre os compostos mais representativos (SOS MATA ATLÂNTICA; SEEG, 2021).

No caso do estado do Rio de Janeiro, não há um inventário oficial de emissões biogênicas disponível, o que evidencia uma lacuna fundamental no entendimento da atmosfera regional. Estudos realizados na cidade já identificaram a presença de compostos como isopreno, monoterpenos ( $\alpha$ -pineno,  $\beta$ -pineno e limoneno), metanol, acetona e aldeídos leves, todos reconhecidos como importantes precursores de ozônio troposférico e de aerossóis orgânicos secundários. Parte dessas espécies foi detectada em monitoramentos urbanos e periurbanos, com concentrações médias entre 120 e 190 ppbC em áreas como Bangu e

Irajá, indicando que mesmo em regiões densamente povoadas as contribuições biogênicas são relevantes para a química atmosférica local (MARTINS; NUNES; CORRÊA, 2015). Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo principal avaliar a aplicabilidade do modelo MEGAN para estimar emissões de COVs biogênicos no estado do Rio de Janeiro, verificando sua capacidade de representar as condições locais de vegetação e clima e preenchendo essa lacuna significativa de conhecimento.

## **MÉTODOS**

O modelo MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) é amplamente empregado para estimar as emissões de compostos orgânicos voláteis (COVs) e aerossóis derivados da vegetação terrestre. Desenvolvido por Alex Guenther e colaboradores, o modelo incorporou avanços que permitem representar a estrutura florestal, considerando a produção e perda de compostos em diferentes camadas da vegetação, bem como processos de deposição e transformações de fase gás-partícula (GUENTHER et al., 2006a; GUENTHER et al., 2012).

Neste estudo, o MEGAN (versão 3.1) foi executado de forma offline utilizando estimativas baseadas na distribuição de ecossistemas obtida por meio da classificação do MapBiomas. Para isso, foram empregados dados de uso e ocupação dos solos derivados do MODIS (versão 21), reclassificados conforme o mapeamento de Pedruzzi Rizzieri (2020). Essa etapa permitiu associar a cada tipo de ecossistema um tipo funcional de planta (PFT) compatível com os parâmetros do modelo, assegurando a coerência entre a cobertura vegetal e os fatores de emissão aplicados. As variáveis meteorológicas necessárias (radiação solar, temperatura, umidade e vento) foram obtidas a partir do modelo atmosférico WRF e convertidas pelo processador MCIP para o formato aceito pelo MEGAN.

Com base nesses dados, o MEGAN gerou arquivos de emissão no formato NetCDF contendo as taxas estimadas de emissão para os principais COVs biogênicos. Essas estimativas foram organizadas em uma matriz georreferenciada, estruturada por linhas, colunas e passos de tempo (time steps). Cada célula representa um ponto geográfico que contém valores de emissão específicos para diferentes espécies químicas, de acordo com o tipo de ecossistema predominante.

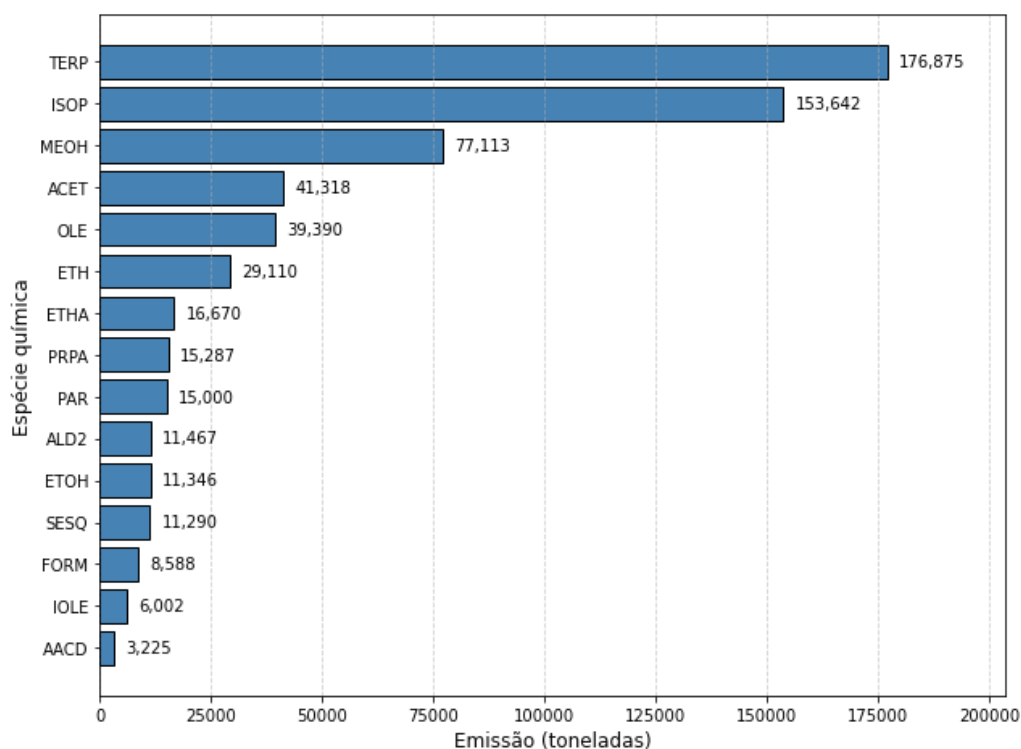
A análise dos dados foi conduzida utilizando a linguagem de programação Python. Inicialmente, os dados foram carregados em dataframes.

A análise de Pareto foi aplicada para identificar os fatores mais significativos em relação ao total de contribuições. Para isso, os dados foram ordenados em ordem decrescente de magnitude, calculadas as porcentagens relativas e a contribuição acumulada de cada fator.

Para visualização adicional empregou-se a biblioteca Seaborn (Waskom, 2021) do Python, que possibilita a criação de gráficos estatísticos avançados. Esta abordagem integrada permitiu a automatização de todo o fluxo de trabalho garantindo a reprodutibilidade e escalabilidade da análise.

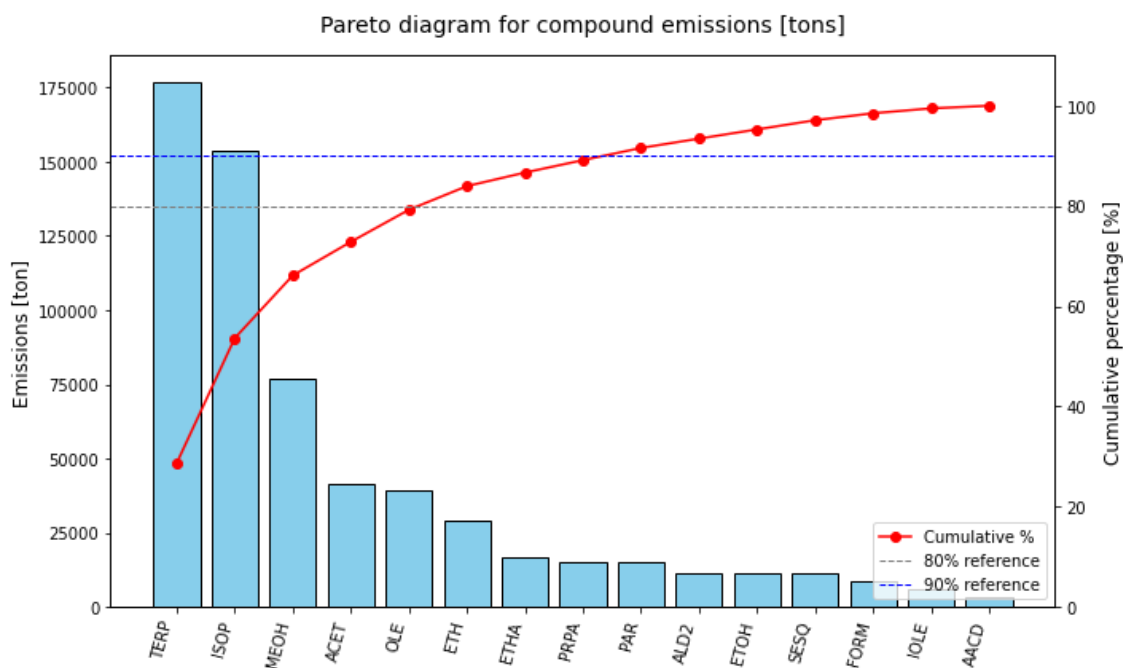
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Figura 1 – Gráfico com taxas de emissão  
Taxa de Emissão por Espécie Química (MEGAN)



Fonte: Acervo do Autor

Figura 2 – Diagrama de Pareto



Fonte: Acervo do Autor

O diagrama de Pareto obtido evidencia que poucos compostos respondem pela maior parcela da contribuição total, confirmando o princípio da desproporcionalidade proposta por Pareto. Observa-se que os três primeiros compostos já acumulam uma fração significativa dos resultados, ultrapassando o marco de 80% da contribuição total. Este resultado corrobora com a literatura, que aponta aplicabilidade do método para distinguir os fatores de maior impacto em sistemas complexos (REINHOLD, 2024).

A análise do perfil de emissões indica que os compostos orgânicos voláteis (COVs) mais relevantes foram os terpenos e os isoprenos, configurando-se como os grupos dominantes entre as emissões biogênicas simuladas. Essa predominância é consistente com a literatura, que identifica o isopreno como o alcadieno mais emitido pela vegetação, especialmente por espécies de florestas tropicais e de folhas largas, devido ao seu papel como composto-base na formação de diversos outros COVs secundários (GUENTHER et al., 2006; WU et al., 2020). Contudo, a presença de vastas áreas de pastagens e vegetação rasteira no Rio de Janeiro pode explicar a diminuição relativa desse composto no perfil final, pois gramíneas e plantas rasteiras apresentam taxas de emissão significativamente menores (ANSELMO-MOREIRA et al., 2025). A sazonalidade da simulação também pode ter influenciado o perfil

final já que a simulação considerou temperaturas médias ao redor de 27°C e os isoprenos possuem emissões maiores em temperaturas mais elevadas (MA et al. 2023).

A maior participação relativa de terpenos observada na simulação pode estar associada tanto à composição da vegetação do estado do Rio de Janeiro quanto às condições sazonais do período analisado, já que a emissão de terpenos está relacionada a diversos mecanismos de defesa de plantas induzidos por estresses abióticos (calor, frio, seca) (JIANG et. al. 2025; PEI et. al. 2025).

Por fim, ressalta-se que os fatores de emissão apresentam forte dependência do tipo de vegetação e do bioma considerado. Wang et al. (2024) reforçam a necessidade de parametrizações específicas para cada ecossistema, de modo que a Mata Atlântica brasileira demanda ajustes próprios no MEGAN, como sugerido por (COSTA,2025).

## **CONCLUSÕES**

Os resultados obtidos indicam que o modelo MEGAN consegue estimar de maneira consistente os principais padrões de emissão de compostos orgânicos voláteis biogênicos (COVs) no estado do Rio de Janeiro, identificando terpenos, isopreno e metanol como os grupos dominantes. Esses achados estão de acordo com a literatura, que reconhece esses compostos como os principais precursores de ozônio troposférico e aerossóis orgânicos secundários.

No entanto, observou-se que as taxas e proporções simuladas apresentam forte dependência do tipo de vegetação e das condições climáticas regionais. A predominância de áreas de pastagem e vegetação secundária, bem como a influência da sazonalidade, apontam que a parametrização atual do modelo não é suficiente para capturar adequadamente as especificidades da Mata Atlântica e do contexto fluminense.

Assim, conclui-se que, embora o MEGAN represente uma ferramenta útil para estimar fluxos de COVs biogênicos, são necessárias parametrizações adicionais e ajustes regionais que considerem a diversidade de ecossistemas e a dinâmica ambiental do Rio de Janeiro. Essa adaptação permitirá gerar inventários mais robustos, apoiar políticas públicas locais e



aprimorar simulações atmosféricas, garantindo maior realismo e confiabilidade nas projeções.

## REFERÊNCIAS

COSTA, T. F. da. Estudo da formação de ozônio troposférico no Estado do Rio de Janeiro utilizando modelo CMAQ-ISAM. 2025. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

GUENTHER, A. B. et al. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature). **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 6, p. 3181–3210, 2006. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-6-3181-2006>. Acesso em: 05 set. 2025.

GUENTHER, A. B.; HOFFMANN, E. H.; TILGNER, A.; HERRMANN, H. The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature (MEGAN): version 2.1 – an extended and updated framework for modeling biogenic emissions. **Geoscientific Model Development**, v. 5, p. 1471–1492, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1471-2012>. Acesso em: 05 set. 2025.

HOINASKI, L. et al. BRAIN: A comprehensive database of air quality in Brazil. **Earth System Science Data** (em preprint), 2023. Acesso em: 05 set. 2025.

JIANG, Z.; VAN ZANTEN, M.; SASIDHARAN, R. Mechanisms of plant acclimation to multiple abiotic stresses. **Communications Biology**, v. 8, n. 1, p. 655, 2025. DOI: 10.1038/s42003-025-08077-w. Acesso em: 05 set. 2025.

MA, J. et al. Impacts of land cover changes on biogenic emission and its contribution to ozone and secondary organic aerosol in China. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 23, n. 7, p.4311–4325, 12 abr. 2023.

MARTINS, E. M.; NUNES, A. C. L.; CORRÊA, S. Understanding Ozone Concentrations During Weekdays and Weekends in the Urban Area of the City of Rio de Janeiro. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, São Paulo, v. 26, n. 10, p. 1967–1975, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5935/0103-5053.20150175>. Acesso em: 05 set. 2025.

PEDRUZZI RIZZIERI. ATMOSPHERIC TRANSPORT OF AIR POLLUTANTS OVER SOUTHEASTERN BRAZIL: THE IMPACT OF METROPOLITAN AREAS EMISSIONS ON AIR QUALITY. 2020. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizontel, 2020

PEI, D.; WANG, A.; SHEN, L.; WU, J. Research on the emission of biogenic volatile organic compounds from terrestrial vegetation. **Atmosphere**, v. 16, p. 885, 2025. DOI: 10.3390/atmos16070885. Acesso em: 05 set. 2025.

REINHOLD, G. The Pareto Principle: A Strategic Blueprint for Net Zero by 2050. 2024. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/pareto-principlestrategic-blueprint-net-zero-2050-gary-reinhold-omhbc/>. Acesso em: 05 set. 2025.

WANG, H.; LIU, X.; WU, C.; LIN, G. Regional to global distributions, trends, and drivers of biogenic volatile organic compound emission from 2001 to 2020. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 24, p. 3309–3328, 2024. Acesso em: 05 set. 2025.

WASKOM, M. L. Seaborn: statistical data visualization. **Journal of Open Source Software**, v. 6, n. 60, 2021. Disponível em: <https://seaborn.pydata.org/>. Acesso em: 05 set. 2025.