

FLUXOS DE CH₄ E N₂O EM DIFERENTES USOS DA TERRA NO OESTE DO PARÁ: EFEITOS MICROCLIMÁTICOS E BIOGEOQUÍMICOS DO SOLO

METHANE AND NITROUS OXIDE FLUXES ACROSS LAND-USE TYPES IN WESTERN PARÁ: MICROCLIMATIC AND BIOGEOCHEMICAL CONTROLS

FLUJOS DE CH₄ Y N₂O EN DIFERENTES USOS DEL SUELO EN EL OESTE DE PARÁ: EFECTOS MICROCLIMÁTICOS Y BIOGEOQUÍMICOS DEL SUELO



10.56238/revgeov17n2-019

Raimundo Cosme de Oliveira Junior

Doutor em Geoquímica Ambiental

Instituição: Embrapa Amazônia Oriental

Endereço: Pará, Brasil

E-mail: raimundo.oliveira-junior@embrapa.br

Fabiane Campos dos Santos Camargo

Mestre em Recursos Naturais da Amazônia

Instituição: Banco da Amazônia

E-mail: Fabiane.engenheira@gmail.com

Darlisson Bentes dos Santos

Mestre em Energia na Agricultura

Instituição: Embrapa Amazônia Oriental (colaborador)

Endereço: Pará, Brasil

E-mail: engenheirodb@hotmail.com

Daniel Rocha de Oliveira

Mestre Clínica e Reprodução Animal

Instituição: Agência de Defesa Agropecuária do Estado do Pará (ADEPARÁ)

Endereço: Pará, Brasil

E-mail: handvet@yahoo.com.br

Eduardo Jorge Maklouf Carvalho

Doutor em Solos e Nutrição de Plantas

Instituição: Embrapa Amazônia Oriental

Endereço: Pará, Brasil

E-mail: eduardo.maklouf@embrapa.br

Carlos Alberto Costa Veloso

Doutor em Solos e Nutrição de Plantas

Instituição: Embrapa Amazônia Oriental

Endereço: Pará, Brasil

E-mail: carlos.veloso@embrapa.br



Arystides Resende Silva

Doutor em Solos e Nutrição de Plantas

Instituição: Embrapa Milho e Sorgo

Endereço: Minas Gerais, Brasil

E-mail: arystides.silva@embrapa.br

RESUMO

As mudanças no uso da terra na Amazônia alteram profundamente os controles biogeoquímicos que regulam os fluxos de metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) entre o solo e a atmosfera. Este estudo quantificou os fluxos desses gases em quatro tipos de cobertura do solo - floresta, capoeira, pastagem e agricultura (soja sob plantio direto e convencional) - em microbacias nos municípios de Santarém e Belterra, oeste do Pará. As medições foram realizadas com câmaras estáticas manuais distribuídas em transectos de 300 m, acompanhadas de variáveis ambientais como temperatura do ar e do solo, umidade gravimétrica e WFPS. Os resultados mostraram que áreas de capoeira apresentaram temperaturas mais baixas e maior estabilidade microclimática, refletindo menor emissão e maior propensão à oxidação de CH_4 . Em contraste, áreas agrícolas e de pastagem exibiram maior variabilidade térmica e maiores fluxos de N_2O e CH_4 , sobretudo durante a colheita da soja, período marcado pelo acúmulo de resíduos vegetais e intensificação da atividade microbiana. As maiores emissões de N_2O foram associadas a pulsos pós-distúrbio e fases fenológicas específicas da cultura. Esses achados demonstram que a conversão florestal modifica a função ecológica do solo, transformando ambientes originalmente sumidouros em potenciais fontes de gases traço. O estudo contribui para o entendimento dos mecanismos reguladores dos fluxos de CH_4 e N_2O em agroecossistemas amazônicos e fornece subsídios para estratégias de manejo capazes de mitigar emissões em sistemas agrícolas tropicais.

Palavras-chave: Gases Traço. Uso da Terra. Metano. Óxido Nitroso. Amazônia.

ABSTRACT

Land-use change in the Amazon profoundly alters the biogeochemical controls that regulate methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) fluxes between the soil and the atmosphere. This study quantified CH_4 and N_2O fluxes across four land-cover types - forest, secondary vegetation (capoeira), pasture, and agriculture (soybean under no-till and conventional tillage) - in micro catchments located in the municipalities of Santarém and Belterra, western of Pará State. Gas measurements were conducted using manual static chambers installed along 300-m transects, accompanied by environmental variables such as air and soil temperature, gravimetric soil moisture, and WFPS. Results showed that secondary vegetation areas exhibited lower temperatures and greater microclimatic stability, reflecting reduced emissions and enhanced CH_4 oxidation potential. In contrast, agricultural and pasture areas displayed greater thermal variability and higher N_2O and CH_4 fluxes, particularly during soybean harvest, a period marked by the accumulation of plant residues and intensified microbial activity. The highest N_2O emissions were associated with post-disturbance pulses and specific phenological stages of the crop. These findings demonstrate that forest conversion alters the ecological function of soils, shifting environments that originally acted as CH_4 sinks into potential sources of trace gases. The study contributes to a broader understanding of the regulatory mechanisms of CH_4 and N_2O fluxes in Amazonian agroecosystems and provides insights for management strategies aimed at mitigating emissions in tropical agricultural systems.

Keywords: Trace Gases. Land Use. Methane. Nitrous Oxide. Amazon.



RESUMEN

Los cambios en el uso de la tierra en la Amazonía alteran profundamente los controles biogeoquímicos que regulan los flujos de metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) entre el suelo y la atmósfera. Este estudio cuantificó los flujos de estos gases en cuatro tipos de cobertura del suelo —bosque, bosque secundario, pastizal y agricultura (soja bajo siembra directa y convencional)— en microcuencas de los municipios de Santarém y Belterra, en el oeste de Pará. Las mediciones se realizaron con cámaras estáticas manuales distribuidas en transectos de 300 m, acompañadas de variables ambientales como temperatura del aire y del suelo, humedad gravimétrica y WFPS. Los resultados mostraron que las áreas de bosque secundario presentaron temperaturas más bajas y mayor estabilidad microclimática, reflejando una menor emisión y una mayor propensión a la oxidación de CH_4 . En contraste, las áreas agrícolas y de pastizal exhibieron una mayor variabilidad térmica y mayores flujos de N_2O y CH_4 , especialmente durante la cosecha de la soja, período marcado por la acumulación de residuos vegetales y la intensificación de la actividad microbiana. Las mayores emisiones de N_2O se asociaron a pulsos posdisturbio y a fases fenológicas específicas del cultivo. Estos hallazgos demuestran que la conversión forestal modifica la función ecológica del suelo, transformando ambientes originalmente sumideros en potenciales fuentes de gases traza. El estudio contribuye al entendimiento de los mecanismos reguladores de los flujos de CH_4 y N_2O en agroecosistemas amazónicos y proporciona insumos para estrategias de manejo capaces de mitigar emisiones en sistemas agrícolas tropicales.

Palabras clave: Gases Traza. Uso del Suelo. Metano. Óxido Nitroso. Amazonía.



1 INTRODUÇÃO

A Amazônia desempenha papel crucial na estabilidade climática global por regular os ciclos do carbono (C) e do nitrogênio (N), influenciando de maneira decisiva os fluxos de gases de efeito estufa (GEEs). A região abriga a maior floresta tropical contínua do planeta, responsável por uma complexa rede de processos biogeoquímicos que modulam a produção, o consumo e o transporte de CH₄ e N₂O. Esses gases possuem elevado potencial de aquecimento global e alta sensibilidade a alterações ambientais, tornando-se indicadores estratégicos das consequências ecológicas de perturbações antrópicas. Contudo, a rápida intensificação das mudanças de uso da terra no arco do desmatamento tem provocado transformações significativas no funcionamento ecológico dos solos amazônicos (Gatti et al., 2021; Marengo et al., 2018).

Dados oficiais do sistema PRODES/INPE (2023) indicam que a taxa anual de desmatamento na Amazônia Legal variou significativamente na última década, com valores maiores nos anos recentes (por exemplo, 11.594 km² em 2022/23 e 9.064 km² em 2023), de acordo com os relatórios consolidados do sistema.

Entretanto, os dados públicos consolidados do PRODES disponíveis para 2015–2022, conforme Terrabrasilis/INPE (2023), mostram taxas mais baixas, geralmente bem abaixo de 8000 km²/ano para boa parte desse período — por exemplo, em 2015 foi ~2.153 km²; 2016 ~2.992 km²; 2017 ~2.433 km²; 2018 ~2.744 km²; 2019 ~4.172 km²; 2020 ~4.899 km²; 2021 ~5.238 km²; 2022 ~4.162 km².

A substituição de florestas por pastagens e cultivos agrícolas altera drasticamente propriedades físicas — como porosidade, densidade e estrutura agregada — e processos microbianos fundamentais, resultando em mudanças profundas nos fluxos de CH₄ e N₂O (Khan et al., 2019; Kroeger et al., 2021). Enquanto solos de florestas intactas representam importantes sumidouros de CH₄, graças à atividade metanotrófica bem estabelecida, a conversão florestal costuma reduzir a difusão de gases e favorecer condições anaeróbias, levando ao aumento da produção microbiana de CH₄ e potencial inversão de sua função ecológica (Meyer et al, 2017; Kroeger et al., 2021).

No caso do N₂O, os impactos da conversão do uso do solo tendem a ser ainda mais expressivos. Processos de nitrificação e desnitrificação tornam-se mais intensos quando o solo é submetido à mineralização acelerada da matéria orgânica, maior disponibilidade de N mineral e eventos de compactação que criam microambientes com gradientes de oxigênio. Em particular, sistemas agrícolas com adubação nitrogenada apresentam picos de emissão significativos, reforçando seu papel como importantes fontes de N₂O para a atmosfera (Shi et al., 2025; ZHANG et al., 2018). Assim, a dinâmica dos gases traço em ecossistemas convertidos é resultado de múltiplas interações entre fatores edáficos, hidrológicos e microbiológicos.



A Amazônia Oriental se destaca como um laboratório natural para investigar essas interações, devido ao mosaico heterogêneo de coberturas que inclui florestas primárias, áreas degradadas, capoeiras em diferentes estágios sucessionais e extensas áreas de pastagem. Esse mosaico expressa uma variedade de condições ambientais que influenciam fortemente as comunidades microbianas e, consequentemente, os fluxos de Gases de Efeito Estufa (GEEs). Florestas secundárias, por exemplo, apresentam trajetórias de recuperação que alteram gradualmente a estrutura do solo, o conteúdo de carbono lábil e as condições de umidade, produzindo padrões intermediários de emissão de CH_4 e N_2O ainda pouco compreendidos (Meyer et al., 2020; Poorter et al., 2021).

Adicionalmente, a intensificação agrícola na região envolve não apenas a adição direta de fertilizantes nitrogenados, mas também o transporte de compostos reativos de N via deposição atmosférica oriunda de áreas de alta produtividade agrícola. Estudos recentes demonstram que o incremento de NH_4^+ e NO_3^- depositados sobre fragmentos florestais pode reduzir a atividade metanotrófica e, portanto, o consumo de CH_4 , comprometendo a função de sumidouro desse ecossistema (Xia et al., 2020; Zheng et al., 2016). Isso revela que mesmo florestas não convertidas podem sofrer impactos indiretos associados às mudanças de uso do solo no entorno, o que amplia a escala espacial dos efeitos antrópicos.

Apesar dos avanços metodológicos recentes — especialmente no uso de câmaras estáticas e técnicas de mensuração de alta precisão — ainda existe considerável incerteza científica sobre (i) a variação espacial dos fluxos de CH_4 e N_2O entre diferentes usos do solo, (ii) a sensibilidade dos gases aos fatores ambientais e (iii) o papel relativo de florestas secundárias e cultivos agrícolas no balanço regional de emissões. A carência de estudos integrados em áreas que combinam florestas nativas, capoeiras, pastagens e agricultura em proximidade espacial representa uma lacuna crítica, sobretudo na Amazônia Oriental, onde as transições entre sistemas produtivos são intensas e contínuas (Poorter et al., 2021).

Compreender os mecanismos que regulam esses fluxos é fundamental porque o solo representa o maior compartimento ativo de N no ecossistema e exerce forte controle sobre o ciclo do CH_4 . Variáveis ambientais como umidade volumétrica, temperatura do solo, densidade aparente, teores de nitrogênio mineral (NH_4^+ e NO_3^-) e carbono dissolvido são reconhecidamente determinantes para modular os processos de metanogênese, metanotrofia, nitrificação e desnitrificação (Hao et al., 2025; Wagner-Riddle et al., 2017). No entanto, a magnitude desses controles varia entre sistemas de uso do solo e ao longo do tempo, especialmente entre períodos de maior precipitação e sazonalidade mais marcada.

Diante desse contexto, este estudo busca preencher uma lacuna essencial no entendimento sobre os efeitos das mudanças de uso do solo na dinâmica dos gases traço na Amazônia Oriental.



Ao integrar florestas nativas, áreas agrícolas, pastagens e capoeiras em um mesmo framework analítico, é possível desenvolver uma compreensão comparativa robusta e ecologicamente relevante.

Para orientar a investigação, formulam-se as seguintes hipóteses: H1. Os fluxos de CH₄ e N₂O diferem significativamente entre os tipos de cobertura, sendo a floresta nativa um sumidouro de CH₄ e uma fonte moderada de N₂O, enquanto pastagens e cultivos atuam como fontes intensificadas devido à compactação do solo e à maior disponibilidade de N; H2. A umidade do solo, a densidade aparente, a temperatura e o N mineral são os principais controladores ambientais dos fluxos, com padrões contrastantes entre florestas, capoeiras, pastagens e agricultura e; H3. Capoeiras apresentam fluxos intermediários, refletindo estados sucessionais e trajetória de recuperação parcial dos processos biogeoquímicos.

O objetivo deste estudo é quantificar os fluxos de CH₄ e N₂O em diferentes tipos de cobertura do solo na Amazônia Oriental e identificar os fatores ambientais reguladores dessas trocas, fornecendo uma visão integrada sobre os impactos das mudanças de uso da terra.

Com os resultados alcançados, espera-se: caracterizar detalhadamente o comportamento dos fluxos de CH₄ e N₂O ao longo de um gradiente de uso do solo; identificar os principais fatores ambientais controladores e suas interações; quantificar a intensidade da alteração funcional causada pela conversão florestal; contribuir para a parametrização de modelos biogeoquímicos aplicados à Amazônia e; fornecer subsídios para práticas de manejo sustentável e para a redução das incertezas nos inventários de emissões regionais de GEEs.

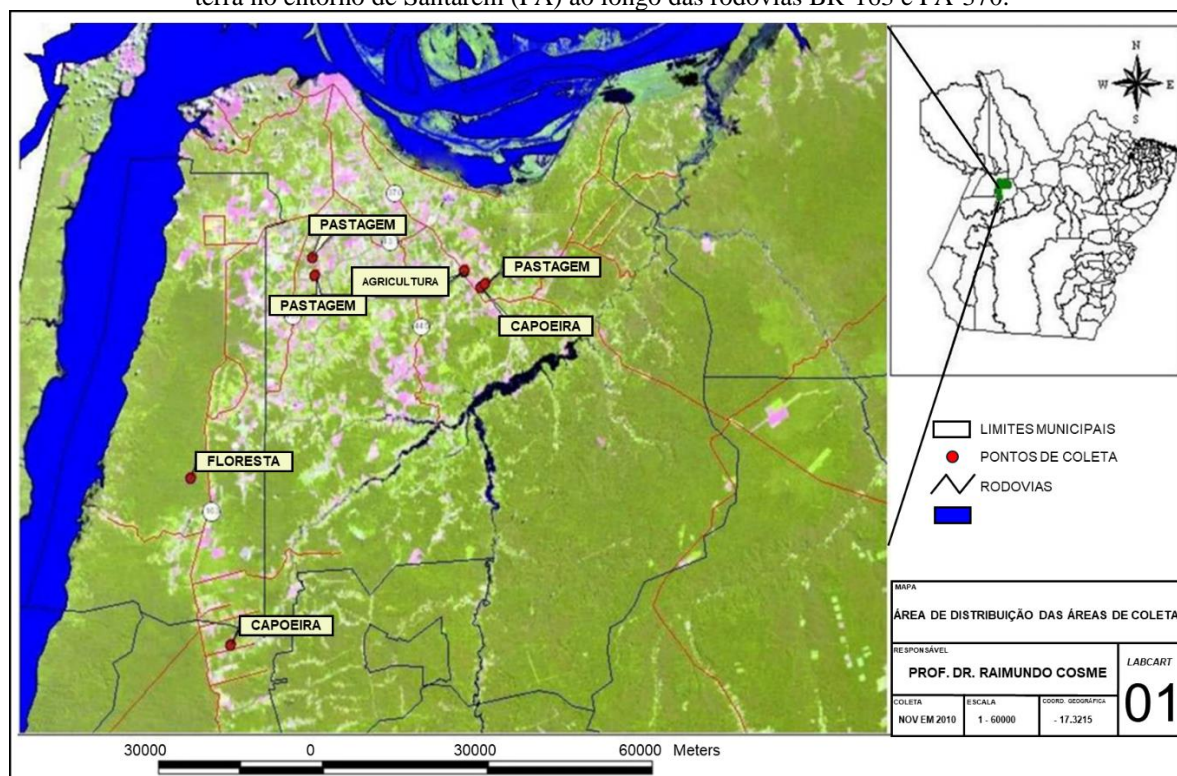
2 MATERIAIS E MÉTODOS

As áreas de estudo estão localizadas no oeste do estado do Pará, nos municípios de Belterra e Santarém. O clima da região é do tipo Ami (classificação de Köppen), caracterizado por elevada umidade e chuvas concentradas no primeiro semestre do ano. Em Belterra, a temperatura média anual varia de 25 a 28 °C, com umidade relativa média anual de 86%. A precipitação anual totaliza 1.909 mm, com média mensal de 62,5 mm no período mais seco e de aproximadamente 770 mm entre fevereiro e junho (INMET, 2010). Em Santarém, a temperatura média anual varia entre 25,4 e 27,1 °C, com umidade relativa média de 86,7% e precipitação anual em torno de 1.920 mm (INMET, 2011). O solo predominante é o Latossolo, ocorrendo em relevo plano a suavemente ondulado, com textura variando de arenosa a muito argilosa (Oliveira Junior & Correa, 2001). Essas características climáticas e edáficas são relevantes para a interpretação dos fluxos de gases traço, dado que temperatura, regime hídrico e textura influenciam diretamente processos de difusão e metabolismo microbiano.



As áreas no entorno de Santarém (microbacias) foram selecionadas considerando facilidade de acesso, parceria com produtores locais e presença de remanescentes florestais. Essas áreas formam um gradiente representativo de intensificação do uso da terra, incorporando quatro tipos de cobertura: floresta, capoeira, agricultura e pastagem. O estudo foi conduzido em três microbacias (B112, B129 e B357), onde foram selecionadas áreas de capoeira, pastagem e agricultura localizadas ao longo da Rodovia BR-163 e da Rodovia Estadual PA-370. Foram amostrados sete transectos (sítios): três sob uso agrícola com cultivo de soja (dois em plantio convencional — PC — e um em plantio direto — PD), dois sob pastagem e dois sob capoeira (Figura 1). A inclusão simultânea desses usos permite avaliar, em escala local, mudanças nos fluxos de CH₄ e N₂O associados a diferentes estágios sucessionais e níveis de perturbação antrópica, conforme recomendado em estudos recentes de biogeoquímica tropical (Li et al., 2024; Martin, 2024).

Figura 1. Localização das microbacias de estudo e distribuição dos sítios amostrais sob diferentes usos e coberturas da terra no entorno de Santarém (PA) ao longo das rodovias BR-163 e PA-370.



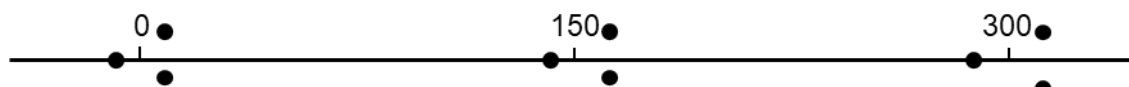
Fonte: Autores.

O desenho amostral foi estruturado para avaliar o efeito da cobertura vegetal sobre os fluxos de CH₄ e N₂O na interface solo-atmosfera. Para cada sítio de pastagem, capoeira e agricultura, estabeleceu-se um transecto de 300 m (Figura 2), com três pontos de amostragem (0, 150 e 300 m). Em cada ponto, instalaram-se três câmaras de fluxo posicionadas a aproximadamente 5 m do ponto central, totalizando nove câmaras por transecto. Esse arranjo espacial reduz a autocorrelação espacial e assegura representatividade ambiental, conforme



diretrizes metodológicas amplamente validadas para estudos de fluxos difusivos (Arias-Navarro et al., 2021; Charteris et al., 2020).

Figura 2. Esquema da distribuição das câmaras para medir o fluxo de CH_4 e N_2O nos transectos.



Fonte: Autores.

Os fluxos de CH_4 e N_2O foram mensurados por meio de câmaras estáticas fechadas. As amostras de gás foram coletadas manualmente em seringas de nylon de 20 mL, em intervalos entre 1 e 30 minutos após o fechamento da câmara. A câmara fechada impede o livre movimento de gases entre o solo e a atmosfera, permitindo quantificar a variação temporal das concentrações internas. O intervalo de amostragem adotado segue práticas consolidadas que asseguram a linearidade da acumulação dos gases, etapa crítica para evitar sub ou superestimativas dos fluxos (Mazengo et al., 2024).

A umidade gravimétrica do solo (UG) foi determinada pela diferença entre massa úmida (pu) e massa seca (ps), dividida por ps e multiplicada por 100. A massa seca foi obtida por secagem em estufa a 105 °C por 48 horas. O espaço poroso preenchido por água (WFPS — Water-Filled Pore Space) foi calculado a partir da densidade do solo (dg), densidade das partículas (dp) e teor de água no solo. O uso do WFPS é fundamental porque representa o principal indicador das condições redox no solo, controlando a atividade de metanogênicos, metanotróficos e desnitrificantes (Lang et al., 2020; Thilakarathna et al., 2021).

Os fluxos de CH_4 e N_2O foram calculados com base na taxa de variação da concentração ao longo do tempo, utilizando a primeira lei de Fick. Na equação, F é o fluxo do gás na superfície do solo, ρ é a densidade do ar ajustada à temperatura do momento da amostragem, V é o volume interno da câmara, A é a área superficial coberta pela câmara, e dC/dt é a inclinação da curva concentração-tempo. A densidade do ar foi estimada utilizando a constante universal dos gases ($0,083 \text{ L} \cdot \text{atm} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), a temperatura em Kelvin e a pressão atmosférica local. Para assegurar a robustez das estimativas de fluxo, a linearidade das curvas de acúmulo de concentração dentro das câmaras foi verificada antes do cálculo de dC/dt . Para cada sequência temporal de amostragem (0, 10, 20 e 30 minutos), ajustou-se um modelo de regressão linear simples entre o tempo de fechamento e a concentração do gás, avaliando-se a significância do coeficiente angular ($p < 0,05$) e o coeficiente de determinação (R^2). Sequências que apresentaram R^2 inferior a 0,90 ou comportamento não linear — frequentemente associado à saturação da câmara, variações térmicas abruptas ou distúrbios no solo — foram descartadas, conforme recomendações metodológicas recentes.



Adicionalmente, verificou-se a normalidade dos resíduos e a ausência de curvatura sistemática no gráfico de resíduos versus valores ajustados, assegurando que apenas trechos com acúmulo linear fossem utilizados no cálculo do fluxo. Esse procedimento é particularmente importante para N_2O , cuja cinética pode apresentar desvios da linearidade mesmo em intervalos curtos, devido à elevada reatividade e à heterogeneidade microbiana no solo (Silva et al., 2015; Zaman, et al., 2021).

Variáveis ambientais potencialmente reguladoras das trocas gasosas — como temperatura do solo, textura, umidade gravimétrica e WFPS — foram coletadas e posteriormente correlacionadas com os fluxos medidos.

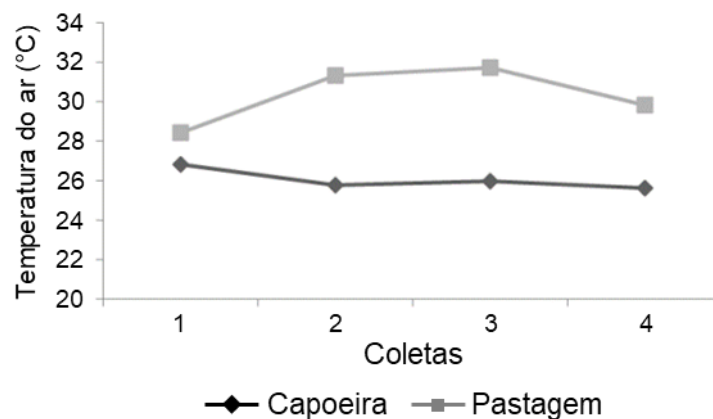
Para avaliar normalidade dos dados de fluxos de CH_4 , N_2O , temperatura, umidade e WFPS, utilizou-se o teste de Kolmogorov–Smirnov. Em seguida, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando significativo, aplicou-se o teste de Tukey a 5% de probabilidade. Análises de regressão linear foram empregadas para identificar relações entre variáveis ambientais e fluxos, com nível de significância de 95%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A temperatura do ar apresentou variações significativas entre os diferentes tipos de uso do solo (Figura 3). A capoeira exibiu valores significativamente menores ($p < 0,05$) quando comparada à agricultura e à pastagem, com médias de $26,0^{\circ}C (\pm 0,2)$, $29,9^{\circ}C (\pm 0,4)$ e $30,3^{\circ}C (\pm 0,7)$, respectivamente. Esse padrão confirma a eficiência da vegetação secundária em manter condições microclimáticas mais amenas, resultado amplamente relatado em ambientes neotropicais devido à maior interceptação de radiação solar, sombreamento e redução da exposição direta do solo (Ismaeel et al., 2024; Silva Junior et al., 2022). Evidências recentes destacam que a regeneração florestal amazônica reduz a carga térmica superficial e estabiliza o balanço energético ao longo do dia, contribuindo para temperaturas mais baixas. Portanto, os resultados observados corroboram a hipótese de que ambientes conservados ou em regeneração atuam como moduladores térmicos importantes (Baker et al., 2025; Lobato et al., 2024).



Figura 3. Temperatura média do ar nas áreas de pastagem e capoeira.



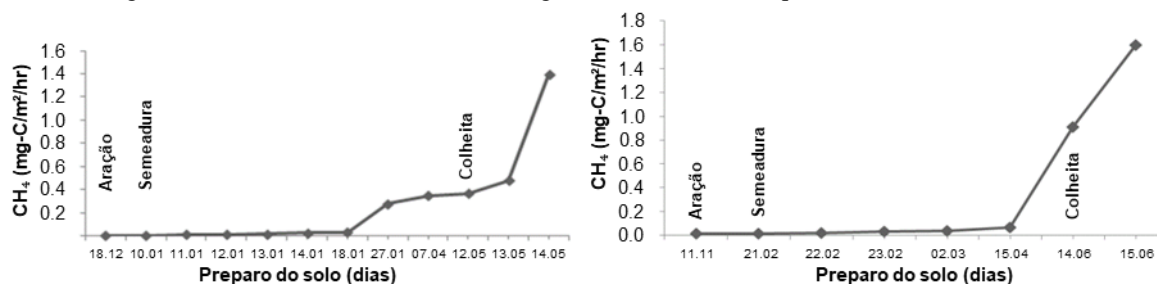
Fonte: Autores.

A temperatura do solo seguiu tendência semelhante à observada no ar (Figura 3). As temperaturas médias foram significativamente menores na capoeira ($24,95^{\circ}\text{C} \pm 0,1$) em comparação à pastagem ($28,6^{\circ}\text{C} \pm 0,7$) e à área agrícola ($28,8^{\circ}\text{C} \pm 0,3$). Solos expostos, compactados ou com baixa cobertura vegetal acumulam mais calor, elevando a temperatura e reduzindo a umidade, fatores que influenciam diretamente a difusão de gases e o metabolismo microbiano responsável pelos fluxos de CH_4 e N_2O (Cugler et al., 2024; Moraes et al., 2025). Assim, os resultados reforçam a ideia de que a estrutura da cobertura vegetal modula os principais controles ambientais sobre o comportamento biogeoquímico dos solos, confirmando parcialmente a hipótese de que a conversão florestal altera significativamente o microambiente edáfico e, consequentemente, seus fluxos gasosos.

Nos sistemas agrícolas avaliados, particularmente nas áreas cultivadas com soja em plantio direto (B112T1 e B129T9), observou-se um aumento significativo dos fluxos de CH_4 durante o período de colheita (Figura 4). Na área B112T1, os fluxos variaram de $0,0032 \pm 0,0016$ a $1,3962 \pm 0,91 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, evidenciando uma forte resposta às mudanças fenológicas e ao aporte de resíduos vegetais ao solo. No transecto B129T9, o teste de Tukey ($p < 0,05$) revelou diferenças importantes entre os períodos de desenvolvimento da cultura, com a colheita apresentando os maiores valores. Padrões semelhantes foram relatados em sistemas de soja tropicais, onde o acúmulo de resíduos orgânicos aumenta a disponibilidade de carbono lábil, intensificando a metanogênese, especialmente em microambientes anóxicos formados durante a decomposição (Alves et al., 2022; Shivran et al., 2023).



Figura 4. Fluxo de metano nas áreas de agricultura B112T1 (esquerda) e B119T9 (direita).



Fonte: Autores.

Essa intensificação dos fluxos próximos à colheita pode estar relacionada à combinação entre: (i) maior temperatura do solo; (ii) aumento no teor de matéria orgânica superficial; (iii) maior atividade microbiana e; (iv) variações na umidade do solo que favorecem a metanogênese.

Esses mecanismos têm sido documentados em sistemas agrícolas amazônicos, onde a dinâmica hidrotérmica do solo e a disponibilidade de substrato orgânico exercem forte controle sobre as comunidades metanogênicas e metanotróficas (Souza et al., 2022; Venturini et al., 2022). Os resultados reforçam a hipótese de que áreas agrícolas apresentam maior instabilidade nos fluxos de CH₄, especialmente nas fases fenológicas finais.

Os fluxos de N₂O também apresentaram variações importantes ao longo do ciclo da soja. Na área B112T1 (plantio direto), observou-se maior emissão na colheita, indicando que esse período constitui um momento crítico do ciclo agrícola para a liberação de N₂O. O transecto B129T9 apresentou diferenças significativas entre os períodos avaliados ($p < 0,05$), novamente com destaque para a colheita. No sistema convencional (B112T1b), observaram-se pulsos mais intensos de N₂O logo após o plantio, na segunda semana e na colheita, com os maiores valores registrados no final da cultura. Esses padrões são detalhados na Tabela 1, que sintetiza os fluxos médios de N₂O nas distintas fases fenológicas e sistemas de manejo.

Tabela 1. Fluxo médio de Óxido Nitroso (mg-C.m².hr⁻¹) para diferentes coletas e ciclos da soja.

Coletas	N2O B112T1	Erro padrão	N2O B129T9	Erro padrão	N2O B112T1b	Erro padrão
Antes do plantio	18.94a	3.68	11.28a	3.76	32.45ab	14.25
Plantio	23.45a	5.34	45.24ab	7.03	10.6a	3.11
Semana após plantio	24.65a	9.25	31.36ab	8.80	15.56a	4.16
Intermediário	31.38a	5.70	16.12a	1.91	43.80ab	13.92
Colheita	108.23b	30.92	96.57c	20.55	91.55c	29.29

Médias de fluxo seguidas pela mesma letra na coluna não se diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Médias de fluxo seguidas por letras diferentes na coluna se diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Esses resultados confirmam a hipótese de que o manejo agrícola influencia fortemente a dinâmica de N₂O, especialmente devido à combinação entre fertilização nitrogenada, distúrbios físicos do solo e maior disponibilidade de matéria orgânica. A literatura recente atribui os picos



de emissão à intensificação dos processos de nitrificação e desnitrificação em momentos de elevada disponibilidade de nitrogênio mineral e umidade intermediária (Ferland et al., 2024; Huddel et al., 2021; Wang et al., 2021).

Comparando-se os diferentes usos da terra, observa-se que capoeiras apresentam condições ambientais mais estáveis, que tendem a limitar a produção de N_2O e favorecer a oxidação de CH_4 , enquanto pastagens e sistemas agrícolas exibem maior variabilidade térmica, compactação e menor cobertura do solo, fatores que intensificam os fluxos de ambos os gases. Esses resultados são consistentes com estudos que documentam o papel das transições de uso da terra na Amazônia como drivers importantes da mudança na função dos solos, de sumidouros naturais para fontes de gases traço (Kroeger et al., 2021; Moraes et al., 2025).

Assim, o conjunto de resultados permite responder diretamente ao objetivo do estudo: quantificar as trocas gasosas de CH_4 e N_2O em diferentes tipos de cobertura do solo e identificar as variáveis ambientais reguladoras. As hipóteses foram confirmadas parcialmente, demonstrando que:

1. **Áreas convertidas apresentam maior emissão de CH_4 e N_2O — confirmada.**
2. **Capoeiras mantêm microambientes mais estáveis, com menor emissão e maior tendência à oxidação de CH_4 — confirmada.**
3. **A agricultura, particularmente durante a colheita, concentra os maiores pulsos emissivos — amplamente confirmada.**

Por fim, espera-se que os resultados contribuam para o entendimento dos mecanismos biogeoquímicos associados às mudanças no uso da terra na Amazônia e subsidiem estratégias de manejo mais eficientes para mitigar emissões de CH_4 e N_2O em sistemas agrícolas tropicais.

4 CONCLUSÃO

As mudanças no uso e cobertura da terra no oeste do Pará modificaram de maneira significativa os controles ambientais que regulam os fluxos de CH_4 e N_2O entre solo e atmosfera. As áreas de capoeira confirmaram sua função como ambientes ecologicamente mais estáveis, apresentando menores temperaturas do ar e do solo e baixos fluxos dos dois gases, reforçando seu papel como importantes sumidouros de CH_4 no contexto amazônico. Em contraste, as áreas agrícolas e de pastagem demonstraram maior variabilidade microclimática e emissões elevadas, sobretudo durante fases específicas do ciclo agrícola da soja, como a colheita, nas quais o aporte de resíduos vegetais intensificou a atividade microbiana responsável pela produção de CH_4 e N_2O .

Os resultados também evidenciaram que sistemas de manejo, como o plantio direto e o plantio convencional, apresentam comportamentos distintos quanto aos pulsos emissivos, com o plantio convencional mostrando maior instabilidade e picos mais acentuados de N_2O . Esses achados



corroboram a hipótese inicial de que a conversão florestal e a intensificação agrícola alteram profundamente a função ecológica do solo, modificando ambientes originalmente caracterizados pela baixa emissão em potenciais fontes de gases traço.

De forma geral, o estudo demonstra que estratégias de manejo capazes de reduzir distúrbios físicos do solo, manter cobertura vegetal e promover condições mais estáveis de umidade podem contribuir para a mitigação das emissões de CH₄ e N₂O em sistemas agrícolas tropicais. Os resultados apresentados fornecem subsídios técnicos e científicos essenciais para orientar práticas agrícolas sustentáveis e políticas de uso da terra voltadas à redução das emissões de gases de efeito estufa na Amazônia.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS, IMPLICAÇÕES FUTURAS E RECOMENDAÇÕES DE MANEJO

Os resultados demonstraram que a conversão de florestas amazônicas para uso agrícola e pecuário altera significativamente os processos biogeoquímicos do solo, intensificando emissões de CH₄ e N₂O, especialmente em momentos críticos do manejo, como preparo do solo, adubação e colheita. Em contraste, áreas de capoeira mostraram maior estabilidade microclimática e menor emissão de gases traço, reforçando o papel funcional da regeneração secundária na restauração parcial dos serviços ecossistêmicos associados ao solo.

Essas evidências reforçam a necessidade de sistemas produtivos que reduzam distúrbios físicos, mantenham cobertura vegetal e melhorem as condições aeróbicas do solo, especialmente em sistemas de soja e pastagens degradadas. Para avançar na compreensão desses processos e diminuir as incertezas regionais, é essencial ampliar as redes de monitoramento, incorporar variações sazonais e integrar técnicas como sensores automáticos, traçadores isotópicos e modelagem biogeoquímica.

Além das implicações científicas e de políticas públicas, o presente estudo fornece um conjunto de recomendações práticas específicas para agricultores, visando reduzir emissões de CH₄ e N₂O e, simultaneamente, melhorar a produtividade e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas amazônicos:

5.1 RECOMENDAÇÕES DE MANEJO PARA AGRICULTORES

- 1- Manter cobertura vegetal permanente: Utilizar plantas de cobertura adaptadas ao clima amazônico (ex.: braquiária, crotalária, milheto) para reduzir a compactação, melhorar a estrutura do solo e diminuir os fluxos de N₂O associados a ambientes anaeróbicos.
- 2- Adotar plantio direto com rotação diversificada de culturas: O plantio direto reduz perturbações físicas do solo e favorece menor emissão de N₂O em comparação ao plantio convencional. A rotação com espécies não leguminosas evita acúmulos excessivos de nitrogênio mineral no sistema.



- 3- Aprimorar o manejo da adubação nitrogenada: Evitar aplicações únicas e concentradas de N, optando por parcelamento conforme estágios de crescimento da cultura. Priorizar fontes de liberação controlada ou estabilizada, que reduzem picos de nitrificação e desnitrificação.
- 4- Minimizar a compactação do solo: Restringir o tráfego de máquinas a faixas delimitadas. Utilizar implementos mais leves no período chuvoso. Realizar diagnóstico periódico de densidade e porosidade do solo.
- 5- Gerenciar adequadamente os resíduos vegetais: Incorporar gradualmente os resíduos no sistema, evitando camadas espessas que favoreçam pontos de anaerobiose e metanogênese. Em pastagens, distribuir uniformemente o material orgânico para evitar acúmulos localizados.
- 6- Recuperar pastagens degradadas: A degradação aumenta compactação e emissões de gases; recomenda-se integração lavoura-pecuária, adubação corretiva e replantio com espécies de alto vigor.
- 7- Promover sistemas agroflorestais (SAFs) e enriquecimento de capoeiras: Tais sistemas reduzem temperaturas do solo, aumentam sombreamento e diminuem emissões de N_2O e CH_4 , além de gerar renda diversificada.
- 8- Monitorar variáveis ambientais simples e acessíveis: Temperatura do solo, umidade e WFPS podem ser monitorados com sensores de baixo custo, auxiliando no ajuste de práticas de manejo. A adoção dessas práticas tem potencial para reduzir significativamente as emissões de CH_4 e N_2O em sistemas agrícolas amazônicos, aumentar a eficiência do uso de nutrientes e melhorar as condições físicas do solo. Além disso, o conhecimento gerado neste estudo fornece uma base técnica sólida para orientar políticas públicas, programas de recuperação ambiental e estratégias produtivas alinhadas à mitigação climática.



REFERÊNCIAS

- ALVES, K. J. *et al.* Methanogenic communities and methane emissions from enrichments of Brazilian Amazonia soils under land-use change. **Microbiological Research**, v. 265, art. 127178, 2022. DOI: 10.1016/j.micres.2022.127178.
- ARIAS-NAVARRO, C. *et al.* Spatial heterogeneity of soil greenhouse gas fluxes and implications for sampling design: insights from static chamber studies. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 2021. Disponível em: www2.cifor.org.
- BAKER, J. C. A. *et al.* Environmental controls on greenhouse gas fluxes. **Environmental Research Letters**, v. 20, art. 043001, 2025. DOI: 10.1088/1748-9326/adb984.
- CHARTERIS, A. F.; CHADWICK, D. R.; THORMAN, R. E.; VALLEJO, A.; DE KLEIN, C. A. M.; ROCHETTE, P.; CÁRDENAS, L. M. Global Research Alliance N₂O chamber methodology guidelines: recommendations for deployment and accounting for sources of variability. **Journal of Environmental Quality**, v. 49, n. 5, p. 1092–1109, 2020. DOI: 10.1002/jeq2.20126.
- CUGLER, G.; FIGUEIREDO, V.; GAUCI, V.; STAUFFER, T.; PEIXOTO, R. B.; RAO PANGALA, S.; ENRICH-PRAST, A. Analysis of CH₄ and N₂O fluxes in the dry season: influence of soils and vegetation types in the Pantanal. **Forests**, v. 15, n. 12, art. 2224, 2024. DOI: 10.3390/f15122224.
- FERLAND, D. *et al.* Improved nitrogen fertilizer management reduces nitrous oxide emissions. **Science of the Total Environment**, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.xxx.
- GATTI, L. V. *et al.* Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. **Nature**, v. 595, n. 7867, p. 388–393, 2021. DOI: 10.1038/s41586-021-03629-6.
- HAO, Y.; MAO, J.; BACHMANN, C. M. *et al.* Soil moisture controls over carbon sequestration and greenhouse gas emissions: a review. **npj Climate and Atmospheric Science**, v. 8, art. 16, 2025. DOI: 10.1038/s41612-024-00888-8.
- HUDELL, A. *et al.* Nitric and nitrous oxide fluxes from intensifying crop systems in the southern Amazon. Relatório técnico. Belém: IPAM Amazônia, 2021.
- IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Floresta Nacional do Tapajós: plano de manejo**. Belterra, PA: IBAMA, 2004. 373 p.
- INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normas climatológicas**. Brasília: INMET, 2010.
- ISMAEEL, A.; TAI, A. P. K.; SANTOS, E. G. *et al.* Patterns of tropical forest understory temperatures. **Nature Communications**, v. 15, art. 549, 2024. DOI: 10.1038/s41467-024-44734-0.
- KHAN, M. A. W. *et al.* Deforestation impacts network co-occurrence patterns of microbial communities in Amazon soils. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 95, n. 2, art. fyy230, 2019. DOI: 10.1093/femsec/fyy230.
- KROEGER, M. E. *et al.* Rainforest-to-pasture conversion stimulates soil methanogenesis across the Brazilian Amazon. **The ISME Journal**, v. 15, n. 3, p. 658–672, 2021. DOI: 10.1038/s41396-020-00804-x.



LANG, R. *et al.* Mechanisms controlling methane uptake in tropical soil profiles. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 149, art. 107944, 2020.

LI, L.; AWADA, T.; ZHANG, Y.; PAUSTIAN, K. Global land use change and its impact on greenhouse gas emissions. **Global Change Biology**, v. 30, n. 12, e17604, 2024. DOI: 10.1111/gcb.17604.

LOBATO, K. B. M. *et al.* Balanço de energia em floresta, campo natural e área agrícola no município de Humaitá-AM. **Ra'e Ga: O Espaço Geográfico em Análise**, v. 60, p. 45–69, 2024. DOI: 10.5380/raega.v60i0.93097.

MARENGO, J. A. *et al.* Changes in climate and land use over the Amazon region. **Frontiers in Earth Science**, v. 6, 2018. DOI: 10.3389/feart.2018.00228.

MARTIN, S. T. Regeneration of secondary forest following anthropogenic disturbance from 1985 to 2021 for Amazonas, Brazil. **Global Change Biology**, v. 30, n. 10, e17514, 2024. DOI: 10.1111/gcb.17514.

MAZENGO, T. E. R. *et al.* Non-flow-through static (closed chamber) method for sampling of greenhouse gases. **Frontiers in Agronomy**, v. 6, art. 1464495, 2024.

MEYER, K. M. *et al.* Belowground changes to community structure alter methane-cycling dynamics in Amazonia. **Environment International**, v. 145, art. 106131, 2020. DOI: 10.1016/j.envint.2020.106131.

MEYER, K. M. *et al.* Conversion of Amazon rainforest to agriculture alters community traits of methane-cycling organisms. **Molecular Ecology**, v. 26, n. 6, p. 1547–1556, 2017. DOI: 10.1111/mec.14011.

MORAES, L. M. *et al.* Soil greenhouse gas emissions under different land uses in the Eastern Amazon. **Revista Agro@mbiente On-Line**, v. 19, e8578, 2025. DOI: 10.18227/1982-8470ragro.v19i00.8578.

OLIVEIRA JÚNIOR, R. C. de; CORRÊA, J. R. V. **Caracterização dos solos do município de Belterra, Estado do Pará**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2001. 39 p. (Documentos/Embrapa Amazônia Oriental, n. 88).

POORTER, L. *et al.* Functional recovery of secondary tropical forests. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 118, n. 49, e2003405118, 2021. DOI: 10.1073/pnas.2003405118.

PRODES/INPE. **Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal**. Relatório técnico. São José dos Campos: INPE, 2023.

SHI, Y.; WEI, X.; SHENG, L.; YANG, X. Effects of nitrogen fertilization on soil greenhouse gas emissions. **Agronomy**, v. 15, n. 1, art. 115, 2025. DOI: 10.3390/agronomy15010115.

SHIVRAN, M. *et al.* Differential influence of crop residue incorporation on methane production. **The Journal of Agricultural Science**, v. 161, n. 5, p. 669–677, 2023. DOI: 10.1017/S0021859623000631.

SILVA JUNIOR, C. A. d.; LIMA, M.; TEODORO, P. E.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. d.; ROSSI, F. S.; FUNATSU, B. M.; BUTTURI, W.; LOURENÇONI, T.; KRAESKI, A.; PELISSARI, T. D.; MORATELLI, F. A.; ARVOR, D.; LUZ, I. M. d. S.; TEODORO, L. P. R.; DUBREUIL, V.;



TEIXEIRA, V. M. (2022). *Fires Drive Long-Term Environmental Degradation in the Amazon Basin*. **Remote Sensing**, v. 14, n. 2, p. 338. DOI: 10.3390/rs14020338.

SILVA, J. P.; LASSO, A.; LUBBERDING, H. J.; PEÑA, M. R.; GIJZEN, H. J. Biases in greenhouse gases static chamber measurements. **Atmospheric Environment**, v. 109, p. 130–138, 2015. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.02.068.

SOUZA, L. F. de *et al.* Maintaining grass coverage increases methane uptake in Amazonian pasture soils. **Science of the Total Environment**, v. 838, art. 156225, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156225.

TERRABRASILIS/INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Plataforma Terrabrasilis: dados do PRODES – monitoramento do desmatamento da Amazônia Legal**. São José dos Campos: INPE, 2023. Disponível em: <https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/>.

THILAKARATHNA, S. K. *et al.* Priming of soil organic matter and denitrification mediate N₂O production. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 154, p. 108–118, 2021.

VENTURINI, A. M. *et al.* Increased soil moisture intensifies the impacts of forest-to-pasture conversion. **Environmental Research**, v. 212, art. 113139, 2022. DOI: 10.1016/j.envres.2022.113139.

WAGNER-RIDDLE, C.; CONGREVES, K. A.; ABALOS RODRIGUEZ, D.; BERG, A. A.; BROWN, S. E.; AMBADAN, J. T.; GAO, X.; TENUTA, M. Globally important nitrous oxide emissions from croplands induced by freeze–thaw cycles. **Nature Geoscience**, v. 10, n. 4, p. 279–283, 2017. DOI: 10.1038/ngeo2907.

WANG, C. *et al.* Factors that influence nitrous oxide emissions from agricultural soils. **Agronomy**, v. 11, n. 4, art. 770, 2021. DOI: 10.3390/agronomy11040770.

XIA, N. *et al.* Effects of nitrogen addition on soil methane uptake. **Environmental Pollution**, v. 264, art. 114751, 2020. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114751.

ZAMAN, M. *et al.* Methodology for measuring greenhouse gas emissions from agricultural soils. In: ZAMAN, M.; HENG, L.; MÜLLER, C. (org.). **Measuring emission of agricultural greenhouse gases**. Cham: Springer, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-55396-8_2.

ZHANG, Y. *et al.* Soil nitrogen transformation mechanisms under saturated conditions. **Biology and Fertility of Soils**, v. 54, p. 495–507, 2018. DOI: 10.1007/s00374-018-1276-7.

ZHENG, M. *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus additions on soil methane uptake. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 121, p. 3089–3100, 2016. DOI: 10.1002/2016JG003476.

