

Variabilidade temporal da concentração de metano e associação com variáveis meteorológicas e de uso da terra no nordeste da Amazônia

Laura de Almeida Viana¹, Marco Aurélio de Menezes Franco^{2*}, Luciana Varanda Rizzo³

¹Universidade Federal de São Paulo, Departamento de Ciências Ambientais, Brasil.

²Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, Brasil (*Autor correspondente: marco.franco@usp.br)

³Instituto de Física, Universidade de São Paulo, Brasil

Histórico do Artigo: Submetido em: 16/06/2023 – Revisado em: 20/11/2023 – Aceito em: 13/12/2023

RESUMO

O metano (CH₄) é um importante gás de efeito estufa, emitido por fontes naturais e antrópicas. Pesquisas anteriores indicaram maiores emissões de CH₄ no nordeste da Amazônia em comparação com outras regiões da Bacia Amazônica, mas as razões ainda são pouco compreendidas. Este estudo teve como objetivo caracterizar as variações temporais nas concentrações de CH₄ em uma área do nordeste da Amazônia, sujeita a intensas mudanças no uso da terra, entre 2003 e 2019, com base em dados de satélite. Foram utilizados produtos de sensoriamento remoto e de reanálise, incluindo: dados da razão de mistura de CH₄ do sensor AIRS/AQUA na média troposfera (400 hPa), dados de uso da terra do MapBiomas, dados de temperatura e precipitação da reanálise ERA5/ECMWF e informações de queimadas do sensor MODIS/TERRA. Além da área de estudo, também foram analisados dados de concentração de CH₄ sobre duas estações de referência global, situadas nas Ilhas Ascensão (ASC) e Barbados (RPB). A aquisição e o processamento dos dados foram realizados utilizando as plataformas Giovanni/NASA, Google Earth Engine e o ambiente computacional R Studio. Foram avaliadas tendências de longo prazo e a variabilidade sazonal típica das variáveis consideradas. Modelos de regressão multilinear foram desenvolvidos no intuito de prever as concentrações de CH₄ (variável resposta) em função de variáveis meteorológicas de superfície, uso da terra e número de focos de queimada (preditores regionais) e em função da concentração de CH₄ em estações de referência global (preditores globais). As análises revelaram uma tendência de aumento de $4,3 \pm 0,3$ ppb/ano na área de estudo, significativamente menor do que as tendências de longo prazo observadas nas estações de referência global. As concentrações foram maiores durante a estação seca (ago-out), possivelmente devido ao aumento nas emissões biogênicas de CH₄ no período de águas baixas e a fatores globais. Foram observadas correlações estatisticamente significativas das concentrações de CH₄ com a temperatura máxima diária (correlação positiva) e com a precipitação (correlação negativa), em escala mensal e anual. No período de estudo, observou-se uma redução na cobertura de floresta de 84% para 79%, apresentando uma anti correlação significativa com as concentrações de CH₄ na média troposfera. Foram observadas fortes correlações entre as séries temporais de CH₄ observadas na área de estudo e na estação global ASC. Modelos de regressão lineares indicaram que a concentração de CH₄ em ASC explicou, respectivamente nas escalas mensal e anual, 81% e 98% da variabilidade temporal de CH₄ sobre a área de estudo. A inclusão de preditores regionais aprimorou o desempenho dos modelos de regressão, modulando os valores mais extremos de concentração nas estações seca e chuvosa. Em conclusão, o estudo mostra que a variabilidade sazonal e de longo prazo da concentração de CH₄ no nordeste da Amazônia é majoritariamente influenciada por fatores globais. Além disso, as diferenças de concentração e de tendências de longo prazo observadas entre a área de estudo e as estações globais de referência sugerem que a Amazônia pode estar atuando como um sumidouro de CH₄, atenuando o aumento global das concentrações.

Palavras-Chaves: Gases de efeito estufa, metano, Amazônia, Mudanças climáticas, Mudança de uso da terra

Temporal variability of methane concentrations and association with land use and meteorological variables in northeast Amazonia (Brazil)

ABSTRACT

Methane (CH₄) is an important greenhouse gas emitted by natural and anthropogenic sources. Previous research has indicated higher CH₄ emissions in the Northeast Amazon compared to other regions of the Amazon Basin, but the reasons still need to be better

Viana, L. A., Franco, M. A., Rizzo, L. V. (2023). Variabilidade temporal da concentração de CH₄ na média troposfera e associação com variáveis globais e regionais no nordeste da Amazônia. *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, v.4, n.3, p.35-55.



understood. Based on satellite data, this study aimed to characterize the temporal variations in CH₄ concentrations in northeastern Amazonia, subject to intense changes in land use, between 2003 and 2019. Remote sensing and reanalysis products were used, including CH₄ mixing ratio data from the AIRS/AQUA sensor in the mid-troposphere (400 hPa), land use data from MapBiomas, temperature and precipitation data from the ERA5/ECMWF reanalysis and information on the number of fires from the MODIS/TERRA sensor. In addition to the study area, CH₄ concentration data from two global reference stations in Ascension Islands (ASC) and Barbados (RPB) were also analyzed. Data was acquired and processed using the Giovanni/NASA, Google Earth Engine, and R Studio computing environment. Long-term trends and typical seasonal variability of the variables considered were evaluated. Multilinear regression models were developed to predict CH₄ concentrations (response variable) as a function of surface meteorological variables, land use, and number of fires (regional predictors) and as a function of CH₄ concentration in global reference stations (global predictors). Analyses revealed an upward trend of 4.3 ± 0.3 ppb/year in the study area, significantly less than the long-term trends observed at global reference stations. Concentrations were higher during the dry season (Aug-Oct), possibly due to increased biogenic CH₄ emissions in the low water period and global factors. Statistically significant correlations were observed between CH₄ concentrations and maximum daily temperature (positive correlation) and precipitation (negative correlation) on a monthly and annual scale. During the study period, there was a reduction in forest cover from 84% to 79%, showing a significant anti-correlation with CH₄ concentrations in the mean troposphere. Strong correlations were observed between the CH₄ time series observed in the study area and the global station ASC. Linear regression models indicated that the concentration of CH₄ in ASC explained, respectively, on the monthly and annual scales 81% and 98% of the temporal variability of CH₄ over the study area. Including regional predictors improved the performance of the regression models, modulating the most extreme concentration values in the dry and rainy seasons. In conclusion, the study shows that global factors mainly influence the seasonal and long-term variability of CH₄ concentration in northeastern Amazonia. Furthermore, the observed differences in concentration and long-term trends between the study area and the global reference stations suggest that the Amazon may act as a CH₄ sink, mitigating the global increase in concentrations.

Keywords: Green House Gases, Amazonia, Methane, Land Use Change, Climate Change

1. Introdução

A Amazônia é a maior floresta tropical do planeta, e desempenha papel fundamental no sistema climático (Artaxo et al., 2022). A Amazônia tem sofrido pressões constantes relacionadas a mudanças no uso da terra, queimadas, urbanização e mudanças climáticas, as quais causam desequilíbrios no ecossistema, diminuindo a capacidade da floresta em remover gases de efeito estufa (GHG, do inglês, *Green House Gases*) da atmosfera e mitigar as causas do aquecimento global (Gatti et al., 2021; Nobre et al., 2016). Dentre os gases de efeito estufa, destaca-se o metano (CH₄), que apresenta um Potencial de Aquecimento Global (PAG) 28 vezes maior que o dióxido de carbono (CO₂), em uma escala de tempo de 100 anos (Jackson et al., 2020). Através da análise de testemunhos de gelo, foi possível constatar que as concentrações de CH₄ vêm aumentando desde o período pré-industrial, intensificando o efeito estufa e contribuindo com cerca de um quarto da forçante radiativa efetiva dos GEE (IPCC, 2021). Isso faz do CH₄ um gás estratégico em termos de redução de emissões de GEE.

O CH₄ é produzido majoritariamente pela decomposição anaeróbica de matéria orgânica, por meio da cooperação entre diferentes culturas microbianas (Khalil, 2000). Tais condições são tipicamente encontradas em áreas alagadas e em aterros sanitários. Em particular, emissões por áreas alagadas na região tropical constituem a maior fonte de incerteza para o balanço global, devido à escassez de observações *in-situ* e à típica variabilidade das emissões, relacionadas à complexidade da produção, transporte e consumo de CH₄ até chegar à atmosfera (Saunio et al., 2020; Rosentreter et al., 2021). O balanço global de CH₄ indica que as fontes superam os sumidouros, de modo que tem ocorrido um progressivo acúmulo deste gás na atmosfera (Jackson et al., 2020). As taxas de crescimento da concentração de CH₄ variam espacialmente em escala global, e se intensificaram entre 2007 e 2020 (Basso et al., 2021; Turner et al., 2019). Como possíveis causas para esse recente aumento, estudos apontam a intensificação das emissões de áreas alagadas em resposta a forçantes climáticas, o aumento das emissões antrópicas e a diminuição da capacidade oxidativa da atmosfera (Turner, Frankenberg e Kort, 2019).

No Brasil, a agropecuária é a maior fonte de CH₄, responsável por 72% das emissões em 2020 (SEEG, 2022). As mudanças no uso da terra contribuem para as emissões antrópicas de CH₄ através das queimadas e da conversão de áreas de floresta em áreas agrícolas, o que altera as relações entre organismos que participam

da ciclagem de CH₄, de modo que o solo passa a atuar como uma fonte emissora (Meyer et al., 2017) ao invés de sumidouro. Estudos recentes indicam que a Amazônia contribui com cerca de 8% da emissão global de CH₄, sendo que 73% das emissões provêm de áreas alagadas, 17% de queimadas, e 10% de outras fontes antrópicas associadas principalmente à fermentação entérica em ruminantes (Basso et al., 2021). Estimativas baseadas em dados de satélite e modelos de inversão apontaram um aumento das emissões de CH₄ na Amazônia entre 2010 e 2018 (Tunncliffe et al., 2020; Wilson et al., 2021), especialmente na parte leste da Amazônia. Saito et al. (2016) apontaram um aumento na coluna atmosférica de CH₄ no ano seco de 2010 na Amazônia, associando ao aumento das emissões de queimadas. Tunncliffe et al. (2020) mostraram um aumento nas emissões de CH₄ por áreas alagadas na Amazônia durante o evento de El Niño de 2015-2016, possivelmente associado com o aumento da temperatura na superfície.

A sazonalidade das emissões e das concentrações de CH₄ na Amazônia está associada aos padrões de chuva, temperatura, volume de água líquida e queimadas na região (SPA, 2021). Dados de satélite mostram concentrações de CH₄ tipicamente maiores na estação seca, entre julho e outubro (Ribeiro et al., 2016). Observações *in-situ* na Amazônia central mostram uma sazonalidade semelhante (Andreae et al., 2015). Este comportamento é explicado pelo aumento das emissões de queimadas nessa estação do ano e pela diminuição do nível das águas superficiais que favorecem o escape do CH₄ acumulado em sedimentos e nas águas subterrâneas (Ribeiro et al., 2016, 2018). Entretanto, há diferenças entre a variabilidade sazonal das concentrações e das emissões de CH₄ nas diferentes regiões da floresta. Estimativas de fluxos de emissão de CH₄ por áreas alagadas apresentam um pico na estação chuvosa que muitas vezes supera o pico da estação seca, dominado pelas emissões de queimadas (Basso et al., 2021; Tunncliffe et al., 2020; Wilson et al., 2021). As razões para esse descompasso entre o comportamento sazonal da concentração e das emissões de CH₄ ainda não são inteiramente compreendidas.

Basso et al. (2021) mostraram uma importante variabilidade regional nas emissões de CH₄ na Amazônia, com um fluxo de cerca de 2 a 3 vezes maior na região de Santarém (nordeste da Amazônia) em comparação com outras regiões. Anomalias positivas de concentração de CH₄ na média troposfera também foram reportadas no nordeste da Amazônia (Ribeiro et al., 2016). Esta região, assim como a região sul da floresta, apresenta uma forte variação sazonal de temperatura e precipitação (Marengo et al., 2018; um e Jones, 2022), além de ser impactada por emissões de queimadas e pelo avanço da fronteira agrícola. Ainda assim, esses elementos não explicam a diferença entre as emissões de CH₄ na região nordeste (Santarém) e na região sul (Alta Floresta), e mais investigações são necessárias.

Existe, portanto, uma relação complexa entre as concentrações de CH₄ e diferentes fatores ambientais e antrópicos que controlam sua emissão para a atmosfera na Amazônia. Para uma melhor compreensão da dinâmica do CH₄ na Amazônia é fundamental caracterizar sua variabilidade temporal em diferentes regiões, procurando avaliar a importância relativa de processos e de forçantes ambientais e antrópicas.

Diante disso, este estudo tem como principais objetivos: i) caracterizar a evolução temporal das concentrações de CH₄ sobre uma área no nordeste da Amazônia que tem passado por intensas transformações no uso da terra ao longo das últimas décadas; ii) investigar associações entre a concentração de CH₄ e diferentes variáveis ambientais, como precipitação, temperatura e número de focos de queimada; e iii) investigar a contribuição relativa de forçantes regionais e globais para a concentração de CH₄ na área de estudo.

2. Materiais e Métodos

2.1. Área de estudo

A área de estudo, apresentada na Figura 1, está localizada no nordeste da Amazônia Legal, inserida no estado do Pará entre as coordenadas geográficas 2,0° e 5,0° Sul e 55,0° e 51,0° Oeste. Nas últimas décadas, a região nordeste da Amazônia sofreu pressões relacionadas com expansão agropecuária, construção de estradas, investimentos em infraestrutura, projetos de usinas hidrelétricas e atividades mineradoras (Silva et al, 2020).

Assim, a região passou por diversas modificações de uso do solo que contribuíram para o avanço do desmatamento e queimadas, alterando a cobertura original da terra e tornando-se um local propício a emissões de gases do efeito estufa, como o metano (SPA, 2021). No Pará, a modificação da terra da região em questão foi provocada principalmente pela implementação da Rodovia Transamazônica (BR-230) e da Usina Hidrelétrica de Belo Monte. A construção da Transamazônica contribuiu para o avanço da fronteira agrícola na década de 1970, mediante a migração da população ao interior do país para trabalhar neste setor (Moran, 2016). Na década de 2010, a construção de Belo Monte contribuiu para a aceleração dos efeitos regionais das mudanças climáticas, inundação de terras agrícolas e de áreas florestais, desequilíbrio nos ecossistemas terrestres e aquáticos (Silva et al, 2020).

Figura 1- Mapa da localização da área de estudo, apresentando municípios, usinas hidrelétricas, rodovias e corpos d'água.



A área de estudo representada na Figura 1 é o foco desta pesquisa. Entretanto, também foram adquiridos dados de concentração de CH₄ do AIRS/Aqua sobre duas estações de referência mantidas pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, EUA) nas Ilhas Ascensão (7.9° S, 14.4° W) e Barbados (13.2° N, 59.4° W). Essas estações estão situadas respectivamente no Atlântico Central e no Atlântico Sul, distantes de perturbações antrópicas, de modo que são representativas da concentração de fundo (*background*) de gases de efeito estufa no planeta. Estudos anteriores mostraram que as massas de ar que adentram a região da Amazônia a partir do Oceano Atlântico passam nas proximidades dessas estações de referência (Gatti et al., 2020).

2.2. Fonte e processamento dos dados ambientais

As análises desenvolvidas neste estudo foram feitas com dados contínuos obtidos entre os anos de 2003 e 2019. As análises estatísticas e visualizações gráficas de séries temporais foram realizadas utilizando o *software* R (<https://www.r-project.org/>), um ambiente computacional livre que fornece uma ampla variedade de técnicas estatísticas e gráficas. Operações com dados georreferenciados foram realizadas utilizando a plataforma do *Google Earth Engine* (GEE) que combina um catálogo de imagens de satélite e conjuntos de dados geoespaciais com recursos de análise em escala planetária, utilizando códigos de programação elaborados em linguagem *JavaScript*.

A Tabela 1 relaciona os dados utilizados neste trabalho, indicando as respectivas fontes e descrição do processamento. Foram utilizados dados diurnos de razão de mistura do CH₄, monitorado via satélite pelo sensor AIRS (*Atmospheric Infrared Sounder*) a bordo do satélite AQUA, lançado em setembro de 2002. A órbita do satélite tem período de 98,8 minutos, cruzando a linha do Equador às 1:30 e às 13:30, hora local (Xiong et al., 2008). Foram utilizados dados do produto AIRS3STD v7.0, que fornece estimativas da razão de mistura de CH₄ em 24 níveis da atmosfera em uma grade de 1°x1°, em escala temporal diária. Os dados foram adquiridos utilizando a plataforma Giovanni (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>, acessado em 20 de maio de 2022), considerando a média diária dos pixels sobre a área de estudo. Foram utilizados dados do nível 400 hPa, na média troposfera, região onde os algoritmos de inversão de radiancias para concentrações apresentam maior acurácia (Xiong et al., 2008; Ribeiro et al., 2016). Como ocorre uma intensa atividade convectiva na Amazônia, é possível associar os processos em superfície com a concentração de poluentes na média troposfera. Estudos de validação e de intercomparação indicam que o sensor AIRS captura satisfatoriamente as variações espaciais e temporais de CH₄ na média troposfera, com um viés <1.5% quando comparado com medidas em perfil vertical a bordo de aviões e com outros sensores orbitais (Xiong et al., 2008; Zou et al., 2016; Ribeiro et al., 2018). A escolha pelo sensor AIRS foi motivada principalmente pelo fato de ser o sensor mais antigo em operação, sendo o mais adequado para avaliar tendências de longo prazo.

Com o intuito associar as concentrações de CH₄ analisadas com variáveis ambientais, foram utilizados dados da reanálise ERA5, do Centro Europeu de Previsão do Tempo (ECMWF). Foram utilizados dados diários de temperatura (média, máxima e mínima) na superfície (2 m) e acumulados diários de precipitação, com resolução espacial de 0.25° (Hersbach et al., 2018). Estes dados foram adquiridos e processados utilizando a plataforma do GEE. Foram calculadas médias dessas variáveis sobre a área de estudo. Foram utilizados dados de uso da terra da 6ª Coleção do Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil da rede MapBiomas. Trata-se de uma rede colaborativa, formada por ONGs, universidades e startups de tecnologia, que tem como propósito revelar as transformações do território brasileiro, produzindo mapas com resolução espacial de 30 m e resolução temporal anual (MAPBIOMAS, 2019). Dentre as 34 categorias de uso da terra, optou-se por analisar a variabilidade temporal das classes mais abundantes na área de estudo: formação florestal, pastagem e corpos d'água. A extração das séries temporais anuais foi utilizando a plataforma GEE, a partir de um código em JavaScript que calcula a soma das áreas correspondentes a cada categoria de uso da terra na área de estudo, determinando as respectivas porcentagens.

A fim de investigar associações com emissões de queimadas, foram utilizados dados do sensor MODIS a bordo do satélite Terra, que fornece dados diários de máscaras de incêndio com resolução de 1 km. O produto MOD14A1 V6.1 distingue entre pixels com fogo, sem fogo e sem observação disponível. Utilizando a plataforma GEE, foi calculada a série temporal diária e anual do número de focos de queimada na área de estudo.

Tabela 1: Dados de sensoriamento remoto e de reanálise utilizados neste estudo.

Nome	Propriedade medida	Variáveis	Produto	Aquisição e Processamento
AIRS	Razão de mistura de CH ₄ na média troposfera (400 hPa) sobre a área de estudo (CH ₄ PA), sobre a Ilha de Ascensão (CH ₄ ASC) e sobre a Ilha de Barbados (CH ₄ RPB). Resolução espacial de 1°. Resolução temporal diária.	CH ₄ PA CH ₄ ASC CH ₄ RPB	AIRS3STD	Aquisição via plataforma Giovanni. Médias diárias e anuais na área de estudo.
ERA5	Temperatura média, mínima e máxima na superfície (2m), precipitação total. Resolução espacial de 0.25°. Resolução temporal diária	Tavg Tmin Tmax Precip	ERA5 Daily Aggregates	Aquisição via GEE. Médias diárias e anuais na área de estudo.
MapBiomass	Mapas de cobertura e uso da terra. Resolução espacial de 30 m. Resolução temporal anual.	Floresta Pastagem Água	6a Coleção do MapBiomass	Aquisição via GEE. Soma anual das áreas das categorias 1.1 (formação florestal), 3.1 (pastagem) e 5.1 (corpo d'água).
MODIS	Focos de queimada. Resolução espacial de 1 km. Resolução temporal diária.	Focos	MOD14A1 V6.1	Aquisição via GEE. Soma diária do número de pixels com poder radiativo de fogo positivo.

2.3. Análise multivariada e de variabilidade temporal

Para avaliar tendências de longo prazo e padrões de variabilidade sazonal, os dados diários foram reduzidos para as escalas mensal e anual utilizando médias, exceto para a precipitação, que foi integrada. O processamento e a análise estatística das séries temporais foram realizados utilizando o software R de computação científica. Dentre as variáveis utilizadas, houve presença de dados faltantes apenas nas concentrações de CH₄ monitoradas pelo sensor AIRS. Falhas na cobertura de dados do AIRS são tipicamente causadas pela interferência de nuvens, impedindo que o cálculo das concentrações a partir de radiancias atinja um grau de qualidade satisfatório para a publicação do dado (Xiong et al., 2008). A cobertura de dados diários de concentração de CH₄ no período de estudo foi de 72%, 54% e 52%, respectivamente sobre a área de estudo, Ilha de Barbados e Ilha de Ascensão. Os dados faltantes estão bem distribuídos no período de estudo, de modo que o conjunto de dados representa satisfatoriamente as concentrações de CH₄ em todos os anos considerados. No caso das médias mensais, foi adotado o seguinte critério: foram mantidas as médias de CH₄ apenas para os meses que apresentaram cobertura de dados superior a 40%. A adoção desse critério resultou na exclusão de 6 meses não consecutivos de dados, dentre os 204 meses do período de estudo.

Para a avaliação de tendências de longo prazo, foram ajustadas funções lineares aos dados anuais. O teste de Mann-Kendall foi aplicado para verificar se as tendências obtidas eram estatisticamente significativas. A hipótese nula do teste de Mann-Kendall é a ausência de uma tendência monotônica, de modo que rejeitamos a hipótese nula quando $p < 0.05$, adotando o nível de significância de 95%.

Relações entre variáveis nas escalas temporais mensal e anual foram investigadas utilizando matrizes de correlação Pearson, que representam graficamente as correlações entre pares de variáveis. Trata-se de uma matriz simétrica em que cada célula contém o coeficiente de correlação Pearson entre duas variáveis. Apenas as correlações estatisticamente significativas ($p < 0.05$) foram apresentadas neste trabalho. Além de permitir investigar a relação entre variáveis, as matrizes de correlação também foram utilizadas para identificar

colinearidades e para selecionar as variáveis que apresentam maior associação com as concentrações de CH₄ sobre a área de estudo.

Foram construídos dois modelos de regressão multivariados para prever as concentrações de CH₄ na área de estudo em função de variáveis ambientais. Um dos modelos foi construído considerando os dados anuais (17 pontos, entre 2003 e 2019), incluindo dados de uso da terra e do número de dias sem chuva. O outro modelo foi construído considerando os dados mensais (198 pontos, entre 2003 e 2019). Ambos os modelos foram construídos com base na equação de regressão abaixo:

$$y(x_1, x_2, \dots, x_n) = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n = a_0 + \sum_{i=1}^n a_ix_i \quad (1)$$

Nessa equação, a variável resposta (y) é a concentração de CH₄ na área de estudo. As variáveis preditoras (x_1, x_2, \dots, x_n) correspondem às variáveis ambientais e às concentrações de CH₄ nas estações de referência global nas Ilhas de Barbados e Ascensão. E os coeficientes $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ foram ajustados utilizando o método dos mínimos quadrados. Foi adotado um nível de significância de 95%, de modo que os coeficientes que obtiveram p-valor < 0.05 foram considerados significativos. A importância relativa de cada preditor foi avaliada considerando o coeficiente ajustado e a variabilidade típica de cada preditor, representada pelo desvio-padrão das observações na escala de tempo considerada (mensal ou anual). Também foi avaliada a importância relativa de preditores locais (variáveis meteorológicas, focos de queimada e uso da terra) e de preditores globais (concentração de CH₄ em estações de referência global), construindo modelos de regressão com diferentes classes de preditores.

Para a construção dos modelos de regressão multilinear, foi preciso selecionar as variáveis que apresentaram maior associação sobre as concentrações de CH₄ e que não fossem colineares entre si. Para isso, foi utilizado um procedimento de seleção de preditores em etapas (*stepwise*). A função *step* do ambiente computacional R foi utilizada para selecionar um subconjunto otimizado de variáveis preditoras, eliminando variáveis sucessivamente e avaliando métricas de qualidade dos modelos de regressão resultantes. A métrica de qualidade adotada foi o Critério de Informação Akaike (AIC), tipicamente utilizado para selecionar o melhor modelo dentre várias opções de configuração. O AIC considera tanto a qualidade do ajuste aos dados observacionais (verossimilhança) quanto a complexidade do modelo (número de preditores).

O AIC busca encontrar um equilíbrio entre a qualidade do ajuste aos dados e a simplicidade do modelo, favorecendo modelos mais simples com menor valor de AIC (EMILIANO, 2009). Desta forma, diversos conjuntos de preditores foram testados nos modelos de regressão, buscando eliminar colinearidades entre variáveis, mantendo apenas os preditores estatisticamente significativos e escolhendo o modelo com menor valor de AIC.

3. Resultados e Discussão

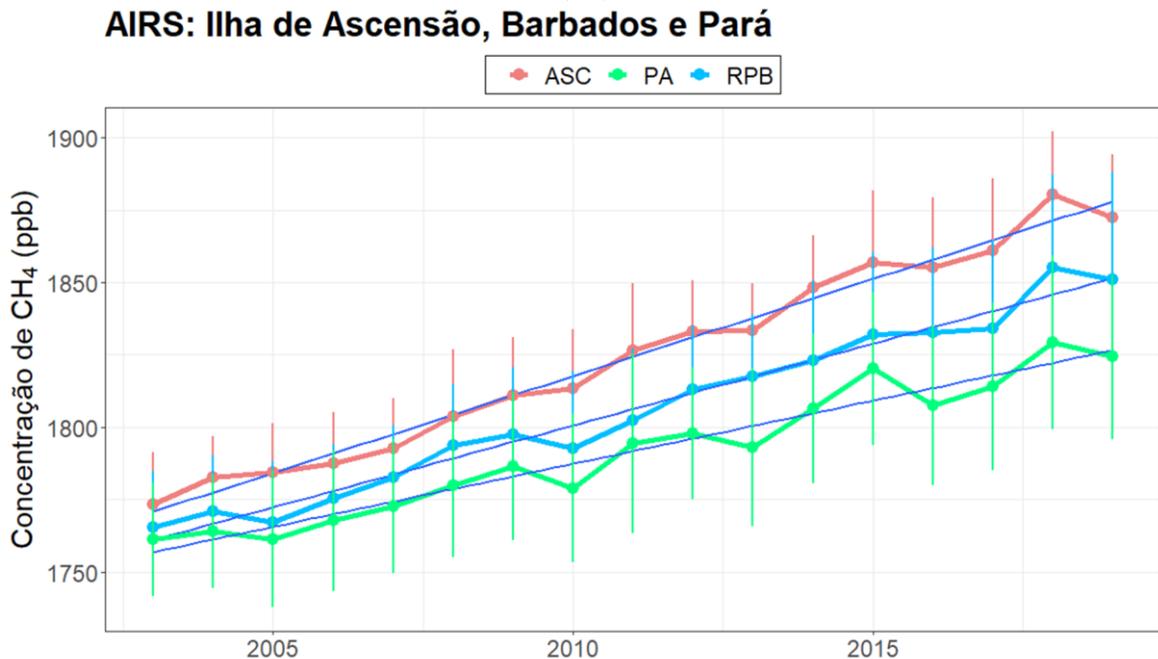
3.1. Tendências de longo prazo nas concentrações de CH₄ e em variáveis ambientais relacionadas

As médias anuais das concentrações de CH₄ sobre a área de estudo variaram entre 1761 e 1829 ppb durante os anos de estudo, apresentando uma variabilidade sazonal bem definida e tendências de longo prazo estatisticamente significativas. A Figura 2 apresenta as tendências de longo prazo de CH₄ sobre a área de estudo e sobre as estações de referência global nas Ilhas de Barbados e Ascensão. Entre os anos de 2003 e 2019, as concentrações de CH₄ na área de estudo aumentaram $4,3 \pm 0,3$ ppb por ano (Tabela 2). Esse aumento pode ser consequência de mudanças nos padrões de emissão e remoção de CH₄ na área de estudo, mas não se pode descartar a influência do aumento global das concentrações de CH₄. Analisando separadamente as estações seca (jul-set) e chuvosa (fev-abr), a tendência de aumento foi significativamente maior na estação seca ($4,9 \pm 0,3$ ppb/ano) em comparação com a estação chuvosa ($3,8 \pm 0,3$ ppb/ano).

Para avaliar a influência do aumento global das concentrações de CH₄ em escala global, foram

utilizados dados sobre as estações de referência global nas Ilhas de Barbados (RBP) e Ascensão (ASC), localizadas no Atlântico tropical. Segundo Miller et al. (2007) e Domingues et al. (2020), o ar que entra na bacia amazônica é dominado pelos ventos alísios de leste do Oceano Atlântico, que apresenta contribuições relativas dos Hemisférios Norte e Sul, cuja proporção varia sazonalmente em função da posição da zona de convergência intertropical (ITCZ). A estação chuvosa na Amazônia possui maior contribuição de massas de ar do Hemisfério Norte geográfico, cujas concentrações de fundo de CH₄ podem ser representadas pelas concentrações observadas sobre a Ilha de Barbados. Durante a estação seca, as massas de ar que atingem a Amazônia são oriundas predominantemente do Atlântico tropical no Hemisfério Sul, onde a Ilha de Ascensão está situada. Desta forma, a diferença entre as concentrações de CH₄ na área de estudo e nas estações de referência global no Atlântico tropical permitem avaliar a contribuição global das concentrações observadas na Amazônia.

Figura 2 - Comparação da média anual da concentração de CH₄ em Ascensão (ASC), Barbados (RBP) e no Pará (PA).



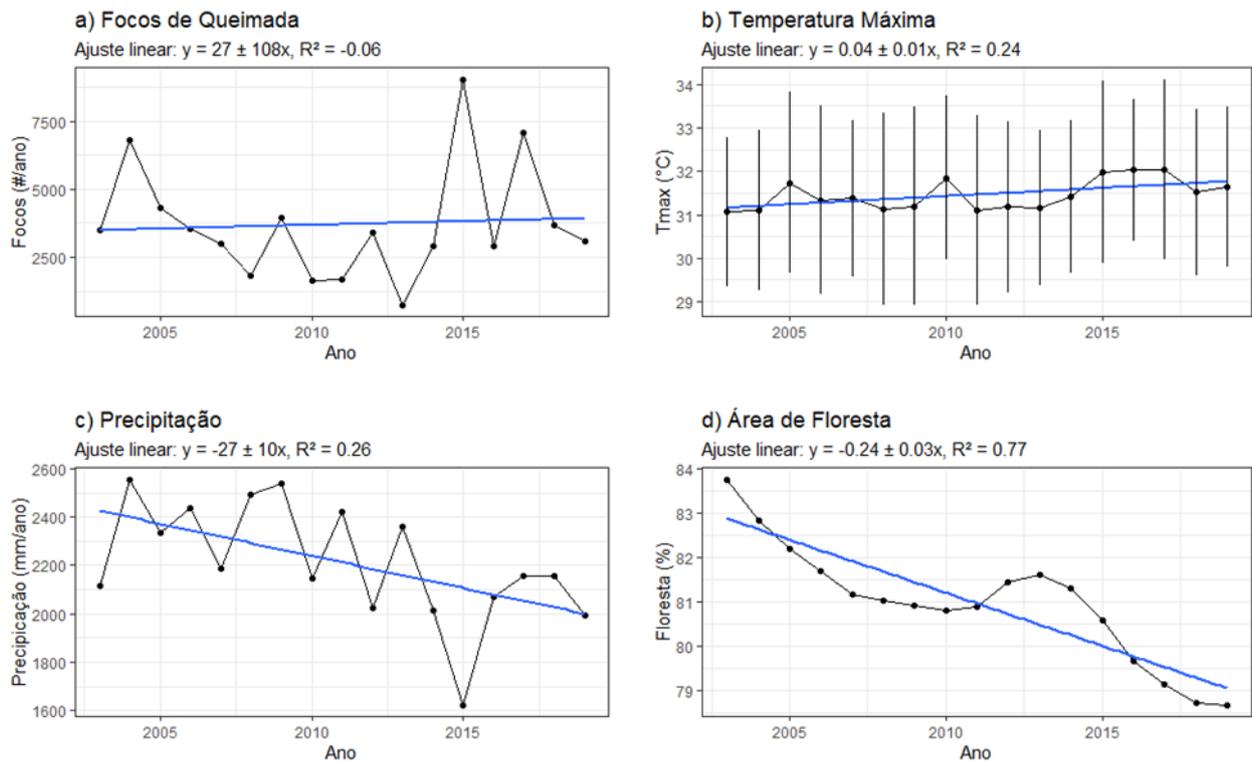
Os resultados mostraram que uma tendência de aumento de $6,7 \pm 0,2$ e $5,6 \pm 0,2$ ppb/ano nas concentrações de CH₄ na alta troposfera sobre Ascensão e Barbados, respectivamente. Na área de estudo, a tendência de aumento foi significativamente menor. Este resultado sugere que a Amazônia pode atuar como um sumidouro de CH₄, atenuando o crescimento global das concentrações. Segundo Matti Barthel et al. (2022), florestas tropicais apresentam altas taxas de absorção de CH₄ por difusão nos solos, facilitada pela textura grosseira dos solos intemperizados das florestas tropicais de várzea.

É importante também considerar a possível influência do transporte de longa distância de poluentes oriundos de emissões de queimadas na África. Holanda et al. (2023) verificaram que massas de ar oriundas da África são responsáveis por uma fração significativa dos fluxos de monóxido de carbono (CO) que entram na Bacia Amazônica. O transporte de emissões de queimadas sobre o Atlântico ocorre tipicamente entre os níveis de 600 a 400 hPa e é sazonalmente recorrente, passando sobre a região das Ilhas Ascensão. Dentre as possíveis fontes emissoras de CH₄ na África que poderiam influenciar as observações no Atlântico e na Amazônia, pode-

se destacar as queimadas na floresta tropical do Congo (Matti Barthel et al., 2022). Desta forma, o fato das concentrações de CH₄ serem menores na área de estudo em comparação com ASC reforçam a possibilidade da região Amazônica atuar como um sumidouro de CH₄, removendo parte do gás que adentra o continente.

No caso das variáveis meteorológicas, as médias anuais de temperatura máxima anual variaram entre 31 e 32°C, com uma tendência de aumento estatisticamente significativa de $0,04 \pm 0,01$ °C por ano (Figura 3a). Tendências similares também foram observadas por Gatti et al. (2021) na região de Santarém. Essa tendência de aquecimento pode estar relacionada a três fatores: as mudanças climáticas, o desmatamento e a degradação florestal. Já o acumulado anual de precipitação variou entre 2556 e 1622 mm, mas não apresentou uma tendência estatisticamente significativa (Figura 3b).

Figura 3 - Tendências de longo prazo dos focos de queimada (a), variáveis meteorológicas (b e c) e da área de floresta (d). As barras representam o desvio-padrão.



Em relação às mudanças no uso da terra, foi observado que, enquanto a área de pastagem passou por um aumento de $0,20 \pm 0,03\%$ ao longo dos anos, a formação florestal apresentou uma tendência de diminuição de $-0,24 \pm 0,03\%$ por ano (Figura 3c), ambas estatisticamente significativas (Tabela 2).

Tabela 2: Tendências de longo prazo para as diferentes variáveis e respectivas incertezas, considerando médias anuais entre 2003 e 2019. As tendências estatisticamente significativas ($p < 0.05$) foram destacadas em negrito. Também são apresentados os coeficientes R^2 das tendências lineares e o valor de p obtido pelo teste de Mann-Kendall.

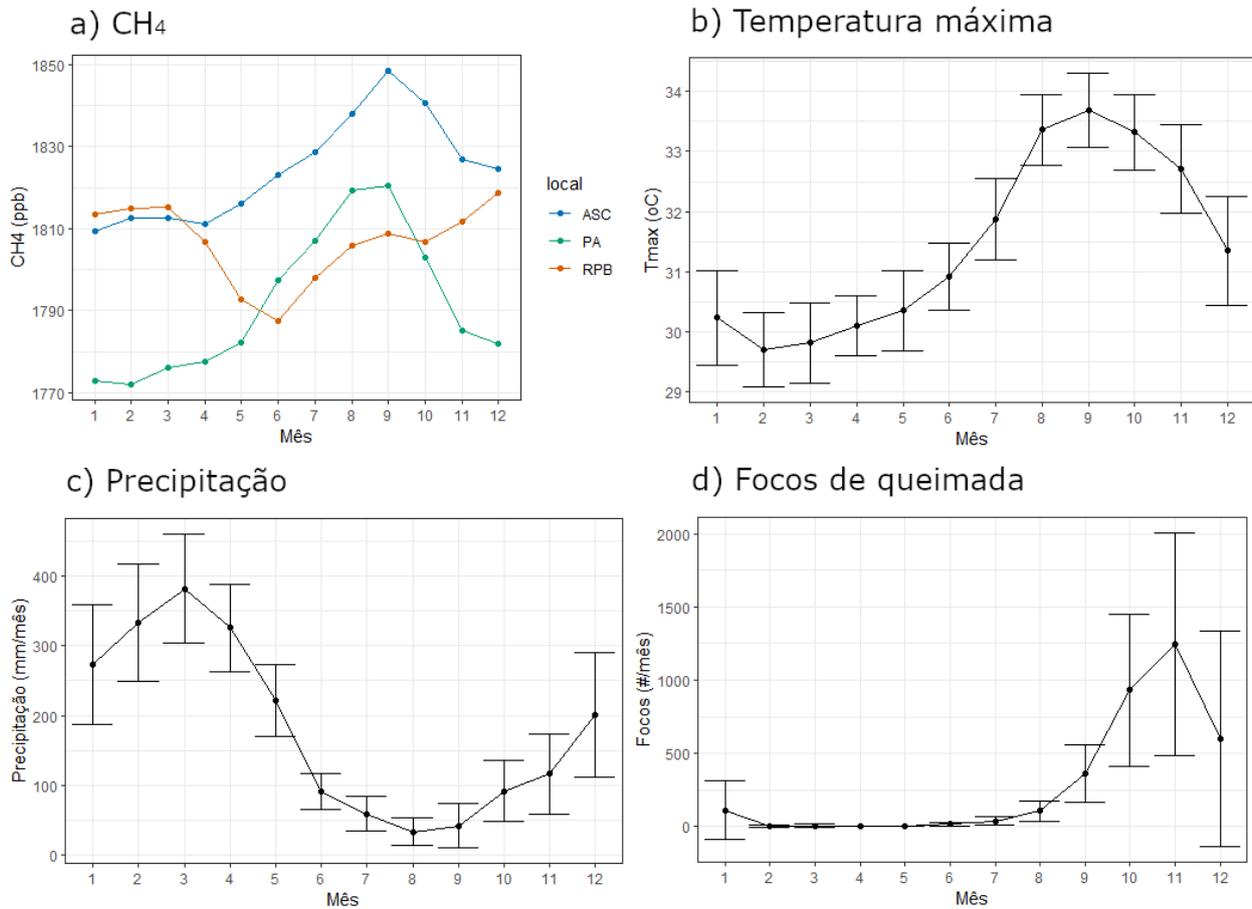
Variável	Tendência	R^2	p
CH ₄ (ppb/ano)	4,4 ± 0,3	0,94	9,5 x 10 ⁻⁷
CH ₄ ASC (ppb/ano)	6,7 ± 0,2	0,98	1,2 x 10 ⁻⁷
CH ₄ RPB (ppb/ano)	5,6 ± 0,2	0,97	1,2 x 10 ⁻⁷
Tmax (°C/ano)	0,040 ± 0,015	0,24	9,5 x 10 ⁻³
Precip (mm/ano)	-27 ± 10	0,26	1,3 x 10 ⁻¹
Focos (#/ano)	27 ± 108	-0,06	1,0 x 10 ⁰
Floresta (% de área/ano)	-0,24 ± 0,03	0,77	3,2 x 10 ⁻⁵
Pastagem (% de área/ano)	0,20 ± 0,03	0,73	4,5 x 10 ⁻⁵
Água (% de área/ano)	0,010 ± 0,004	0,24	2,0 x 10 ⁻¹

Este resultado corrobora o que tem sido observado em outras partes da Amazônia, de conversão de áreas de floresta em pastagem (Morais et al., 2022). Quanto aos rios, lagos e oceanos, não foi observada uma tendência estatisticamente significativa, apesar da construção da Usina Hidrelétrica de Belo Monte, iniciada no ano de 2011. Assim, em termos de área, as principais transformações do solo foram relacionadas à conversão de floresta em regiões de pastagem. O número de focos de queimada na área de estudo (Figura 3d) variou entre o mínimo de 742 e o máximo de 9038 focos/ano, sem uma tendência de longo prazo estatisticamente significativa.

3.2. Variabilidade sazonal das concentrações de CH₄ e de variáveis ambientais relacionadas

A Figura 4 mostra a variabilidade sazonal de variáveis selecionadas, considerando as médias mensais durante o período de estudo. As concentrações de CH₄ apresentaram um claro padrão sazonal na área de estudo, com maiores concentrações durante a estação seca (agosto-setembro), quando diminuem as taxas de precipitação e ocorrem temperaturas mais elevadas. Esse padrão sazonal com maiores concentrações deste gás na estação seca já foi observado em outras partes da Amazônia, tanto em observações locais quanto por sensoriamento remoto (Ribeiro et al., 2016; Botia et al., 2020). Nota-se também que a sazonalidade de CH₄ na área de estudo (PA) é muito similar à observada sobre ASC e está em oposição de fase em relação às observações em RPB, situada no Hemisfério Norte (Figura 4a).

Figura 4 - Variabilidade sazonal das concentrações de CH₄ na área de estudo (PA) e nas estações de referência global (ASC e RPB) (a), temperatura máxima (b), precipitação (c) e focos de queimada (d). As barras representam o desvio-padrão dos dados mensais entre 2003 e 2019.



A concentração de um poluente atmosférico é resultado do balanço entre fontes e sumidouros. No caso do CH₄, um dos principais sumidouros na troposfera é a reação com o radical OH (Jackson et al., 2020), cuja produção fotoquímica é tipicamente favorecida no verão. Isso pode explicar em parte a diferença na variação sazonal das concentrações de CH₄ em ASC e na Amazônia (pico em agosto-setembro) em relação a RPB (pico em fevereiro-março). A sazonalidade das fontes emissoras também é determinante para as concentrações de CH₄. Observações *in-situ* a bordo de aeronaves mostraram picos de emissão biogênica deste gás em dois períodos do ano: entre janeiro e março (estação chuvosa) e entre agosto e dezembro (estação seca) na região de Santarém, no Pará (Basso et al., 2015). Observações diretas de emissão de CH₄ em rios e áreas alagadas na Amazônia mostram emissões significativamente maiores na estação de águas baixas (Sawakuchi et al., 2014), que ocorre entre setembro e outubro na região de Santarém (Fassoni-Andrade et al., 2021). As queimadas também constituem uma fonte de CH₄ na Amazônia, apesar de apresentarem uma contribuição relativamente pequena para as emissões totais durante a estação seca, de cerca de 15% (Basso et al., 2015, 2021; Beck et al., 2012). Desta forma, o pico das concentrações de CH₄ na estação seca é resultado do balanço entre fontes e sumidouros regionais e globais.

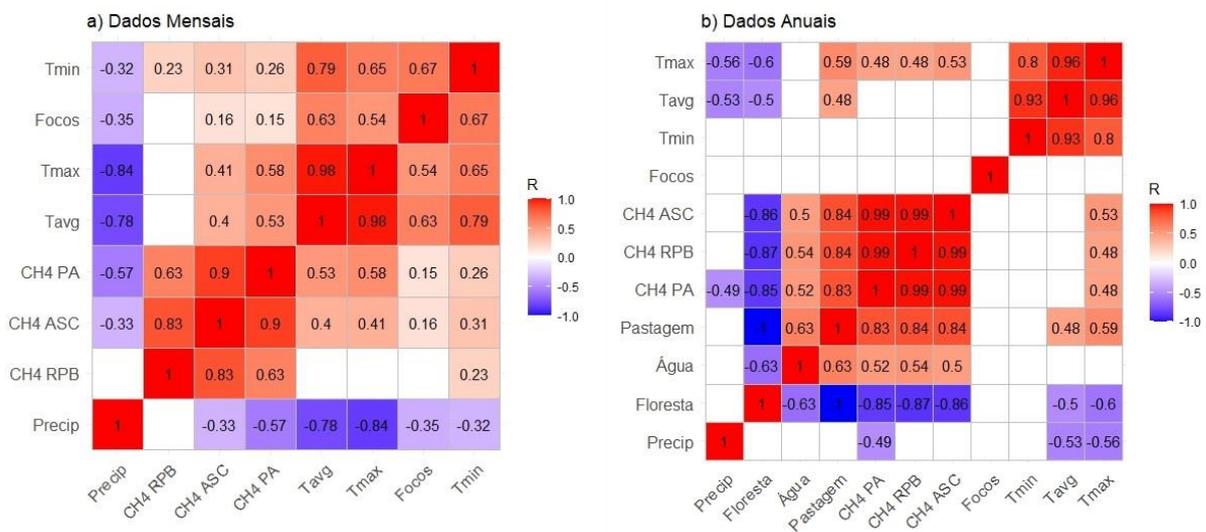
A temperatura máxima e a precipitação apresentaram uma variabilidade sazonal típica para a região, com picos respectivamente em setembro e em março (Basso et al., 2015). Os ciclos sazonais de temperatura e precipitação compõem as forçantes climáticas que governam as cheias dos corpos d'água e a dinâmica do fogo na região, influenciando as emissões de CH₄. O número de focos de queimada apresentou uma defasagem de

2 meses em relação ao mínimo de precipitação, com pico de cerca de 1250 focos no mês de novembro, em média.

3.3. Análise de correlação e de regressão multilinear

As análises de regressão foram realizadas com base em dois conjuntos de dados: um conjunto de dados mensais, incluindo concentrações de CH₄, variáveis meteorológicas e número de focos de queimadas, e um conjunto de dados anuais, incluindo também dados de uso da terra, que estão disponíveis apenas em escala anual. A Figura 5 apresenta as matrizes de correlação entre as variáveis contidas nesses dois conjuntos de dados.

Figura 5 - Matriz de correlação entre variáveis em escala temporal mensal (a) e anual (b). As siglas das variáveis foram definidas na Tabela 1. Cores quentes indicam correlação positiva ($R > 0$) e significativa ($p < 0.05$), enquanto cores frias indicam correlação negativa ($R < 0$) e significativa ($p < 0.05$). Células em branco indicam ausência de correlação significativa.



Observa-se uma forte correlação positiva entre as séries temporais de CH₄ observadas na área de estudo e nas estações de referência global, ASC e RPB. A correlação com Barbados é menos intensa no caso dos dados mensais, já que há uma diferença de fase nas sazonalidades da concentração de CH₄ entre os hemisférios norte e sul (Figura 4a).

Em ambos os conjuntos de dados (mensais e anuais), a concentração de CH₄ na área de estudo apresentou uma correlação positiva com a temperatura máxima diária e uma correlação negativa com a precipitação (Figura 5). Em escala mensal, o sinal das correlações é coerente com a variabilidade sazonal observada para essas variáveis (Figura 4). O pico da estação seca na área de estudo corresponde ao período de águas baixas (Fassoni-Andrade et al., 2021), quando as emissões de CH₄ por áreas alagadas se intensificam (Sawakuchi et al., 2014). Em termos de variabilidade interanual, as correlações observadas entre CH₄, temperatura e precipitação sugerem que anos mais quentes e secos estão associados a maiores concentrações de CH₄. Na literatura não há consenso sobre essa questão. Com base em dados de satélite, Ribeiro et al. (2016) mostraram anomalias negativas de concentração de CH₄ na média troposfera sobre o norte da Amazônia em

anos de El Niño, quando predominam condições quentes e secas. Por outro lado, observações *in-situ* a bordo de aviões não identificaram uma relação consistente entre condições meteorológicas e a variabilidade interanual das emissões de CH₄ na Amazônia (Basso et al., 2021; Wilson et al., 2016, Tunnicliffe et al., 2020).

Observou-se uma correlação fraca entre o número de focos de queimadas e a concentração de CH₄ na área de estudo, apenas nos dados mensais. A fraca correlação pode ser explicada pela defasagem entre o pico do número de focos de queimada (novembro) e o pico das concentrações de CH₄ sobre a área de estudo (setembro). Esse resultado sugere que as emissões de queimadas na área de estudo não possuem uma relação imediata com as concentrações de CH₄ na alta troposfera. Porém, não se pode descartar uma possível influência de emissões de queimada em escala regional. Vale ressaltar que no estado do Pará como um todo, o número de focos de queimada atinge seu valor máximo tipicamente em agosto, diferindo da climatologia dos focos de queimada na área de estudo. Estudos anteriores combinando observações *in-situ* e modelos de transporte atmosféricos indicam que a contribuição das emissões de queimadas para os fluxos de CH₄ no norte da Amazônia é relativamente pequena, da ordem de 15% do fluxo total (Basso et al., 2021; Beck et al., 2012).

Em relação aos dados anuais de uso da terra (Figura 5b), nota-se que a concentração de CH₄ apresenta uma correlação negativa com a porcentagem de área de floresta, que por sua vez é perfeitamente anti-correlacionada com a porcentagem de área de pastagem. Esse resultado sugere que o aumento da área de pastagem nas últimas décadas pode favorecer um aumento na concentração de CH₄. Esta hipótese é coerente com Meyer et al. (2017), que mostraram que a conversão de áreas de floresta em pastagem modifica as relações entre os microrganismos que participam da ciclagem de CH₄, de modo que o solo tipicamente passa a atuar como fonte emissora ao invés de sumidouro. Também foi observada uma correlação positiva entre CH₄ e a porcentagem de área ocupada por corpos d'água. Entretanto, a série temporal anual de CH₄ na alta troposfera não mostrou uma relação clara com a construção da represa de Belo Monte, que teve início em 2011.

Diversos conjuntos de preditores foram testados durante a construção dos modelos de regressão multilinear, tendo como variável alvo a série temporal de concentração de CH₄ sobre a área de estudo. Na Figura 6 foram comparadas as concentrações observadas em escala temporal mensal com as concentrações previstas por três modelos distintos: a) modelo considerando apenas preditores regionais (Tmax, Focos, Precip); b) modelo considerando apenas um preditor global (CH₄ ASC); c) modelo completo, incluindo os preditores regionais e o preditor global. Observa-se que o modelo que considera apenas preditores regionais não reproduz a tendência de longo prazo observada nas concentrações de CH₄, reproduzindo corretamente apenas a sua sazonalidade.

Por outro lado, o modelo baseado apenas nas concentrações de CH₄ na estação de referência global (Ilhas Ascensão) reproduz satisfatoriamente a tendência de longo prazo, mas falha na predição dos valores extremos de concentração de CH₄, observados durante os picos das estações seca e chuvosa. Esse modelo obteve um coeficiente R² de 0,81 (Tabela 3), indicando que a variabilidade das concentrações de CH₄ sobre a área de estudo é dominada por fatores globais. Combinando fatores globais com preditores regionais, o modelo completo atinge um R² de 0,90 e o menor valor de erro quadrático médio dentre os modelos avaliados, reproduzindo de maneira satisfatória tanto a tendência de longo prazo quanto as variações sazonais (Figura 6c).

Figura 6 - Modelos de regressão tendo como variável alvo a série temporal mensal de concentração de CH₄ observada sobre a área de estudo considerando diferentes preditores: a) apenas preditores regionais: temperatura máxima, precipitação, número de focos de queimada; b) apenas um preditor global: série temporal mensal de concentração de CH₄ sobre a estação de referência global nas Ilhas Ascensão; c) modelo completo, incluindo preditores regionais e globais. O resíduo de cada modelo é apresentado na figura d).

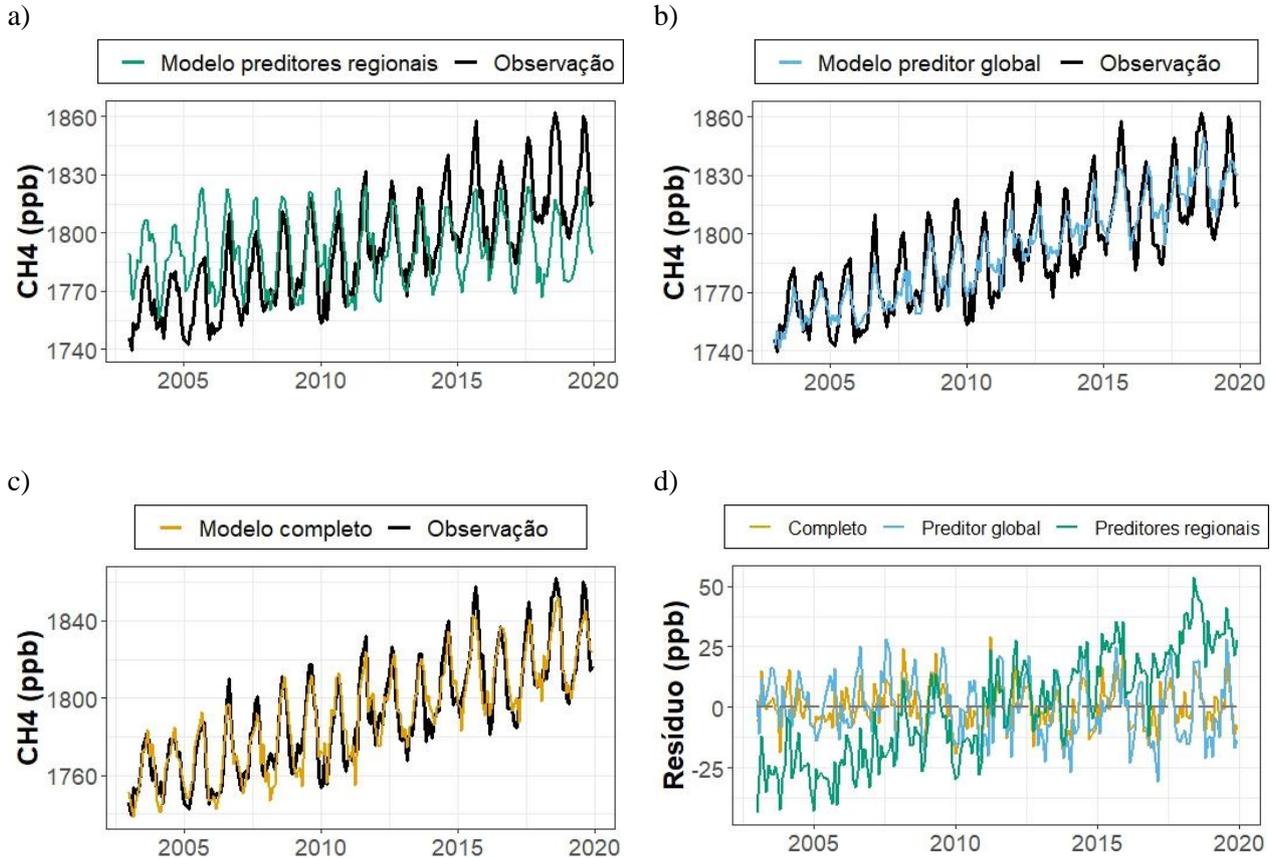


Tabela 3: Métricas de desempenho dos modelos de regressão para a série temporal mensal de concentração de CH₄.

	Modelo completo	Modelo preditores regionais	Modelo preditor global
R ²	0,90	0,40	0,81
p	< 10 ⁻¹⁶	< 10 ⁻¹⁶	< 10 ⁻¹⁶
AIC	1432	1799	1568
RMSE	8,7	22,2	12,5

Esse resultado indica que fatores regionais associados a condições meteorológicas e focos de queimada apenas modulam as concentrações de CH₄ sobre a área de estudo, contribuindo principalmente para os valores extremos de concentração. Com base nesses resultados, pode-se afirmar que a contribuição global é o fator determinante para descrever tanto a sazonalidade quanto a tendência de longo prazo das concentrações de CH₄ sobre a área de estudo.

A Tabela 4 mostra os coeficientes obtidos para o modelo completo, que inclui preditores regionais e globais, bem como suas respectivas incertezas. Observa-se que a concentração de CH₄ em ASC e a temperatura máxima contribuem para um aumento das concentrações de CH₄ na área de estudo. O coeficiente obtido para a temperatura máxima indica que, para cada 1°C de aumento na temperatura, a concentração de CH₄ aumenta em 1,7 ppb. Por outro lado, a precipitação e o número de focos de queimada atuam no sentido de diminuir as concentrações. A relação entre CH₄, temperatura máxima e precipitação está coerente com a sazonalidade das variáveis discutidas na seção 3.2. Para avaliar a importância relativa de cada preditor, está apresentada na Tabela 4 a variabilidade típica de cada variável, representada pelo desvio-padrão das observações (σ) na escala mensal.

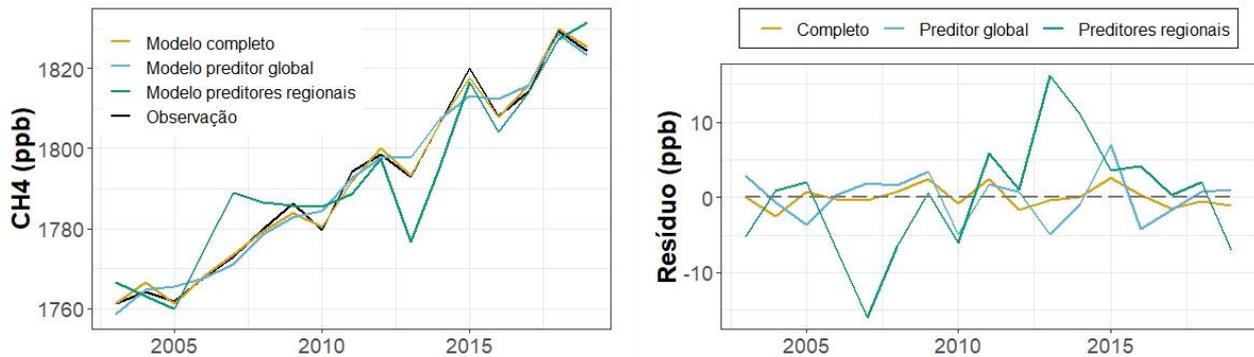
É apresentado também a variação correspondente na concentração de CH₄ que seria produzida isoladamente por cada preditor caso seus valores aumentassem em 1 desvio-padrão. Essa variação foi calculada multiplicando os coeficientes da regressão pelo desvio-padrão de cada preditor. O resultado obtido reafirma a predominância da contribuição de fatores globais, sendo que o aumento de 36 ppb na concentração de CH₄ sobre as Ilhas Ascensão está associado a um aumento de 22,4 ppb na concentração de CH₄ na área de estudo. A magnitude dessa variação é substancialmente maior em comparação com as variações causadas pelos preditores regionais.

Uma análise semelhante foi realizada para as séries temporais anuais, incluindo dados sobre uso da terra, que estão disponíveis apenas em escala anual. Da mesma forma, foram construídos três modelos: a) modelo considerando apenas preditores regionais (Tmax, Focos, Precip, Floresta); b) modelo considerando apenas um preditor global (CH₄ ASC); c) modelo completo, incluindo os preditores regionais e o preditor global (Figura 7).

Tabela 4: Coeficientes de regressão multilinear baseada no conjunto de dados mensais considerando o modelo completo, que inclui preditores regionais e globais. A variabilidade típica de cada preditor corresponde ao desvio-padrão das observações em escala mensal. A variação correspondente na concentração de CH₄ foi calculada considerando o efeito isolado de cada preditor caso seu valor aumentasse em 1 desvio-padrão.

	Coeficiente	Variabilidade típica do preditor (σ)	Variação correspondente na concentração de CH ₄ (ppb)
Intercepto (ppb)	618 ± 40	–	–
CH ₄ ASC (ppb/ppb)	0,622 ± 0,019	36	22,4
Focos (ppb/cenas de focos)	-0,65 ± 0,14	5,29	-3,4
Tmax (ppb/°C)	1,7 ± 0,9	1,6	2,7
Precip (ppb/mm)	-0,060 ± 0,009	133	-8,0

Figura 7: Modelos de regressão tendo como variável alvo a série temporal anual de concentração de CH₄ observada sobre a área de estudo considerando diferentes preditores: apenas preditores regionais, apenas um preditor global, e o modelo completo, incluindo preditores regionais e globais. O resíduo de cada modelo é apresentado na figura à direita.



Corroborando o caso mensal, verificou-se mais uma vez a predominância do preditor global, que isoladamente reproduz 98% da variabilidade interanual (Tabela 5) e está associado às maiores variações das concentrações de CH₄ na área de estudo (Tabela 6). A inclusão dos preditores regionais de fato aprimora o modelo de regressão, diminuindo seu resíduo particularmente nos anos de 2005, 2010, 2015 e 2016 (Figura 7b). Esses foram anos de seca na Amazônia (Marengo et al., 2018), com inflexões na tendência de crescimento de CH₄ que não foram capturadas pelo preditor global. Assim, os resultados indicam que os preditores regionais modulam os valores atípicos de concentração de CH₄, que respondem de maneira complexa a anomalias climáticas. Além disso, observou-se que a cobertura florestal é inversamente proporcional à concentração de CH₄, indicando o importante papel da vegetação em atuar como minimizador das emissões do gás à atmosfera.

Tabela 5: Métricas de desempenho dos modelos de regressão para a série temporal anual de concentração de CH₄.

	Modelo completo	Modelo preditores regionais	Modelo preditor global
R ²	0,99	0,89	0,98
p	< 10 ⁻¹²	< 10 ⁻⁵	< 10 ⁻¹⁴
AIC	74	128	93
RMSE	1,4	7,3	3,1

Tabela 6: Coeficientes de regressão multilinear baseada no conjunto de dados anuais considerando o modelo completo, que inclui preditores regionais e globais. A variabilidade típica de cada preditor corresponde ao desvio-padrão das observações em escala anual. A variação correspondente na concentração de CH₄ foi calculada considerando o efeito isolado de cada preditor caso seu valor aumentasse em 1 desvio-padrão.

	Coeficiente	Variabilidade típica do preditor (σ)	Varição correspondente na concentração de CH ₄ (ppb)
Intercepto (ppb)	1410 \pm 180	–	–
CH ₄ ASC (ppb/ppb)	0,56 \pm 0,03	34	19,0
Focos (ppb/centenas de focos)	0,11 \pm 0,02	20	2,2
Tmax (ppb/°C)	-11,9 \pm 2,1	0,4	-4,8
Precip (ppb/mm)	-0,011 \pm 0,003	250	-2,7
Floresta (ppb/% de área)	-3,1 \pm 0,9	1,4	-4,3

4. Conclusão

Este estudo caracterizou a variabilidade temporal das concentrações de CH₄ na média troposfera no nordeste da Amazônia, utilizando dados do sensor AIRS. Observou-se uma significativa tendência de crescimento das concentrações entre 2003 e 2019. Esse sinal de crescimento possui uma contribuição devida ao aumento global das concentrações desse poluente e das mudanças em fontes e sumidouros na superfície. Observou-se que a taxa de crescimento da concentração de CH₄ observada no nordeste da Amazônia, de 4,4 \pm 0,3 ppb/ano, foi significativamente menor do que a observada sobre estações de *background* global (entre 5,6 e 6,7 ppb/ano), situadas vento acima da área de estudo.

Este resultado sugere que esta região da floresta pode estar atuando como um sumidouro de CH₄, atenuando o aumento global das concentrações do gás. Além disso, foram investigadas associações entre as concentrações de CH₄ na média troposfera e diferentes variáveis ambientais na superfície através de modelos de regressão multilinear. Foram desenvolvidos dois modelos: um para dados mensais e outro para dados anuais. A seleção das variáveis que melhor se adequaram aos modelos foi feita pelas matrizes de correlação e pela seleção de variáveis em etapas.

Para a componente mensal, o melhor modelo foi obtido com a composição multilinear da concentração de CH₄ nas Ilhas Ascensão, temperatura máxima, precipitação total e número de focos de queimada, que retornou um R² de 0,90. A concentração de CH₄ sobre as Ilhas Ascensão e a temperatura máxima estão ligadas ao aumento das concentrações de CH₄ na área de estudo. O modelo prevê que um aumento de 1°C na temperatura máxima resulta em um acréscimo de 1,7 ppb de CH₄. Por outro lado, a precipitação e as queimadas estão associadas à diminuição das concentrações de CH₄. A relação entre CH₄, temperatura máxima e precipitação coincide com padrões sazonais. Isso reafirma a influência predominante dos fatores globais. Já para o caso anual, o melhor modelo foi obtido com variáveis similares ao caso mensal, mas com a adição da fração de floresta. O modelo obtido com essas variáveis retornou AIC de 74 e R² de 0,99. O modelo reforçou mais uma vez a importância da contribuição global às variações observadas na região de estudo. Deve-se ressaltar a importante contribuição da fração de floresta como importante atenuadora das concentrações de CH₄.

Este estudo ressalta a importância de pesquisas sobre o metano atmosférico na Amazônia, que podem abordar questões mais amplas. Isso inclui investigar as concentrações de metano na superfície e na troposfera, bem como compreender o impacto das emissões de metano de outras regiões para obter uma visão global da dinâmica desse gás. Também é crucial considerar como as mudanças no uso da terra afetam as concentrações de metano, a fim de compreender melhor o papel das florestas no controle das emissões e identificar possíveis áreas que podem ser fontes ou sumidouros de metano.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, projetos 2021/13610-8 e 2022/03535-1) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, projeto 304819/2022-0) pelo apoio financeiro; ao apoio do Centro de Pesquisa de Gases de Efeito Estufa e Inovação (RCGI), sediado pela Universidade de São Paulo (USP) e patrocinado pela FAPESP (bolsas 2014/50279-4 e 2020/15230-5) e Shell Brasil; e a importância estratégica do apoio da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) por meio do regulamento da taxa de P&D.

6. Referências

Artaxo, P.; Hansson, H.-C.; Andreae, M. O.; Bäck, J.; Alves, E. G.; Barbosa, H. M. J.; Bender, F.; Bourtsoukidis, E.; Carbone, S.; Chi, J.; Decesari, S.; Després, V.R.; Ditas, F.; Ezhova, E.; Fuzzi, S.; Hasselquist, N.J.; Heintzenberg, J.; Holanda, B.A.; Guenther, A.; Hakola, H.; Heikkinen, L.; Kerminen, V.-M.; Kontkanen, J.; Krejci, R.; Kulmala, M.; Lavric, J.V.; de Leeuw, G.; Lehtipalo, K.; Machado, L.A.T.; McFiggans, G.; Franco, M.A.M.; Meller, B.B.; Morais, F.G.; Mohr, C.; Morgan, W.; Nilsson, M.B.; Peichl, M.; Petäjä, T.; Praß, M.; Pöhlker, C.; Pöhlker, M.L.; Pöschl, U.; Von Randow, C.; Riipinen, I.; Rinne, J.; Rizzo, L.V.; Rosenfeld, D.; Silva Dias, M.A.F.; Sogacheva, L.; Stier, P.; Swietlicki, E.; Sörgel, M.; Tunved, P.; Virkkula, A.; Wang, J.; Weber, B.; Yáñez-Serrano, A.M.; Zieger, P.; Mikhailov, E.; Smith, J.N.; Kesselmeier, J. (2022). Tropical and Boreal Forest – Atmosphere Interactions: A Review. **Tellus B: Chemical and Physical Meteorology**, 74(1), 24-163. DOI: <https://doi.org/10.16993/tellusb.34>.

Barthel, M.; Bauters, M.; Baumgartner, S.; Drake, T.W.; Bey, N.M.; Bush, G.; Boeckx, P.; Botefa, C.I.; Dériaz, N.; Ekamba, G.L.; Gallarotti, N.; Mbayu, F.M.; Mugula, J.K.; Makelele, I.A.; Mbongo, C.E.; Mohn, J.; Manda, J.Z.; Mpambi, D.M.; Ntaboba, L.C.; Rukeza, M.B.; Spencer, R.G.M.; Summerauer, L.; Vanlauwe, B.; Van Oost, K.; Wolf, B.; Six, J. (2022). Low N₂O and variable CH₄ fluxes from tropical forest soils of the Congo Basin. **Nature Communications**, 13(330), 1-8. DOI: 10.1038/s41467-022-27978-6.

Basso, L. S., Gatti, L. V., Gloor, M., Miller, J. B., Domingues, L. G., Correia, C. S. C., and Borges, V. F.: Seasonality and inter-annual variability of CH₄ fluxes from the eastern Amazon Basin inferred from atmospheric mole fraction profiles, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 168–184, <https://doi.org/10.1002/2015JD023874>, 2015.

Basso, Luana S.; Marani, Luciano; Gatti, Luciana V.; Miller, John B.; Gloor, Manuel; Melack, John; Cassol, Henrique L. G.; Tejada, Graciela; Domingues, Lucas G.; Arai, Egidio; Sanchez, Alber H.; Corrêa, Sergio M.; Anderson, Liana; Aragão, Luiz E. O. C.; Correia, Caio S. C.; Crispim, Stephane P.; Neves, Raiane A. L. (2021). Amazon methane budget derived from multi-year airborne observations highlights regional variations in

emissions. **Communications Earth & Environment**, 2(246), 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00314-4>.

Beck, V., Chen, H., Gerbig, C., Bergamaschi, P., Bruhwiler, L., Houweling, S., Röckmann, T., Kolle, O., Steinbach, J., Koch, T. and Sapart, C.J., 2012. Methane airborne measurements and comparison to global models during BARCA. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D15).

Botía, S., Gerbig, C., Marshall, J., Lavric, J. V., Walter, D., Pöhlker, C., Holanda, B., Fisch, G., Carioca De Araújo, A., Sá, M. O., Teixeira, P. R., Resende, A. F., Dias-Junior, C. Q., Van Asperen, H., Oliveira, P. S., Stefanello, M., and Acevedo, O. C.: Understanding nighttime methane signals at the Amazon Tall Tower Observatory (ATTO), *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 6583–6606, <https://doi.org/10.5194/acp-20-6583-2020>, 2020.

Costa, P.S.; Souza, R.A.F.; Souza, R.V.A.; Cartaxo, E.F. (2011). Variabilidade da concentração do metano troposférico sobre o reservatório da hidrelétrica Balbina a partir de informações do satélite ambiental AQUA. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, Brasil. 6 p. Disponível em: <http://urlib.net/ibi/3ERPFQRTRW/3A58BJP>.

Embrapa. (2020). **Satélites de Monitoramento**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/>>. Acesso em: 06/07/2023.

Emiliano, P. C. **Fundamentos e aplicações dos critérios de informação: Akaike e Bayesiano**. Dissertação de mestrado, Estatística e Experimentação Agropecuária, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 92 p. DOI: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/3636>.

Fassoni-Andrade, A.C., Fleischmann, A.S., Papa, F., Paiva, R.C.D.D., Wongchuig, S., Melack, J.M., Moreira, A.A., Paris, A., Ruhoff, A., Barbosa, C. and Maciel, D.A., 2021. Amazon hydrology from space: scientific advances and future challenges. *Reviews of Geophysics*, 59(4), p.e2020RG000728.

Fisch, G.; Marengo, J. A.; Nobre, C. A. (1998). Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. **Acta Amazonica**, 28(2), 101–101. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-43921998282126>.

Gatti, L. V.; Basso, L. S.; Miller, J. B.; Gloor, M.; Domingues, L. G.; Cassol, H. L. G.; Tejada, G.; Aragão, L. E. O. C.; Nobre, C.; Peters, W.; Marani, L.; Arai, E.; Sanches, A. H.; Corrêa, S. M.; Anderson, L.; Randow, C. V.; Correia, C. S. C.; Crispim, S. P.; Neves, R. A. L. (2021). Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. **Nature**, 595(7867), 388–393. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>.

Gatti Domingues, L.; Vanni Gatti, L.; Aquino, A.; Sánchez, A.; Correia, C.; Gloor, M.; Peters, W.; Miller, J.; Turnbull, J.; Santana, R.; Marani, L.; Câmara, G.; Neves, R.; Crispim, S. A. (2020). A New Background Method for Greenhouse Gases Flux Calculation Based in Back-Trajectories Over the Amazon. **Atmosphere**, 11(7), 734. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11070734>

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2023). ERA5 hourly data

on single levels from 1940 to present. **Copernicus Climate Change Service**. DOI: 10.24381/cds.adbb2d47.

Holanda, B.A., Franco, M.A., Walter, D., Artaxo, P., Carbone, S., Cheng, Y., Chowdhury, S., Ditas, F., Gysel-Beer, M., Klimach, T. and Kremper, L.A., 2023. African biomass burning affects aerosol cycling over the Amazon. **Communications Earth & Environment**, 4(1), p.154.

MapBiomass. (2019). **O Projeto**. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/o-projeto>>. Acesso em: 06/07/2023.

Marengo, J. A., Liebmann, B., Kousky, V. E., Filizola, N. P., Wainer, I. C. (2001). Onset and End of the Rainy Season in the Brazilian Amazon Basin. **Journal of Climate**, 14(5), 833-852. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<0833:OAEOTR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<0833:OAEOTR>2.0.CO;2).

Meyer, K. M., Klein, A. M., Rodrigues, J. L. M., Nüsslein, K., Tringe, S. G., Mirza, B. S., Tiedje, J. M., and Bohannan, B. J. M.: Conversion of Amazon rainforest to agriculture alters community traits of methane-cycling organisms, *Mol. Ecol.*, 26, 1547–1556, <https://doi.org/10.1111/mec.14011>, 2017.

Miller, J. B.; Gatti, L. V.; d'Amelio, M. T. S.; Crowell, A. M.; Dlugokencky, E. J.; Bakwin, P.; Artaxo, P.; Tans, P. P. (2007). Airborne measurements indicate large methane emissions from the eastern Amazon basin, **Geophysical Research Letters**, 34, L10809. DOI: 10.1029/2006GL029213.

Morais, F.G.; Franco, M.A.; Palácios, R.; Machado, L.A.T.; Rizzo, L.V.; Barbosa, H.M.J.; Jorge, F.; Schafer, J.S.; Holben, B.N.; Landulfo, E.; Artaxo, P. (2022). Relationship between Land Use and Spatial Variability of Atmospheric Brown Carbon and Black Carbon Aerosols in Amazonia. **Atmosphere**, 13(8), 1308–1328. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos13081328>.

Morais, C. S. (2020). **Estudo da evolução das concentrações de metano na última década na Amazônia**. Dissertação de mestrado, Tecnologia Nuclear – Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, 68 p. DOI: 10.11606/D.85.2020.tde-21022020-135554.

Moran, E. F. (2016). ROADS AND DAMS: INFRASTRUCTURE-DRIVEN TRANSFORMATIONS IN THE BRAZILIAN AMAZON. **Ambiente & Sociedade**, 19(2), 207-220. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4422ASOC256V1922016>.

NASA. (2021) **Overview of the AIRS Mission: Instruments, Processing Algorithms, Products, and Documentation**. Disponível em: <<https://disc.gsfc.nasa.gov/information/documents?title=AIRS%20Documentation>>. Acesso em:

Ribeiro, I. O., de Souza, R. A. F., Andreoli, R. V., Kayano, M. T., and Costa, P. dos S.: Spatiotemporal variability of methane over the Amazon from satellite observations, *Adv. Atmos. Sci.*, 33, 852–864, <https://doi.org/10.1007/s00376-016-5138-7>, 2016.

Ribeiro, I. O., Andreoli, R. V., Kayano, M. T., de Sousa, T. R., Medeiros, A. S., Guimarães, P. C., Barbosa, C. G. G., Godoi, R. H. M., Martin, S. T., and de Souza, R. A. F.: Impact of the biomass burning on methane variability during dry years in the Amazon measured from an aircraft and the AIRS sensor, *Sci. Total Environ.*,

624, 509–516, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.147>, 2018.

Sawakuchi, H.O., Bastviken, D., Sawakuchi, A.O., Krusche, A.V., Ballester, M.V. and Richey, J.E., 2014. Methane emissions from Amazonian Rivers and their contribution to the global methane budget. *Global Change Biology*, 20(9), pp.2829-2840.

Silva, A. F. C., Costa, M. do S. S., Botelho, M. G. L., Furtado, L. G., Batista, V. de A., Carneiro, C. R. de O., & Morales, G. P. (2020). Impactos das alterações no uso e cobertura do solo no Município de Altamira, Pará. **Research, Society and Development**, 9(8), e303985488. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i8.5488>.

Turner, A. J.; Frankenberg, C.; Kort, E. A. (2019). Interpreting contemporary trends in atmospheric methane. **PNAS**, 116(8), 2805-2813. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.181429711>

Venables, W. N.; Smith, D. M.; R Core Team. (2023) **An Introduction to R**. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/manuals.html>>. Acesso em: 06/07/2023.

Xiong, X., Barnet, C., Maddy, E., Sweeney, C., Liu, X., Zhou, L. and Goldberg, M.: Characterization and validation of methane products from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS), *J. Geophys. Res.*, 113(null), G00A01, doi:10.1029/2007JG000500, 2008.

Zou, M., Xiong, X., Saitoh, N., Warner, J., Zhang, Y., Chen, L., Weng, F. and Fan, M.: Satellite observation of atmospheric methane: intercomparison between AIRS and GOSAT TANSO-FTS retrievals, *Atmos. Meas. Tech.*, 9(8), 3567–3576, doi:10.5194/amt-9-3567-2016, 2016.