



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
CAMPUS PETROLINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL

VITÓRIA RODRIGUES DE OLIVEIRA

**EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM AGROECOSSISTEMAS
MULTIFUNCIONAIS PARA CULTIVO DE MELOEIRO AMARELO IRRIGADO
NO SEMIÁRIDO**

PETROLINA

2025

VITÓRIA RODRIGUES DE OLIVEIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade de Pernambuco Campus Petrolina, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais. Área de concentração: Ciência e Tecnologia Ambiental.

Orientadora: Prof. Dra. Diana Signor Deon

Coorientadora: Dra. Alessandra Monteiro Salviano

PETROLINA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

O48e Oliveira, Vitória Rodrigues de.
Emissões de gases de efeito estufa em agroecossistemas multifuncionais para cultivo de meloeiro amarelo irrigado no semiárido / Vitória Rodrigues de Oliveira. – Petrolina: do autor, 2025.
116 p. : PDF.

Orientador: Profa. Dra. Diana Signor Deon.
Coorientador: Dra. Alessandra Monteiro Salviano.
Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade de Pernambuco, *Campus Petrolina*, Petrolina-PE, 2025.

1. *Cucumis melo* L. 2. Gases do efeito estufa. 3. Agricultura sustentável. 4. Solos - Manejo. 5. Caatinga. I. Deon, Diana Signor. II. Salviano, Alessandra Monteiro. III. Universidade de Pernambuco - *Campus Petrolina* - PPGCTA. IV. Título.

CDD 635.611

Ficha Catalográfica elaborada pela Bibliotecária Eliane Batista de Carvalho, CRB 4/2011,
Universidade de Pernambuco – Campus Petrolina.

VITÓRIA RODRIGUES DE OLIVEIRA

EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM AGROECOSSISTEMAS
MULTIFUNCIONAIS PARA CULTIVO DE MELOEIRO AMARELO IRRIGADO NO
SEMIÁRIDO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade de Pernambuco Campus Petrolina, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais. Área de concentração: Ciência e Tecnologia Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Diana Signor Deon

Coorientadora: Dra. Alessandra Monteiro Salviano

Aprovada em: 27/02/2025.

BANCA EXAMINADORA

Dra. Diana Signor Deon (Orientadora)

Embrapa Semiárido

Dra. Regina Lúcia Félix de Aguiar Lima (Membro interno)

Universidade de Pernambuco Campus Petrolina (UPE)

Dra. Nelci Olszewski (Membro externo)

Universidade Federal do Vale do São Francisco Campus Juazeiro (UNIVASF)

PETROLINA

2025

A Deus, que me concedeu o dom da vida,
agradeço por me fortalecer nos desafios e por
me permitir perseverar até alcançar meus
objetivos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, e as bênçãos na minha vida, pela força nos momentos difíceis e, sobretudo, pela luz nos períodos de incerteza, abençoando-me diariamente e colocando em meu caminho pessoas que me fortalecem.

À minha orientadora, Dra. Diana Signor, e minha coorientadora, Dra. Alessandra Monteiro Salviano, pela dedicação, apoio e valiosas orientações, que impulsionaram meu trabalho e me guiaram, especialmente nas etapas mais desafiadoras. Sou imensamente grata pela confiança e parceria ao longo desta jornada. Além da orientação acadêmica, vocês são para mim exemplos de mulheres dedicadas, tanto no âmbito pessoal quanto no profissional, que buscam agir com atenção e excelência, e que inspiram o desejo de, um dia, eu também desenvolver um olhar científico tão sensível e apurado quanto o de vocês. Mesmo orientando vários alunos, vocês mantêm o diferencial de se preocuparem genuinamente conosco, compreendendo que, para que tudo dê certo, precisamos também estar bem. Jamais esquecerei a atenção, o cuidado e o acolhimento que recebi de vocês.

Aos pesquisadores Dr. José Mauro, Dr. Welson Simões, pelo apoio e parceria, bem como ao Dr. Magnus, pela disponibilidade em colaborar com a realização deste trabalho.

À toda minha família, em especial à minha “mainha” Marinalva, ao meu paidrasto João, ao meu “painho” Bernardino, aos meus irmãos Maysa, Joãozito, Ana Clara, Bárbara, Victor Gabriel e Vinícius, e à minha madrasta Antonia. Bem como ao meu amor, meu namorado, Mikael Santos. A todos, meu agradecimento pelo amor, todo amor, pela parceria, ensinamentos e pela paciência ao longo da minha jornada acadêmica. Agradeço não apenas pela compreensão nos momentos em que estive ausente fisicamente e até mesmo distante para uma ligação tranquila, sem tempo cronometrado, mas também pelo esforço sincero em tentar compreender, mesmo quando isso não era fácil - mainha segurando o choro de saudade (te amo minha vida), meus irmãos e Paidastros sempre esperando por mais uma ida até em casa, Mikael por sempre mandar mensagem perguntando se eu estava focada, se estava fluindo... Talvez vocês não saibam a imensidão do meu amor e da minha gratidão a Deus por ter cada um de vocês na minha vida.

À minha amiga Márcia Vitória, pela parceria, acolhimento e pelas essenciais trocas de conhecimento, no ambiente de trabalho e, sobretudo, fora dele, caminhando comigo na construção de uma trajetória enriquecedora e significativa. Agradeço a todas as vezes que me recebeu em sua casa, para juntas trabalhamos nas diferentes fases da nossa pesquisa.

Agradeço também pelo acolhimento e compreensão de Joyce e Clara, obrigada meninas, pelo apoio, por tudo!

Aos meus colegas e amigos, em especial a Kaio Vinicius, que sempre me incentivou e profetizou nossas conquistas. Desde que o conheci, foi uma das pessoas que mais acreditou no meu potencial, e sempre tivemos uma relação de apoio mútuo. Em uma das fases mais importantes e desafiadoras da minha vida acadêmica, ele me estendeu a mão e foi fundamental para que eu seguisse em frente e fizesse acontecer. A Alexia e Tailane, minhas amigas e parceiras desde a graduação, somados anos de amizade e companheirismo acadêmico/profissional. Bem como Bruna Barbosa pela parceria ao longo de toda essa etapa acadêmica, inclusive desenvolvendo as atividades de campo/projeto junto comigo e Márcia, no qual juntas formamos um trio de excelência.

À Jaqueline, Hélio, Manoel, Alexandre, Nel, Cláudio, Francisco, Hebert, Dra. Salete e a todos os funcionários dos laboratórios e demais setores da Embrapa Semiárido, incluindo o pessoal da limpeza, como costumo carinhosamente chamar. Sou grata pelos ensinamentos fundamentais para a realização das análises desta pesquisa e pela convivência diária tão enriquecedora.

Agradeço aos funcionários de campo: Luis Henrique, Ivanildo, Gian Carlos, Gui, Severino, Zé Carlos e aos demais que sempre nos acolheram com atenção e boa vontade.

Estendo meus agradecimentos a todos os funcionários do setor de transporte, especialmente ao senhor Amaral, que sempre se dedicou a nos ajudar da melhor forma possível. Ele esteve presente em quase toda a fase de campo, chegando a ajustar os horários de retorno de Bebedouro para a sede, compreendendo que nosso trabalho frequentemente exigia mais tempo. Agradeço também pelos momentos de dedicação, pelas conversas sobre fé e pela troca de mensagens edificantes sobre o Senhor nosso Deus, nosso Pai. Registro aqui, com carinho e respeito, minha gratidão in memoriam ao motorista Neri, pelos valiosos ensinamentos que compartilhou.

À Ana Paula e à Tati, agradeço pelas experiências divididas em relação ao trabalho com colegas e às análises de gases de efeito estufa, bem como por todas as contribuições diretas para a realização deste trabalho.

Aos amigos de longa data e aos colegas da equipe, Jucicléia, Layana, Wesley, Ítalla, Angela Liriel, Maria Bianca, Paloma, Andressa, Vinicius Gonçalves, Pablo, Osmar, Ana Flávia, Jéssica Matos, Letícia, Vinicius Amorim e Jéssica Ellen, minha gratidão pela convivência, colaboração e por compartilharem comigo momentos de exaustão e descontração ao longo dessa jornada.

Agradeço também a todos os colegas que contribuíram durante as fases de curso das disciplinas e com quem construí relações baseadas em apoio, incentivo e admiração, com um agradecimento especial à Laila Açucena.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, sou grata pela oportunidade de crescimento acadêmico e pessoal, pelo ambiente de aprendizado, pelas melhorias contínuas e pela eficiência no atendimento aos discentes, além do esforço em ampliar as oportunidades oferecidas.

À FACEPE, agradeço a concessão da bolsa, que foi indispensável para o desenvolvimento desta pesquisa e para a continuidade dos meus estudos.

À Embrapa Semiárido, agradeço pelo suporte técnico e pela estrutura disponibilizada, que foram essenciais para a execução deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, me apoiaram, acreditaram em mim e me encorajaram a dar o meu melhor, da melhor forma possível, para a concretização de mais esta conquista.

Meus mais sinceros agradecimentos!

Aquilo que persistimos em fazer torna-se mais fácil de realizar. Não porque a natureza da coisa muda, mas porque nossa capacidade aumenta.

(Ralph Waldo Emerson)

RESUMO

As mudanças climáticas representam desafios à agricultura. Nesse contexto, é crucial desenvolver práticas que aumentem a resiliência e garantam a sustentabilidade dos sistemas de produção a longo prazo. O objetivo deste trabalho foi determinar o fator de emissão de N_2O do nitrato de cálcio ($(CaNO_3)_2$) e monitorar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) no cultivo do meloeiro amarelo em agroecossistemas multifuncionais sustentáveis no Semiárido, relacionando-as com fatores edafoclimáticos. A dissertação está organizada em três capítulos: a) revisão sistemática sobre o potencial de mitigação de GEE em cultivos sustentáveis em regiões semiáridas; b) emissões de GEE em agroecossistemas multifuncionais para cultivo de meloeiro amarelo irrigado no semiárido; e c) fatores de emissão de óxido nitroso por fertilizante nitrogenado em sistemas conservacionistas em região semiárida. A revisão sistemática PRISMA, realizada nas bases Web of Science e Scopus, indicou que o plantio direto, isolado ou combinado a outras práticas, pode reduzir em até 26,3% as emissões de GEE, comparado ao solo revolvido. Os dados do segundo capítulo foram obtidos em experimento de longa duração com seis modelos de agroecossistemas em desenvolvimento pela Embrapa Semiárido, baseados em dois sistemas de manejo (com – CR e sem revolvimento – SR) e três misturas de plantas: MP1 (79% leguminosas, 21% gramíneas e oleaginosas), MP2 (70% gramíneas e oleaginosas, 30% leguminosas) e MP3 (vegetação espontânea). Incluiu-se um tratamento controle com o sistema convencional da região. Os tratamentos CR apresentaram maior emissão de GEE por tonelada de melão produzido, e MP1 esteve associada aos maiores fluxos de CO_2 , resultando em maior proporção total de GEE por tonelada de fruto. Os fatores mais relevantes na diferenciação dos sistemas foram o preparo do solo, a adição de fitomassa aérea das plantas de cobertura e os atributos químicos do solo. A combinação MP3SR, com deposição de biomassa de plantas espontâneas antes do transplantio, mostrou-se uma prática recomendada, por reduzir as emissões e os custos de produção. No terceiro capítulo, amostras de solo do experimento foram incubadas com três doses de $(CaNO_3)_2$ (0, 100 e 300 $mg\ kg^{-1}$). O N_2O foi amostrado aos 3, 7, 15, 21, 28, 42 e 59 dias após a aplicação do fertilizante. Os fluxos foram mais intensos nos primeiros sete dias. As emissões acumuladas variaram linearmente com a dose de N apenas nos tratamentos SR, sendo mais altas em MP3, seguidas de MP1 e MP2. Para a maior dose, os fatores de emissão foram inferiores aos do IPCC: 0,74 (CR) e 1,16 (SR).

Palavras-chave: gases de efeito estufa; *Cucumis melo L*; plantio direto; culturas de cobertura, nitrato de cálcio.

ABSTRACT

Climate change poses challenges to agriculture. In this context, it is crucial to develop practices that increase resilience and ensure the long-term sustainability of production systems. The objective of this work was to determine the N₂O emission factor of calcium nitrate ((CaNO₃)₂) and monitor greenhouse gas (GHG) emissions from yellow melon cultivation in sustainable multifunctional agroecosystems in the semiarid region, relating them to edaphoclimatic factors. The dissertation is organized into three chapters: a) systematic review on the GHG mitigation potential in sustainable crops in semiarid regions; b) GHG emissions in multifunctional agroecosystems for irrigated yellow melon cultivation in the semiarid region; and c) nitrous oxide emission factors from nitrogen fertilizer in conservation systems in the semiarid region. The PRISMA systematic review, conducted in the Web of Science and Scopus databases, indicated that direct planting, alone or combined with other practices, can reduce GHG emissions by up to 26.3%, compared to tilled soil. The data in the second chapter were obtained in a long-term experiment with six agroecosystem models under development by Embrapa Semiárido, based on two management systems (with – CR and without tillage – SR) and three plant mixtures: MP1 (79% legumes, 21% grasses and oilseeds), MP2 (70% grasses and oilseeds, 30% legumes) and MP3 (spontaneous vegetation). A control treatment with the conventional system of the region was included. The CR treatments presented higher GHG emissions per ton of melon produced, and MP1 was associated with higher CO₂ fluxes, resulting in a higher total proportion of GHG per ton of fruit. The most relevant factors in differentiating the systems were soil preparation, addition of aboveground phytomass from cover crops, and soil chemical attributes. The combination of MP3SR with deposition of biomass from spontaneous plants before transplanting proved to be a recommended practice, as it reduced emissions and production costs. In the third chapter, soil samples from the experiment were incubated with three doses of (CaNO₃)₂ (0, 100, and 300 mg kg⁻¹). N₂O was sampled at 3, 7, 15, 21, 28, 42, and 59 days after fertilizer application. Fluxes were more intense in the first seven days. Cumulative emissions varied linearly with the N dose only in the SR treatments, being highest in MP3, followed by MP1 and MP2. For the highest dose, the emission factors were lower than those of the IPCC: 0.74 (CR) and 1.16 (SR).

Keywords: greenhouse gases; *Cucumis melo L*; no-tillage; cover crops, calcium nitrate.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

2 ARTIGO: POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA POR CULTIVOS SUSTENTÁVEIS EM REGIÕES SEMIÁRIDAS: UMA REVISÃO PRISMA

Quadro 1 - Critérios de inclusão e exclusão dos registros, acompanhados de suas respectivas justificativas.....

22

Esquema 2 - Etapas de identificação e seleção dos estudos para Revisão Sistemática PRISMA..... 24

Gráfico 3 - Distribuição anual das publicações incluídas no estudo.....

25

Gráfico 4 - Distribuição percentual de artigos por país de realização do estudo.....26

Quadro 5 - Espécies identificadas nos artigos relacionadas às diferentes práticas sustentáveis de manejo do solo.....

28

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Gráfico 1 - Médias de temperatura - T (°C) e valores de evapotranspiração – ET₀ (mm), precipitação – P (mm) e irrigação – I (mm) do agroecossistema 2023.....70

Figura 2 - Croqui do experimento de agroecossistemas multifuncionais para cultivo do meloeiro amarelo.....71

4 ARTIGO: EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA E QUALIDADE QUÍMICA DO SOLO EM AGROECOSSISTEMAS MULTIFUNCIONAIS PARA CULTIVO DE MELOEIRO AMARELO IRRIGADO NO SEMIÁRIDO

Figura 1 - Médias de temperatura - T (°C) e valores de evapotranspiração – ET₀ (mm), precipitação – P (mm) e irrigação – I (mm) do agroecossistema 2023.....78

Figura 2 - Croqui do experimento de agroecossistemas multifuncionais para cultivo do meloeiro amarelo.....	79
Figura 3 - Fluxos de CO ₂ ao longo do ciclo de cultivo de agroecossistemas multifuncionais de produção de melão amarelo em um Argissolo Vermelho-Amarelo, em Petrolina – PE.....	85
Figura 4 - Fluxos de CH ₄ ao longo do ciclo de cultivo de agroecossistemas multifuncionais de produção de melão amarelo em um Argissolo Vermelho-Amarelo, em Petrolina – PE.....	87
Figura 5 - Fluxos de N ₂ O ao longo do ciclo de cultivo de agroecossistemas multifuncionais de produção de melão amarelo em um Argissolo Vermelho-Amarelo, em Petrolina – PE.....	88
Figura 6 – Matriz de correlação linear de Pearson entre os fluxos de CO ₂ , CH ₄ e N ₂ O e variáveis ambientais e de manejo monitoradas no período experimental.....	93

5 ARTIGO: FATORES DE EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO POR FERTILIZANTE NITROGENADO EM SISTEMAS CONSERVACIONISTAS NA REGIÃO SEMIÁRIDA

Figura 1 - Fluxos de N ₂ O, em condições controladas, em função de doses de nitrato de cálcio aplicadas em solos de agroecossistemas multifuncionais sustentáveis em um Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico plíntico.....	105
--	-----

LISTA DE TABELAS

2 ARTIGO: POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA POR CULTIVOS SUSTENTÁVEIS EM REGIÕES SEMIÁRIDAS: UMA REVISÃO PRISMA

Tabela 1 - Distribuição dos artigos por prática sustentável de manejo do solo nos artigos revisados.....	26
Tabela 2 - Principais gases avaliados nos estudos revisados.....	29
Tabela 3 - Métodos de coleta de gases de efeito estufa citados nos artigos incluídos na revisão.....	30
Tabela 4 - Potencial de mitigação dos GEE por práticas sustentáveis.....	37

4 ARTIGO: EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA E QUALIDADE QUÍMICA DO SOLO EM AGROECOSSISTEMAS MULTIFUNCIONAIS PARA CULTIVO DE MELOEIRO AMARELO IRRIGADO NO SEMIÁRIDO

Tabela 1 - Caracterização do solo antes da condução do experimento referente ao ciclo do agroecossistema 2023	77
Tabela 2 - Doses de fertilizantes (kg ha ⁻¹) aplicadas via fertirrigação durante o cultivo do meloeiro amarelo nos tratamentos dos agroecossistemas (MP1, MP2 e MP3, com e sem revolvimento)	81
Tabela 3 - Resumo da análise de variância dos fluxos de CO ₂ , CH ₄ e N ₂ O em agroecossistemas multifuncionais de produção de melão amarelo em um Argissolo Amarelo, em Petrolina - PE, para duas épocas do ciclo (cultivo e manejo das plantas de cobertura e cultivo do meloeiro amarelo)	83
Tabela 4 - Fluxos de CO ₂ ao longo do ciclo de cultivo de agroecossistemas multifuncionais de produção de melão amarelo em um Argissolo Vermelho-Amarelo, em Petrolina -PE.....	84
Tabela 5 - Fluxos médios de CO ₂ em função das plantas de cobertura de agroecossistemas multifuncionais de produção de melão amarelo em um Argissolo Vermelho-Amarelo em Petrolina -PE.....	86

Tabela 6 - Emissões cumulativas de CO ₂ , CH ₄ e N ₂ O, CO ₂ -equivalente durante o período de cultivo dos agroecossistemas, produtividade comercial do melão e a relação entre emissão total e produtividade. Petrolina-PE, 2023.....	90
Tabela 7 - Coordenadas fatoriais das variáveis, com base em correlações e autovalores da matriz de correlação e estatísticas relacionadas.....	91
Tabela 8 - Médias das variáveis para cada grupo formado pela ACP.....	94

5 ARTIGO: FATORES DE EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO POR FERTILIZANTE NITROGENADO EM SISTEMAS CONSERVACIONISTAS NA REGIÃO SEMIÁRIDA

Tabela 1 -Caracterização química de um Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico plântico (0-10 cm), após 12 ciclos de cultivo irrigado de meloeiro amarelo em agroecossistemas multifuncionais, 2023.....	103
Tabela 2 - Ajustes lineares das emissões de N ₂ O por um Argissolo Vermelho-Amarelo em função da aplicação de doses de nitrato de cálcio.....	106
Tabela 3 - Fatores de emissão de N ₂ O em função da aplicação de doses de nitrato de cálcio em um Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico plântico sob dois sistemas de manejo.....	107

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA POR CULTIVOS SUSTENTÁVEIS EM REGIÕES SEMIÁRIDAS: UMA REVISÃO PRISMA.....	20
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	70
4	ARTIGO: EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA E QUALIDADE QUÍMICA DO SOLO EM AGROECOSSISTEMAS MULTIFUNCIONAIS PARA CULTIVO DE MELOEIRO AMARELO IRRIGADO NO SEMIÁRIDO.....	74
5	ARTIGO: FATORES DE EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO POR FERTILIZANTE NITROGENADO EM SISTEMAS CONSERVACIONISTAS NA REGIÃO SEMIÁRIDA.....	103
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	112
	REFERÊNCIAS.....	113

1 INTRODUÇÃO

A produção de melão no Brasil desempenha um papel fundamental no desenvolvimento socioeconômico na agricultura irrigada, especialmente no Semiárido, com destaque para as regiões de Mossoró-Chapada do Apodi e do Submédio do Vale do São Francisco. Em 2023, o Brasil manteve-se como um dos maiores produtores e exportadores de melão do mundo, com a produção estimada em cerca de 644 mil toneladas, sendo projetado um aumento significativo de 28,7% até 2032/2033, conforme as estimativas do Ministério da Agricultura (MAPA, 2023). A maior parte dessa produção, cerca de 92%, ocorre na região Nordeste, especialmente nos estados do Rio Grande do Norte, Pernambuco e Bahia (IBGE, 2023). Ainda segundo o IBGE (2023), o Brasil registrou crescimento contínuo no mercado internacional, com as exportações de melão alcançando US\$69 milhões em receita no primeiro semestre.

Embora a adubação química apresente benefícios para a agroindústria, como o aumento da produtividade das culturas e a melhoria da qualidade dos frutos, fornecendo nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente, promovendo o aumento das safras e contribuindo para segurança alimentar e a sustentabilidade ambiental, o sistema intensivo de produção de melão, associado à alta demanda de fertilizantes sintéticos, água para irrigação e ao manejo intensivo de maquinários, tem gerado impactos ambientais negativos significativos, dentre os quais se destacam o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE), diretamente relacionada ao manejo do solo e ao uso de fertilizantes nitrogenados. Em 2019, as emissões globais de GEE aumentaram 12% em relação a 2010, reforçando a necessidade de práticas de manejo sustentável do solo para mitigar os efeitos das mudanças climáticas (IPCC, 2023).

Considerando a necessidade da produção agrícola sustentável, a Embrapa e seus parceiros desenvolveram, nos últimos 14 anos, modelos de agroecossistemas multifuncionais que incluíram maior sustentabilidade ao sistema de produção agrícola para a fruticultura irrigada no Semiárido (Giongo *et al.*, 2021a). Esses agroecossistemas foram planejados para incorporar culturas de cobertura plantadas anualmente como adubação verde antes do cultivo de espécies comerciais, incluindo o meloeiro (*Cucumis melo* L.), sendo conduzidos sob dois manejos distintos: com e sem revolvimento anual do solo para incorporação dos resíduos vegetais (Giongo *et al.*, 2021b). Estes modelos de agroecossistemas promovem o aumento do estoque de carbono (C) no solo (Giongo *et al.*, 2021a), contribuindo para a conservação da biodiversidade (Freitas, 2018) e prestação de outros serviços ecossistêmicos, como melhoria

da qualidade do solo e do ar, regulação do clima, polinização e outros (Santos *et al.*, 2018; Giongo *et al.*, 2021a).

A qualidade química do solo é diretamente influenciada pelos sistemas de manejo adotados (Freitas *et al.*, 2017), sendo definida principalmente pela composição e disponibilidade de nutrientes essenciais, pH, capacidade de troca catiônica (Cardoso *et al.*, 2013) indicadores que, quando alterados, podem comprometer a fertilidade do solo, e prejudicar o cultivo agrícola. Estudos destacam que práticas como o plantio direto, o uso de plantas de cobertura e a aplicação racional de adubos químicos têm promovido melhorias significativas nos atributos químicos do solo, incluindo pH, aumentos no teor de matéria orgânica, de cálcio, de magnésio e de capacidade de troca catiônica (CTC) (Castilho *et al.*, 2017; Fernandes; Tejo; Arruda, 2019). No caso do plantio direto, a presença de resíduos de plantas na superfície do solo contribui para a retenção de nutrientes e redução da acidez do solo, além de promover a ciclagem de nutrientes essenciais, como fósforo e potássio (Silva *et al.*, 2017) e reduzir o processo de erosão hídrica. Essas práticas, quando combinadas com culturas de cobertura como crotalária e milheto, adaptadas às condições das regiões do Norte e Nordeste, potencializam o fornecimento de matéria orgânica e a fixação biológica de nitrogênio (Nascimento *et al.*, 2020), favorecendo melhorias nas características do solo, como a saturação por bases, e tornando-o mais adequado para cultivos subsequentes. Dessa forma, estratégias conservacionistas são fundamentais para garantir a sustentabilidade e a produtividade agrícola a longo prazo.

Com isso, a presente pesquisa busca compreender como o uso de misturas de plantas de cobertura para adubação verde e de diferentes tipos de manejo do solo (com e sem revolvimento) influenciam a qualidade do solo e as emissões de GEE no cultivo do meloeiro amarelo irrigado no Semiárido. Como hipótese, considera-se que a melhoria da qualidade do solo depende da composição das misturas de plantas de cobertura e do tipo de manejo, sendo que o revolvimento reduz sua qualidade e aumenta as emissões de GEE.

O objetivo geral desta dissertação foi determinar os fatores de emissão de óxido nitroso (N_2O) de fertilizantes nitrogenados e monitorar as emissões de gases de efeito estufa no cultivo do meloeiro amarelo em agroecossistemas multifuncionais sustentáveis no Semiárido brasileiro. Para alcançar esse objetivo, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Realizar levantamento bibliográfico sobre práticas agrícolas sustentáveis aplicadas em regiões semiáridas e suas relações com a emissão de gases de efeito estufa provenientes do solo;

- b) Estudar as emissões de gases de efeito estufa do solo em cultivos sustentáveis de meloeiro;
- c) Avaliar a qualidade química do solo nos agroecossistemas multifuncionais estudados e identificar sua relação com a emissão de gases de efeito estufa emitidos pelo solo nos agroecossistemas multifuncionais estudados;
- d) Estudar as emissões de N₂O em função da aplicação de diferentes doses de nitrato de cálcio aplicadas em solos cultivados utilizando modelos de agroecossistemas multifuncionais sustentáveis para cultivo de melão amarelo no Semiárido.

Esta dissertação está estruturada em seis partes principais: introdução, revisão sistemática, procedimentos metodológicos, dois artigos científicos que apresentam os resultados da pesquisa e as considerações finais. A introdução apresenta a contextualização do tema, a problemática, a hipótese e os objetivos, abordando a importância da agricultura de conservação e destacando os agroecossistemas multifuncionais como uma alternativa sustentável para a produção agrícola e para a mitigação dos gases de efeito estufa (GEE) em regiões semiáridas.

A segunda parte consiste na revisão sistemática da literatura, organizada como o primeiro capítulo da dissertação. Esta revisão foi conduzida conforme a metodologia PRISMA e tem como foco o potencial de mitigação dos GEE por meio de práticas agrícolas sustentáveis em regiões semiáridas, oferecendo a base teórica para os capítulos seguintes.

Na terceira parte, são apresentados os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa, com a descrição do delineamento experimental, dos manejos do solo e das misturas de plantas de cobertura utilizadas, bem como os métodos de coleta de dados e as análises estatísticas realizadas.

O segundo capítulo, que corresponde à quarta parte da dissertação, é composto por um artigo que avalia as emissões de GEE (CO₂, CH₄ e N₂O) e a qualidade química do solo em agroecossistemas multifuncionais para o cultivo de meloeiro amarelo irrigado, considerando três diferentes composições de misturas de plantas de cobertura e dois tipos de manejo do solo (com e sem revolvimento), conduzidos na região semiárida do Vale do São Francisco, no município de Petrolina – PE.

A quinta parte é composta pelo terceiro capítulo, que apresenta os resultados de um experimento de incubação em laboratório, no qual foi determinado o fator de emissão de N₂O associado a diferentes doses de nitrato de cálcio aplicadas ao solo, com o objetivo de subsidiar estimativas mais precisas para sistemas conservacionistas no Semiárido.

Por fim, na sexta parte, são apresentadas as considerações finais, que sintetizam os principais achados da pesquisa, discutem suas implicações para a sustentabilidade da produção agrícola e sugerem caminhos para investigações futuras sobre o manejo do solo e a mitigação das emissões agrícolas de GEE.

2 POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA POR CULTIVOS SUSTENTÁVEIS EM REGIÕES SEMIÁRIDAS: UMA REVISÃO PRISMA

POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA POR CULTIVOS SUSTENTÁVEIS EM REGIÕES SEMIÁRIDAS: UMA REVISÃO PRISMA

POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA POR CULTIVOS SUSTENTÁVEIS EM REGIÕES SEMIÁRIDAS: UMA REVISÃO PRISMA

Vitória Rodrigues de Oliveira¹
Márcia Vitória de Macedo²
Alessandra Monteiro Salviano³
José Mauro da Cunha e Castro⁴
Diana Signor⁵

RESUMO

Se por um lado a agricultura tem importância nas emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), por outro está sujeita aos impactos das mudanças climáticas. A presente pesquisa utiliza a metodologia PRISMA para realizar uma revisão sistemática das emissões de GEE em cultivos sustentáveis em regiões semiáridas, com o objetivo de compreender as relações entre práticas agrícolas sustentáveis e a produção de GEE em regiões semiáridas, avaliando a capacidade dessas práticas em mitigar as emissões de gases provenientes do solo. A busca sistemática foi realizada nas bases de dados Web of Science e Scopus, utilizando descritores específicos e operadores booleanos: ("sustainable melon agroecosystem" OR "sustainable agroecosystem" OR "agroecosystem" OR "no-tillage" OR "cover-crops") AND ("nitrous oxide" OR "carbon dioxide" OR "methane" OR "greenhouse gas") AND ("semi-arid"). Foram identificados 129 registros (2020-2024), abrangendo artigos, dos quais 21 atenderam aos critérios de inclusão. O N₂O foi o gás mais investigado, seguido por CO₂ e CH₄. A técnica de coleta e análise mais empregada foi o uso de câmaras estáticas associada à cromatografia gasosa. O sistema de plantio direto, tanto isolado quanto associado a outras práticas, foi apontado como uma eficiente opção para a redução na emissão de GEE em regiões semiáridas, com reduções de até 26,3% nas emissões em solos não revolvidos quando comparados a solos submetidos ao revolvimento. Práticas como a aplicação de biocarvão, a

1 Discente do Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade de Pernambuco *Campus* Petrolina. *E-mail*: oliveiravr812@gmail.com

2 Discente do Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade de Pernambuco *Campus* PVetrolina. *E-mail*: marciavitoriademacedo@gmail.com

3 Pesquisadora Embrapa Solos - UEP Recife, Pernambuco. *E-mail*: alessandra.salviano@embrapa.br

4 Pesquisador Embrapa Soja, Londrina, Paraná. *E-mail*: mauro.castro@embrapa.br

5 Pesquisadora Embrapa Semiárido e docente do Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade de Pernambuco *Campus* Petrolina. *E-mail*: diana.signor@embrapa.br

compostagem, o ajuste da dose de nitrogênio, entre outras, também demonstraram efetividade na redução das emissões de GEE.

Palavras-chave: óxido nitroso, dióxido de carbono, metano, sistema de plantio direto.

ABSTRACT

While agriculture is important for global greenhouse gas (GHG) emissions, it is also subject to the impacts of climate change. This research uses the PRISMA methodology to conduct a systematic review of GHG emissions from sustainable crops in semiarid regions, with the aim of understanding the relationships between sustainable agricultural practices and GHG production in semiarid regions, assessing the capacity of these practices to mitigate greenhouse gas emissions from the soil. The systematic search was carried out in the Web of Science and Scopus databases, using specific descriptors and Boolean operators: ("sustainable melon agroecosystem" OR "sustainable agroecosystem" OR "agroecosystem" OR "no-tillage" OR "cover-crops") AND ("nitrous oxide" OR "carbon dioxide" OR "methane" OR "greenhouse gas") AND ("semi-arid"). A total of 129 records (2020-2024) were identified, including articles, of which 21 met the inclusion criteria. N₂O was the most investigated gas, followed by CO₂ and CH₄. The most widely used collection and analysis technique was the use of static chambers associated with gas chromatography. The no-till system, both isolated and associated with other practices, was identified as an efficient option for reducing GHG emissions in semiarid regions, with reductions of up to 26.3% in emissions in undisturbed soils when compared to soils subjected to disturbed soils. Practices such as the application of biochar, composting, adjustment of nitrogen dose, among others, also demonstrated effectiveness in reducing GHG emissions.

Keywords: nitrous oxide, carbon dioxide, methane, no-till system.

INTRODUÇÃO

Segundo dados do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), a temperatura global entre 2011 e 2020 foi cerca de 1,09°C superior à média do período de 1850-1900, o que se deve ao aumento das concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera em decorrência de atividades antrópicas. Em 2019, as concentrações atmosféricas dos três principais GEE (CO₂, CH₄ e N₂O) foram iguais a, respectivamente, 410 ppm (partes por milhão), 1.866 ppb (partes por bilhão) e 332 ppb, o que representa as maiores concentrações dos últimos 800.000 anos. Em 2019, aproximadamente 79% das emissões globais de GEE tiveram origem nos setores de energia, indústria, transporte e construção, enquanto 22% foram provenientes de agricultura, floresta e outros usos da terra (IPCC, 2023).

Embora, em termos globais, a agricultura não seja um grande emissor de GEE, em países com grandes áreas cultivadas, a contribuição da agricultura para as emissões nacionais de GEE é mais representativa. No Brasil, em 2023, cerca de 27,5% das emissões nacionais foram provenientes da agricultura e 46,2% tiveram origem na mudança de uso da terra (SEEG, 2024).

Esse aumento nas emissões de GEE afeta diretamente o fenômeno do efeito estufa, o qual, embora seja um processo natural e essencial para a manutenção da temperatura média global em uma faixa adequada para a manutenção das formas de vida que conhecemos no planeta Terra, se intensificado pode gerar consequências sociais, econômicas e ambientais muito negativas (Signor e Moraes, 2021). Estes impactos, embora de ampla ocorrência em todo o planeta, serão mais intensos em regiões áridas e semiáridas.

Assim, considerando a importância da agricultura nas emissões globais de gases de efeito estufa, bem como o impacto das mudanças climáticas globais para a agricultura de regiões semiáridas, a presente pesquisa utiliza a metodologia PRISMA para sistematizar o conhecimento sobre as emissões de GEE em cultivos sustentáveis em regiões semiáridas. O objetivo é compreender as relações entre práticas agrícolas sustentáveis e a produção de GEE em regiões semiáridas, avaliando a capacidade dessas práticas em mitigar as emissões de gases provenientes do solo. A pergunta de pesquisa é: a implantação de práticas agrícolas sustentáveis pode reduzir as emissões de gases de efeito estufa em solos cultivados de regiões semiáridas?

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo seguiu as diretrizes do PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para garantir uma revisão sistemática e rigorosa. A busca sistemática foi realizada nas bases de dados eletrônicas Web of Science e Scopus, utilizando descritores específicos e operadores booleanos para selecionar estudos relevantes. Descritores utilizados: ("sustainable melon agroecosystem" OR "sustainable agroecosystem" OR "agroecosystem" OR "no-tillage" OR "cover-crops") AND ("nitrous oxide" OR "carbon dioxide" OR "methane" OR "greenhouse gas") AND ("semi-arid"). Esses descritores deveriam estar presentes no título, no resumo ou nas palavras-chave do artigo, com o objetivo de encontrar publicações científicas relevantes relacionadas ao tema.

Para selecionar os artigos finais, o processo foi realizado em três etapas: Identificação, Triagem e Inclusão. Na etapa de Identificação, a busca foi realizada nas bases de dados Web of Science e Scopus. Aplicaram-se filtros automáticos para selecionar publicações em inglês ou espanhol, publicadas entre 2020 e 2024. Após a busca inicial, foi feita a verificação de duplicidade dos registros utilizando a formatação condicional no Excel.

Na etapa de Triagem, a seleção foi baseada na leitura do título e do resumo dos registros pré-selecionados. Foram excluídos os registros que não atendiam aos critérios de inclusão ou não respondiam à pergunta de pesquisa, resultando em um conjunto de publicações para avaliação detalhada.

Na etapa de Inclusão, foi realizada a leitura integral das publicações selecionadas. Para serem consideradas elegíveis, as publicações precisavam preencher os seguintes requisitos: 1. medir as emissões de gases de efeito estufa (CO₂, N₂O e/ou CH₄) em solos com cultivos sustentáveis e apresentar esses resultados de forma clara. Foram excluídos artigos que apresentavam dados de emissão de gases provenientes de insumos, aqueles que apenas avaliavam a pegada de carbono e os que realizavam modelagem estimativa de emissões.

Quadro 1 - Critérios de inclusão e exclusão dos registros, acompanhados de suas respectivas justificativas.

(continua)

Critérios de inclusão/exclusão	Justificativa
Inclusão	O idioma é inglês ou espanhol.
	O ano de publicação abrange o período de 2020-2024.
	Registro corresponde a artigo científico.
	Não há duplicidade de registros entre as bases consultadas
	O registro está alinhado à pergunta de pesquisa
	O registro está disponível para acesso na íntegra.
	O artigo avalia práticas sustentáveis de manejo do solo.

	O artigo avalia práticas agrícolas sustentáveis e a produção de GEE em regiões semiáridas.
	Medir as emissões de gases de efeito estufa (CO ₂ , N ₂ O e/ou CH ₄) em solos com cultivos sustentáveis.
	Apresentar os dados de GEE de forma clara.

(conclusão)

Crítérios de inclusão/exclusão	Justificativa
Exclusão	O artigo não avalia práticas agrícolas sustentáveis e a produção de GEE em regiões semiáridas.
	O artigo apresenta apenas emissão de GEE provenientes de insumos.
	O artigo apresenta apenas modelagem estimativa de emissões.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Os dados extraídos das publicações elegíveis foram organizados em uma planilha eletrônica, considerando os objetivos da pesquisa e possibilitando uma análise sistemática e detalhada. A planilha inclui variáveis como: 1. Identificação do artigo, 2. Caracterização do local de estudo, 3. Tipos de manejo do solo (revolvimento, plantio direto, rotação de culturas, pousio, etc.), 4. Cultura de interesse, 5. Espécies utilizadas como alternativa para práticas sustentáveis, 6. Época e tempo de manejo, 7. Período de avaliação, 8. Forma de mensuração dos gases, 9. Método de análise de GEE e os 10. Resultados observados para CO₂, N₂O e CH₄, 11. Influência do manejo do solo nas emissões, entre outras informações necessárias para organização das informações e construção da revisão sistemática.

Foi realizada a extração dos dados dos artigos selecionados, com a proposta de atender ao objetivo de mostrar o potencial de mitigação referentes às práticas propostas por cada autor. Os dados foram obtidos a partir dos resultados de fluxos ou emissões totais apresentadas nos artigos, seja em texto, tabelas ou gráficos. Foi admitida uma mínima variação dos dados originais, desde que fosse possível obter os valores de forma exata ou aproximada por interpolação em gráficos disponíveis nas publicações.

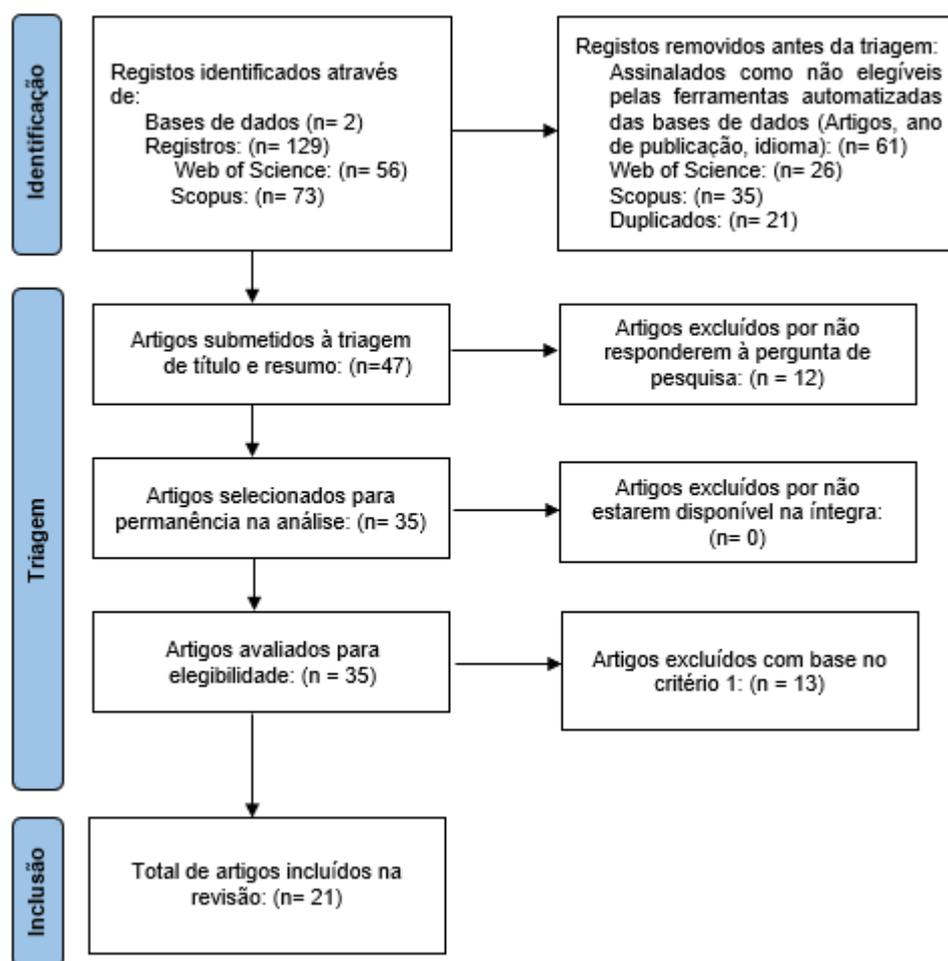
Para expressar o potencial de mitigação em percentual, foi utilizada a seguinte fórmula:

$$\text{Mitigação (\%)} = (100 \times \text{Fluxo ou emissão do GEE}) / \text{Fluxo ou emissão do Controle}$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da primeira busca nas bases de dados Web of Science e Scopus resultaram em um total combinado de 129 registros, abrangendo artigos, artigos de revisão e capítulos de livros, com início em 2001 até outubro de 2024. Após a aplicação dos filtros, incluindo o período de 2020 a 2024, os idiomas português, espanhol, inglês e o tipo de documento artigos científicos, o número de registros foi reduzido para 72. Desses, 21 registros foram excluídos por duplicidade. Na etapa de leitura de títulos e resumos, 13 registros foram descartados por não responderem à pergunta de pesquisa. Assim, o total foi reduzido para 35 registros, os quais foram selecionados para avaliação detalhada. Após a leitura completa, 21 publicações foram consideradas elegíveis por atenderem aos critérios de inclusão, focados na medição de emissões de gases de efeito estufa (CO₂, N₂O ou CH₄) em solos com cultivos sustentáveis em regiões semiáridas (Esquema 2).

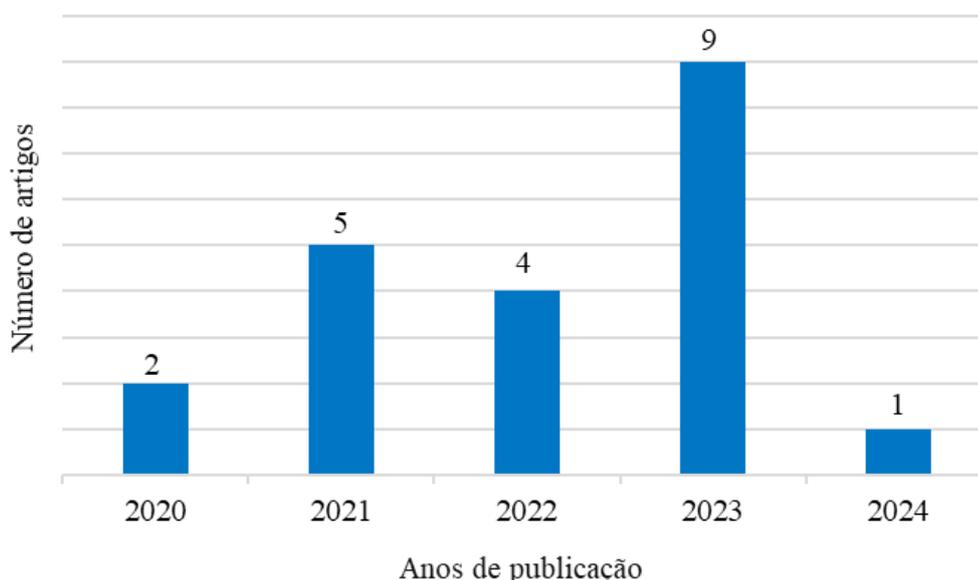
Esquema 2 - Etapas de identificação e seleção dos estudos para Revisão Sistemática PRISMA.



Fonte: adaptado de Page *et al.* (2022).

Em relação à distribuição temporal das publicações analisadas, constatou-se uma variabilidade significativa ao longo dos últimos cinco anos. O ano de 2023 destacou-se com a maior concentração de estudos, representando 42,86% do total de publicações. Em seguida, o ano de 2021 com contribuição de 23,81% das publicações, seguido de 2022, com 19,05%, enquanto os anos de 2020 e 2024 tiveram uma menor frequência de publicações, com 9,52% para 2020 e 4,76% para 2024, embora os dados para 2024 podem apresentar contribuição parcial em virtude da busca ter sido realizada antes do final do ano. A observação da distribuição temporal dos artigos sobre uma temática específica permite identificar tendências no interesse pelo tema, com crescimento significativo nas publicações, especialmente em 2023 (Gráfico 3).

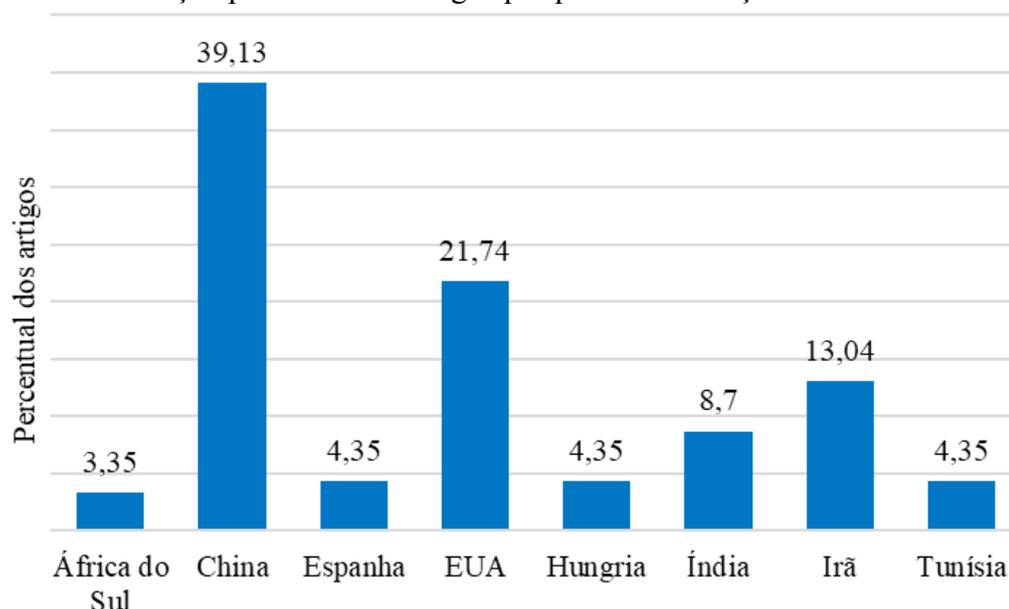
Gráfico 3 - Distribuição anual das publicações incluídas no estudo.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Notas: Os dados referentes ao ano de 2024 consideram publicações até o mês de outubro de 2024.

A distribuição geográfica dos estudos incluídos revela uma predominância de publicações originadas da China, representando 39,13% do total dos artigos levantados, seguida pelos Estados Unidos com 21,74%. Ambos os países se destacam por serem os grandes produtores agrícolas mundiais, relacionando tamanho investido em pesquisas na área, impulsionados pela necessidade de melhorar a produtividade e a sustentabilidade de seus setores agrícolas, além de manter sua competitividade global. O Irã ocupa o terceiro lugar, com 13,04% e a Índia contribuiu com 8,7% das publicações avaliadas. Os países Hungria, Espanha e Tunísia apresentaram uma representatividade equivalente a 4,35% cada, enquanto a África do Sul contribuiu com 3,35% dos artigos selecionados. Esses países têm uma participação relativamente pequena no conjunto de publicações examinadas, conforme ilustrado na Gráfico 4. O Brasil, apesar de ser um dos grandes produtores agrícolas do mundo, não aparece nos resultados, pois estes limitam-se a regiões semiáridas e as pesquisas relacionadas a emissões de GEE no semiárido brasileiro ainda são de menor magnitude em comparação àquelas realizadas em outras regiões do país.

Gráfico 4 - Distribuição percentual de artigos por país de realização do estudo.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

O levantamento das práticas sustentáveis de manejo do solo revelou que o plantio direto foi a técnica mais frequente, correspondendo a 66,67% do total. Em seguida, destacam-se o manejo de resíduos de cultura, com 38,10%, e o retorno da palhada ao solo, com 23,81%. O manejo de adubação nitrogenada foi considerado em 19,05% dos estudos analisados, enquanto práticas como a aplicação de biocarvão foram citadas em 9,52% dos artigos. Outras técnicas, como uso de biofertilizante, cobertura de solo, compostagem de resíduos orgânicos, esterco de cabra/ovelha, filme plástico biodegradável e estabilizador de nitrogênio apresentaram menor destaque, sendo cada uma mencionada em 4,76% das publicações. Esses dados evidenciam a predominância do plantio direto como a estratégia mais utilizada entre os 21 artigos avaliados (Tabela 1).

Tabela 1 - Distribuição dos artigos por prática sustentável de manejo do solo nos artigos revisados.

(continua)

Prática sustentável	Nº de artigos*	Cultura principal	Autores
Biocarvão ¹	2	Milho (<i>Zea mays</i> L.) Trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.) e Milho (<i>Zea mays</i> L.)	Nyambo <i>et al.</i> (2020). Bai <i>et al.</i> (2023).
Biofertilizante ²	1	Capim-switchgrass (<i>Panicum virgatum</i>) e Capim-trigo-alto	Gay <i>et al.</i> (2022).

(Thinopyrum ponticum)			
Cobertura do solo ³	1	Milho (<i>Zea mays</i>) e Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i>)	Acharya <i>et al.</i> (2022).
(continuação)			
Prática sustentável	Nº de artigos*	Cultura principal	Autores
Compostagem de resíduos orgânicos ⁴	1	Uvas (<i>Vitis vinifera</i>) – Variedades Monastrell e Cabernet Sauvignon	Marín-Martínez <i>et al.</i> (2021).
Esterco de cabra/ovelha ⁵	1	Uvas (<i>Vitis vinifera</i>) – Variedades Monastrell e Cabernet Sauvignon	Marín-Martínez <i>et al.</i> (2021).
Estabilizador de Nitrogênio ⁶	1	Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)	McDonald <i>et al.</i> (2021).
Filme plástico biodegradável ⁷	1	Milho (<i>Zea mays</i> L.)	Qian <i>et al.</i> (2023).
Manejo de adubação nitrogenada ⁸	4	Algodão (<i>Gossypium hirsutum</i> L.)	McDonald <i>et al.</i> (2023).
		Milho (<i>Zea mays</i>)	Fudjoe <i>et al.</i> (2023) e Wu <i>et al.</i> (2023).
		Trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.) e Milho (<i>Zea mays</i> L.)	Bai <i>et al.</i> (2023).
Manejo de resíduos de cultura ⁹	8	Agricultura em geral, sem uma cultura específica identificada	Mirzaei <i>et al.</i> (2023).
		Milho (<i>Zea mays</i> L.)	Nyambo <i>et al.</i> (2020) e Qian <i>et al.</i> (2023).
		Milho (<i>Zea mays</i>) e Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)	Mirzaei <i>et al.</i> (2022) e Bai <i>et al.</i> (2023).
		Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)	Pratibha <i>et al.</i> (2023) e Yuan <i>et al.</i> (2022).
		Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)	Bhattacharya <i>et al.</i> (2023).
Plantio direto ¹⁰	15	Agricultura em geral.	Amami <i>et al.</i> (2021) e Mirzaei <i>et al.</i> (2023).
		Algodão (<i>Gossypium hirsutum</i> L.)	McDonald <i>et al.</i> (2023)
		Milho (<i>Zea mays</i> L.)	Mohammed <i>et al.</i> (2022); Nyambo <i>et al.</i> (2020); Jiao <i>et al.</i> (2021).
		Milho (<i>Zea mays</i>) e Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i>)	Acharya <i>et al.</i> (2022).

	Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)	Sadiq <i>et al.</i> (2024); Du <i>et al.</i> (2023); Yuan <i>et al.</i> (2022); Pratibha <i>et al.</i> (2023); Alhassan <i>et al.</i> (2021).
	Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)	McDonald <i>et al.</i> (2021) e Bhattacharya <i>et al.</i> (2023).

(conclusão)

Prática sustentável	Nº de artigos*	Cultura principal	Autores
Retorno da palhada ao solo ¹¹	5	Algodão (<i>Gossypium hirsutum</i> L.) Milho (<i>Zea mays</i> L.) Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)	McDonald <i>et al.</i> (2023). Fudjoe <i>et al.</i> (2023) e Jiao <i>et al.</i> (2021). Sadiq <i>et al.</i> (2024); Yuan <i>et al.</i> (2022); Alhassan <i>et al.</i> (2021).

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Legenda: Alguns trabalhos aparecem em mais de uma categoria.

Notas: ¹Biocarvão - Material carbonizado na ausência de oxigênio, destinado ao uso no solo.

²Bioinsumo para fertilização do solo produzido a partir de microrganismos. ³CS - cultivo temporário de plantas para cobrir e enriquecer o solo. ⁴Cobertura do solo - adubo produzido a partir da decomposição controlada de matéria orgânica. ⁵Esterco de cabra/ovelha - resíduo orgânico de animais utilizado como adubo orgânico. ⁶ Estabilizador de Nitrogênio - fertilizante mineral nitrogenado de liberação controlada. ⁷ Filme plástico biodegradável - cobertura de proteção do solo que se decompõe naturalmente. ⁸ Manejo de adubação nitrogenada - práticas relacionadas ao manejo de adubação nitrogenada. ⁹ Manejo de resíduos de cultura - estratégia para destinar os resíduos das culturas, como cobertura do solo, incorporação ou retirada. ¹⁰Plantio direto - ausência de preparo do solo e integração da rotação de culturas. ¹¹Retorno da palhada ao solo - reaproveitamento da palhada do cultivo anterior.

Conforme apresentado na tabela anterior, algumas das práticas sustentáveis avaliadas nos artigos incluem o uso de plantas de cobertura, caracterizadas pelo cultivo temporário, a prática de retorno da palhada da cultura principal ao solo e a rotação de culturas. Os artigos analisados identificaram 4 famílias botânicas utilizadas para estas finalidades, com destaque para a família Fabaceae, com 5 espécies, totalizando 50% do total. Em seguida, a família Poaceae foi representada por 4 espécies, correspondendo a 40%. As famílias Brassicaceae e Euphorbiaceae, cada uma com 1 espécie, representaram 10% cada. Esses resultados evidenciam a diversidade de espécies e a predominância de leguminosas e gramíneas nos estudos analisados (Quadro 6). Muito provavelmente a menor quantidade de estudos envolvendo as avaliações de fluxos de CH₄ do solo está relacionada com o fato deste gás ser produzido em condições estritamente aneróbicas, muito comuns em solos encharcados. Como os solos de regiões semiáridas estão muito sujeitos a restrição hídrica, a importância dos fluxos de CH₄ pode estar sendo menor do que em outras regiões.

Quadro 5 - Espécies identificadas nos artigos relacionadas às diferentes práticas sustentáveis de manejo do solo.

Família botânica	Espécies
Brassicaceae	<i>Brassica rapa</i> L., <i>Raphanus sativus</i> .
Euphorbiaceae	<i>Ricinus communis</i> L.

Fabaceae (Leguminosae)	<i>Cajanus cajan</i> L., <i>Pisum sativum</i> subsp. <i>arvense</i> L., <i>Sesbania rostrata</i> Bremek. & Oberm., <i>Trifolium alexandrinum</i> L., <i>Vicia dasycarpa</i> Ten.
Poaceae (Gramineae)	<i>Avena sativa</i> L., <i>Sorghum bicolor</i> L., <i>Triticum aestivum</i> L., <i>Zea mays</i> L., <i>Trifolium alexandrinum</i> L.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Entre os 21 estudos revisados, 6 abordaram exclusivamente os fluxos de N₂O, 5 trataram exclusivamente do CO₂, e nenhum trabalho avaliou apenas os fluxos de CH₄ do solo. Dos estudos que investigaram mais de um gás, 7 estudos avaliaram simultaneamente os três gases (CO₂, N₂O e CH₄), 2 analisaram N₂O e CO₂, e apenas 1 considerou N₂O e CH₄. Assim, considerando o número total de artigos, o gás mais investigado foi o óxido nitroso (N₂O), seguido pelo dióxido de carbono (CO₂), enquanto os fluxos de metano (CH₄) foram estudados em menor quantidade (Tabela 2). Muito provavelmente a menor quantidade de estudos envolvendo as avaliações de fluxos de CH₄ do solo está relacionada com o fato deste gás ser produzido em condições estritamente aneróbicas, muito comuns em solos encharcados. Como os solos de regiões semiáridas estão muito sujeitos a restrição hídrica, a importância dos fluxos de CH₄ pode estar sendo menor do que em outras regiões.

Tabela 2- Principais gases avaliados nos estudos revisados.

Gases avaliados	Nº de artigos	Autores
N ₂ O	6	McDonald <i>et al.</i> (2023), Yuan <i>et al.</i> (2022), Du <i>et al.</i> (2023), Fudjoe <i>et al.</i> (2023), Wu <i>et al.</i> (2023) e McDonald <i>et al.</i> (2021).
CO ₂	5	Mirzaei <i>et al.</i> (2022), Mirzaei <i>et al.</i> (2023), Amami <i>et al.</i> (2021), Mohammed <i>et al.</i> (2021) e Nyambo, Cornelius, & Araya (2020)
N ₂ O e CO ₂	2	Acharya <i>et al.</i> (2022) e Pratibha <i>et al.</i> (2023).
N ₂ O e CH ₄	1	Qian <i>et al.</i> (2023)
N ₂ O, CO ₂ e CH ₄	7	Jiao <i>et al.</i> (2021), Alhassan <i>et al.</i> (2021), Sadiq <i>et al.</i> (2024), Bai <i>et al.</i> (2023), Marín-Martínez <i>et al.</i> (2021), Bhattacharya <i>et al.</i> (2023) e Gay <i>et al.</i> (2022).

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Observa-se uma variabilidade de métodos que podem ser utilizados para a coleta e avaliação de emissões de GEE (Tabela 3). A análise do percentual de frequência destaca que a utilização de câmaras estáticas para coleta das amostras dos gases emitidos pelo solo, em combinação com cromatografia gasosa para a determinação das concentrações dos gases foi utilizada em 66,67% dos artigos avaliados. Outros métodos identificados incluem câmaras de fluxo contínuo com analisador de gás infravermelho (IR) e quimioluminescência (4,76%), a espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) com analisador portátil, que corresponde a 9,52%, seguido pelo uso do infravermelho não dispersivo para determinação de CO₂ e da espectroscopia de cavidade (CRDS), ambos com 4,76% cada. Além disso, a utilização de câmaras fechadas não-estacionárias foi mencionada em 9,52% dos artigos, sendo combinada com diferentes métodos de análise, tais como: espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), com analisador portátil Gasmeter DX4040

em 2 artigos; infravermelho não dispersivo (EGM-5), para determinação de CO₂ em 1 artigo; e cromatografia gasosa em 2 artigos.

A principal técnica para a análise dos GEE emitidos pelo solo continua sendo a cromatografia gasosa, com a coleta das amostras feita principalmente por câmaras estáticas. Apesar de amplamente utilizado, este método pode apresentar algumas limitações, como a necessidade de armazenamento de grande quantidade de amostras por um certo período, em caso de estudos realizados em locais distantes do laboratório onde o equipamento está instalado. Nessas situações, o uso de equipamentos portáteis para análise *in situ*, como aqueles que realizam análise por FTIR, pode ser uma alternativa interessante, pois não há necessidade de armazenamento de amostras. Apesar da presença de vários métodos de análise terem sido observados, alguns deles não são adequados para a determinação simultânea dos três principais GEE de importância na agricultura (CO₂, CH₄ e N₂O), como o infravermelho não dispersivo, que é utilizado apenas para a determinação de CO₂.

Tabela 3 - Métodos de coleta de gases de efeito estufa citados nos artigos incluídos na revisão.

Método de coleta	Método de análise dos GEE	Nº de artigos	Autores
Câmara de Fluxo Contínuo	Analisador de Gás Infravermelho (IR) e Quimioluminescência	1	Mirzaei <i>et al.</i> (2023)
Câmara estática	Cromatografia gasosa	14	Alhassan <i>et al.</i> (2021), Amami <i>et al.</i> (2021), Bai <i>et al.</i> (2023), Bhattacharya <i>et al.</i> (2023), Du <i>et al.</i> (2023), Fudjoe <i>et al.</i> (2023), Marín-Martínez <i>et al.</i> (2021), Mirzaei <i>et al.</i> (2022), Mohammed <i>et al.</i> (2021), Pratibha <i>et al.</i> (2023), Qian <i>et al.</i> (2023), Sadiq <i>et al.</i> (2024), Wu <i>et al.</i> (2023), Yuan <i>et al.</i> (2022).
Câmara estática	Espectroscopia de cavidade (CRDS)	1	Gay <i>et al.</i> (2022)
Câmara fechada não-estacionária	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), com analisador portátil (Gasmeter DX4040)	2	McDonald <i>et al.</i> (2021) e McDonald <i>et al.</i> (2023)
Câmara fechada não-estacionária	Infravermelho não dispersivo para determinação de CO ₂ (Environmental Gas Monitoring System EGM-5)	1	Acharya <i>et al.</i> (2022)
Câmara fechada não-estacionária	Cromatografia gasosa	2	Jiao <i>et al.</i> (2021) e Nyambo, Cornelius, & Araya (2020)

Fonte: Elaborado pela própria autora.

As práticas sustentáveis identificadas nos artigos evidenciaram abordagens relevantes para a implementação de estratégias agrícolas sustentáveis, com o objetivo de mitigar as emissões de GEE em regiões semiáridas.

Em um experimento conduzido ao longo de três anos no agroecossistema de trigo (*Triticum aestivum* L.) e milho (*Zea mays* L.), cultivados em sucessão (trigo no inverno e milho no verão), avaliou-se os efeitos do uso do biocarvão combinado com o retorno de palhada ao solo e diferentes taxas de aplicação de fertilizantes nitrogenados (dose recomendada para a cultura e dose com redução de 30%) sobre fluxos de GEE, sequestro de carbono no solo, produtividade agrícola e indicadores ambientais. A redução de 30% na aplicação de fertilizantes nitrogenados resultou em menores emissões acumuladas e menores picos de N₂O tanto no milho quanto no trigo, embora o milho tenha apresentado picos e emissões consideravelmente maiores. O artigo relaciona as elevadas emissões no cultivo do milho à influência da incorporação de palha, contudo, esses resultados podem também ter sido intensificados pelo período de cultivo do milho no verão, cujas condições, aliadas ao tipo de manejo, favorecem os processos de transformação do nitrogênio no solo e as emissões de N₂O. Ainda assim, os autores ressaltam que a aplicação de fertilizantes nitrogenados e a retenção de resíduos são os principais fatores que estimulam as emissões de N₂O no sistema. Por outro lado, a inclusão do biocarvão atuou como alternativa de mitigação das emissões causadas pela adubação nitrogenada e retorno da palha ao solo, reduzindo a intensidade dos picos e os valores acumulados, especialmente nos tratamentos combinados com redução de fertilizantes nitrogenados (Bai *et al.*, 2023).

Ainda em Bai *et al.* (2023), os resultados dos picos e emissões de CO₂ comportaram-se de forma semelhante ao N₂O. O tratamento com fertilização reduzida e aplicação de biocarvão reduziu os fluxos de CO₂ em até 28,4% e as emissões acumuladas em 22,8%. Em contrapartida, o tratamento que utilizou apenas palha sem biocarvão foi o que mais emitiu, aumentando os picos em 54,2% e as emissões acumuladas em 32,4% em comparação ao tratamento com biocarvão e manejo de palha sem revolvimento, destacando o papel do biocarvão na mitigação das emissões e a importância do tipo de manejo de solo adotado. Quanto ao CH₄, o artigo indica que o uso de biocarvão influenciou suas emissões de maneira variável, com registros tanto de emissão quanto de absorção, predominando a absorção. Nesse contexto, no tratamento com fertilização reduzida em 30%, houve um aumento na absorção de CH₄, com picos 37,8% maiores e uma absorção acumulada 35,6% superior em relação à fertilização convencional. Isso sugere que a redução na aplicação de nitrogênio favoreceu a captura de CH₄ pelo solo. Entretanto, o menor acúmulo total de CH₄ foi registrado no tratamento que combinou biocarvão com fertilização convencional, variando entre 0,3 a 0,4 kg ha⁻¹. Esses resultados indicam que, embora o biocarvão seja eficaz na redução de emissões de CO₂ e N₂O, sua influência na absorção de CH₄ depende do manejo adotado.

De maneira complementar, Nyambo *et al.* (2020) analisaram os efeitos do manejo conservacionista sobre as emissões de CO₂ e o estoque de carbono em solos agrícolas de uma região semiárida da África do Sul. O estudo considerou estratégias como o não revolvimento do solo, a rotação de culturas com milho (*Zea mays* L.), aveia (*Avena sativa* L.) e ervilhaca-peluda (*Vicia dasycarpa* L.), além do manejo de resíduos, incluindo retenção, remoção e uso do biocarvão. Os resultados indicaram que os fluxos médios de CO₂ foram influenciados pelo tipo de manejo do solo e de resíduos. O não revolvimento do solo reduziu as emissões de CO₂ em 26,3% em comparação ao solo arado, promovendo o acúmulo de carbono na camada superficial (0-5 cm). Durante o verão, os maiores fluxos de CO₂ foram registrados no tratamento com remoção da cultura principal, alcançando 3,13 mol m⁻² s⁻¹, seguido pela retenção de resíduos na superfície do solo, com 2,62 mol m⁻² s⁻¹, e pelo uso de biocarvão,

com $2,57 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. No inverno, os maiores fluxos foram observados no tratamento com retenção de resíduos sob o solo, atingindo $2,58 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, em comparação à remoção de resíduos, com $1,93 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, e ao uso de biocarvão, que apresentou o menor fluxo, $1,78 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. O artigo destaca que o sistema de plantio direto apresentou menores fluxos de CO_2 em relação ao sistema convencional. Além disso, embora o biocarvão e a retenção de resíduos possam apresentar maiores fluxos de CO_2 a curto prazo, essas estratégias contribuem para melhorar a umidade e as condições físicas do solo. Contudo, para uma compreensão mais aprofundada das respostas ambientais e da eficácia das estratégias de mitigação, os autores indicam que são necessários estudos de longo prazo.

Bai *et al.* (2023) e Nyambo *et al.* (2020) demonstraram abordagens complementares no uso do biocarvão em práticas agrícolas sustentáveis, mostrando que o uso desse condicionador é uma estratégia promissora para mitigar emissões de GEE em solos cultivados. Ambos os estudos evidenciaram seu papel relevante na mitigação das emissões de CO_2 e N_2O , apesar de sua influência sobre o CH_4 variar conforme o manejo adotado. Enquanto Nyambo *et al.* (2020) relataram aumento nos fluxos de CO_2 , Bai *et al.* (2023) destacaram a redução das emissões acumuladas de CO_2 e N_2O , especialmente quando combinado com a redução na dose de fertilizantes nitrogenados. Esses achados reforçam a importância de se expandir as pesquisas e ajustar manejos para maximizar os benefícios ambientais do biocarvão em diferentes contextos agrícolas e condições edafoclimáticas.

Seguindo essa perspectiva de práticas agrícolas sustentáveis voltadas à mitigação das emissões dos GEE, Gay *et al.* (2022) conduziram um experimento de três anos em um agroecossistema de gramíneas perenes, com as espécies capim-switchgrass (*Panicum virgatum*) e grama-trigo (*Thinopyrum ponticum*) para avaliar os impactos da aplicação de biofertilizante (BF) e ureia sobre os fluxos de GEE do solo. O biofertilizante utilizado consistiu em uma mistura de cianobactérias, composta por 20% de *Nostoc sp.* (isolada do solo local) e 80% de *Spirulina* (seca, disponível comercialmente), aplicada como suspensão pulverizada diretamente sobre o solo e combinada com eventos de precipitação para facilitar a infiltração. Durante o primeiro ano, na fase de crescimento das culturas, os fertilizantes influenciaram significativamente os fluxos de CO_2 , embora o BF tenha alterado esses fluxos, sua contribuição para o total emitido foi relativamente baixa. Os fluxos de CH_4 , com exceção de uma medição em junho, foram negativos em ambas as culturas, indicando que o solo atuou como um sumidouro deste gás, sem diferenças significativas entre culturas ou tratamentos. Os fluxos de N_2O foram baixos em ambas as culturas, com valores médios de $0,08 \mu\text{mol N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ para o capim-switchgrass e $0,11 \mu\text{mol N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ para grama-trigo. Para os tratamentos de fertilização, os fluxos médios de N_2O foram de $0,09$; $0,12$ e $0,05 \mu\text{mol N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ para controle, BF e ureia, respectivamente. Em ambos os casos, entre culturas e tratamentos, as diferenças nos fluxos de N_2O não foram estatisticamente significativas, indicando estabilidade nas emissões.

Outra abordagem identificada foi a adoção de plantas de cobertura do solo, analisada em um experimento de curta duração realizado entre 2018 e 2020. O estudo envolveu gramíneas, brássicas e leguminosas, utilizadas em cultivo rotacionado com milho e sorgo, em um solo franco-argiloso. As gramíneas utilizadas foram azevém anual (*Lolium multiflorum*) e triticale (*Triticale hexaploid*); as brassicáceas incluíram nabo forrageiro (*Brassica rapa subsp. rapa*) e rabanete-daikon (*Raphanus sativus var. Longipinnatus*); enquanto as leguminosas consistiram em trevo alexandrino (*Trifolium alexandrinum*) e ervilha-de-inverno (*Pisum sativum subsp. arvense*). No primeiro ano, o sistema atuou como sumidouro de N_2O ; no segundo, tornou-se fonte devido ao acúmulo de nitrogênio residual dos fertilizantes e à decomposição dos resíduos. As emissões de CO_2 foram 5 a 10 vezes maiores nos sistemas com cobertura em comparação ao solo sem cobertura, correlacionando-se com a temperatura

do solo e do ar, enquanto as emissões de N_2O foram influenciadas pela umidade do solo (Acharya *et al.*, 2022).

Além das plantas de cobertura, o impacto de diferentes insumos orgânicos no solo também foi avaliado em uma pesquisa conduzida em área cultivada com *Vitis vinifera* L. das variedades Cabernet Sauvignon e Monastrell, na região mediterrânea semiárida de Alicante, Espanha. O estudo investigou os efeitos da aplicação de esterco de origem animal e de composto de resíduos de destilaria sobre os fluxos de GEE. Os fluxos de N_2O apresentaram picos de emissão entre o 7º e o 15º dia após a aplicação dos tratamentos, com reduções durante o verão seco e novos pulsos no outono devido à recuperação da umidade do solo, que reativou a atividade microbiana. Emissões mais elevadas de CO_2 foram observadas nos solos tratados especialmente com esterco, refletindo a maior mineralização da matéria orgânica, embora os fluxos também tenham diminuído no período de seca. Em contraste, os fluxos de CH_4 foram predominantemente negativos, caracterizando os solos como sumidouros desse gás, uma condição favorecida pela alta oxigenação dos poros e baixos níveis de nitrogênio inorgânico (Marín-Martínez *et al.*, 2021).

Em um estudo conduzido em sistema agrícola semiárido com diferentes práticas de manejo do solo, foram comparadas estratégias de aplicação de fertilizante nitrogenado em relação às emissões de N_2O . Os tratamentos avaliados incluíram: aplicação de 100% do nitrogênio no pré-plantio (PP); aplicação de 100% com estabilizadores de nitrogênio (STB); e aplicação parcelada, com 40% no pré-plantio e 60% no meio da estação (SPLIT). A aplicação total no pré-plantio resultou nos maiores picos de emissão de N_2O durante o verão, com valores de emissão acumulada de aproximadamente $2,6 \text{ kg } N_2O-N \text{ ha}^{-1}$ em 2016. Por outro lado, o uso de estabilizadores de nitrogênio reduziu esses picos para cerca de $1,7 \text{ kg } N_2O-N \text{ ha}^{-1}$, ao desacelerar a disponibilidade de nitrogênio mineral e equilibrar sua liberação com as condições do solo. O tratamento com aplicação parcelada apresentou emissões intermediárias, com aproximadamente $2,1 \text{ kg } N_2O-N \text{ ha}^{-1}$, indicando que o fracionamento da dose também contribui para a mitigação das emissões em relação ao tratamento convencional (McDonald *et al.*, 2021).

Adicionalmente, Qian *et al.* (2023) conduziram um experimento de seis anos no Planalto de Loess, China, avaliando o efeito da incorporação de palha combinada ao uso de filme plástico biodegradável sobre a produtividade do milho e as emissões de GEE. Foram comparados quatro tratamentos: cultivo em sulcos elevados com ou sem incorporação de palha e cultivo em superfície plana com ou sem palha. Em média, o tratamento com sulcos elevados com palha aumentou a produtividade do milho em 5,97% em comparação ao tratamento sem palha. Apesar de ter havido um aumento nas emissões acumuladas de N_2O e na respiração heterotrófica em 37,87% e 19,76%, respectivamente, o sistema sulcos elevados com palha apresentou um acúmulo líquido de carbono de $9.030,53 \text{ kg } C \text{ ha}^{-1}$ ao longo de três anos, atuando como um sumidouro de carbono. Esses resultados destacam o potencial do manejo integrado com palha para promover a sustentabilidade em regiões semiáridas.

Além disso, diferentes manejos de aplicação de fertilizantes também têm sido investigados como estratégias para mitigar as emissões de GEE, como demonstrado no estudo de Fudjoe *et al.* (2023). Em um sistema agrícola de produção de milho localizado no noroeste da China, em Loess Plateau, as emissões de N_2O variaram significativamente entre os tratamentos, que incluíam aplicação de fertilizante orgânico ($6,06 \text{ t } \text{ha}^{-1}$ de fertilizante orgânico, $90 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$ de superfosfato triplo), fertilizante inorgânico ($200 \text{ kg } N \text{ ha}^{-1}$ de ureia, $150 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$ de superfosfato triplo), ambos combinados ($3,03 \text{ t } \text{ha}^{-1}$ de fertilizante orgânico, $100 \text{ kg } N \text{ ha}^{-1}$ de ureia, $120 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$ de superfosfato triplo) e a aplicação de fertilizante mais resíduo da cultura ($28,5 \text{ t } \text{ha}^{-1}$ de palha de milho, $100 \text{ kg } N \text{ ha}^{-1}$ de ureia, $36 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$ de superfosfato triplo). A combinação de fertilizantes orgânicos e inorgânicos reduziu as emissões de N_2O em comparação com a aplicação individual, seja orgânica ou

inorgânica. Essa redução pode ser atribuída aos processos de nitrificação e desnitrificação, bem como à decomposição de matéria orgânica, que resultaram em menor disponibilidade de nitrato e, conseqüentemente, menores taxas de desnitrificação. Assim, embora os processos de nitrificação e desnitrificação também ocorram nas aplicações individuais, a combinação de fertilizantes demonstrou maior eficiência, reduzindo as emissões de N_2O e promovendo a produtividade em regiões semiáridas.

O manejo da adubação nitrogenada também foi objeto de estudo conduzido por Wu *et al.* (2023), que avaliaram cinco doses de nitrogênio (0, 120, 175, 230 e 285 kg N ha⁻¹) ajustadas à capacidade de retenção hídrica do solo e à demanda nutricional da cultura em um sistema de cultivo de milho sob manejo com cobertura plástica nos sulcos. Os resultados mostraram que a dose de 230 kg N ha⁻¹ esteve associada a emissões de N_2O da ordem de 1,20 kg N ha⁻¹, enquanto a aplicação de 285 kg N ha⁻¹ aumentou as emissões em 27,88%, sem proporcionar ganhos adicionais na produtividade. Esses achados reforçam a importância da fertilização otimizada como estratégia eficaz para reduzir as emissões de N_2O e garantir a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

Adicionalmente, o plantio direto, o retorno da palhada ao solo e o manejo de resíduos das culturas destacaram-se como estratégias amplamente empregadas nos artigos analisados e comumente avaliadas de forma conjunta nas pesquisas. Os resultados dessas três práticas serão apresentados de maneira integrada, considerando sua complementaridade e os benefícios potenciais para os cultivos em regiões semiáridas. Essa abordagem contribui para uma compreensão aprofundada da interação das diferentes práticas sustentáveis adotadas para melhoria dos cultivos, favorecendo a melhoria das propriedades do solo, a eficiência no uso de nutrientes e, principalmente, a mitigação da produção de GEE.

Pratibha *et al.* (2023) avaliaram o cultivo de guandu (*Cajanus cajan*) e mamona (*Ricinus communis*) em solos pobres em carbono e nitrogênio, submetidos a três sistemas de manejo do solo (preparo direto, reduzido e convencional), considerando diferentes profundidades de incorporação dos resíduos de colheita: 0 cm (sem resíduos), 10 cm e 30 cm. Os resíduos consistiram em cobertura viva e morta de *Sesbania rostrata*, com as plantas sendo utilizadas ativamente como cobertura viva ou cortadas para formar a cobertura morta. As emissões de CO_2 foram maiores no preparo convencional, alcançando 3.056 kg ha⁻¹ por estação, enquanto as menores emissões foram da ordem de 2.334 kg ha⁻¹ para o sistema de plantio direto. As emissões de N_2O foram aproximadamente 17% menores no plantio direto com resíduos em relação ao preparo convencional. Já os fluxos de CH_4 foram baixos em todos os tratamentos, variando de 0,03 a 0,20 kg ha⁻¹ por estação, com os menores valores registrados nos tratamentos de plantio direto com incorporação de resíduos a 10 e 30 cm de profundidade.

As relações entre as emissões de CO_2 , CH_4 e N_2O em função do preparo do solo e dos resíduos aplicados estão diretamente associadas aos processos biológicos e químicos que ocorrem no solo. Em monocultivos contínuos de milho sob clima temperado semiárido, o preparo convencional apresentou maiores emissões de CO_2 devido à intensificação da mineralização da matéria orgânica causada pela maior exposição do solo e dos resíduos incorporados (Jiao *et al.*, 2021). Sistemas que promovem menor perturbação do solo, como o plantio direto, retardaram esse processo, mantendo o carbono armazenado por mais tempo. Além disso, o solo atuou predominantemente como sumidouro de CH_4 em grande parte do ciclo de cultivo, especialmente em sistemas que preservam a estabilidade da matéria orgânica e minimizam o distúrbio físico. Em contrapartida, as emissões de N_2O foram mais elevadas em sistemas que mantiveram maior umidade no solo, favorecendo a atividade microbiana e as condições ideais para a desnitrificação (Jiao *et al.*, 2021).

Em pesquisa realizada por Amami *et al.* (2021), foram avaliados três sistemas de manejo do solo: preparo convencional, preparo reduzido e plantio direto. Os manejos com

preparo do solo induziram duas vezes mais emissões de CO₂ que o plantio direto, em um Cambissolo com 11,12% de argila, em pousio, na Tunísia. O experimento foi conduzido entre abril e maio de 2018, com medições realizadas em três períodos específicos: imediatamente após o preparo do solo, aos 10 e aos 22 dias após as operações de preparo. Esses resultados reforçam a influência dos sistemas de manejo sobre a dinâmica das emissões de CO₂, destacando o potencial do plantio direto para reduzir os fluxos de gases para a atmosfera.

No estudo de dois sistemas de manejo do solo, utilizando o plantio convencional e o plantio direto, no cultivo contínuo de milho em regiões de clima semiárido (Karaj, Irã) e continental (Debrecen, Hungria), o plantio direto apresentou menores emissões de CO₂ em comparação ao plantio convencional, em ambas as regiões. Além disso, o plantio direto demonstrou uma maior retenção de carbono no solo devido à preservação de resíduos de cultura e ao menor distúrbio no solo, reduzindo emissões cumulativas de CO₂ ao longo do ciclo de cultivo (Mohammed *et al.*, 2022). Mirzaei *et al.* (2023) atribuem essa redução à influência de fatores ambientais, como temperatura do solo e espaço poroso preenchido com água, bem como à quantidade de resíduos de culturas provenientes do cultivo de milho. Mirzaei *et al.* (2022) também enfatizam os benefícios do plantio direto associado ao manejo de resíduos, evidenciando sua eficiência em sistemas de rotação milho-trigo. Nesses sistemas, a retenção de resíduos no plantio direto contribuiu para a redução das emissões de CO₂, enquanto o preparo convencional apresentou emissões mais elevadas, resultado da decomposição acelerada da matéria orgânica promovida por esse tipo de manejo.

O plantio direto e o manejo de resíduos, com retenção de palhada na superfície do solo demonstraram eficácia na redução das emissões de CO₂ e CH₄ em comparação ao preparo convencional. Em sistemas de cultivo de trigo de primavera, o plantio direto com retenção de palhada aumentou o armazenamento de carbono orgânico e reduziu as emissões de GEE, além de melhorar as propriedades do solo (Sadiq *et al.*, 2024; Yuan *et al.*, 2022).

Por outro lado, na pesquisa realizada por Yuan *et al.* (2022), a incorporação de palhada não reduziu consistentemente as emissões de N₂O, sendo estas influenciadas por condições de umidade do solo que favorecem os processos de desnitrificação. Apesar disso, práticas como o plantio direto com retorno da palhada para o solo demonstraram a maior eficiência na absorção de CH₄ e na redução do potencial de aquecimento global, bem como na produtividade do trigo, especialmente em sistemas semiáridos no Loess Plateau (Alhassan *et al.*, 2021). Essas evidências reforçam que o plantio direto, associado ao manejo adequado de palhada, é uma estratégia promissora para mitigar emissões de GEE e promover a sustentabilidade em agroecossistemas de regiões semiáridas (Bhattacharya *et al.*, 2023).

Considerando os resultados observados, é importante destacar que o plantio direto é uma opção de cultivo sustentável importante, mesmo quando adotado de forma exclusiva, sem associação com outras práticas sustentáveis. Conforme demonstrado por Du *et al.* (2023), em pesquisa realizada em regiões semiáridas da China, o plantio direto em campos de trigo apresentou fluxo de N₂O inferior ao do cultivo convencional. Ademais, esses autores ainda verificaram que todos os sistemas de manejo analisados atuaram como fontes de N₂O, seguindo a ordem de fluxo cumulativo: campo de trigo com cultivo convencional > campo de trigo sem revolvimento do solo > floresta de *Hippophae rhamnoides* > pastagem natural > campo de alfafa > floresta de *Picea asperata*.

Seguindo o contexto de melhoria das condições ambientais para a redução das emissões de GEE, práticas como a cobertura do solo, proporcionada pelo plantio direto combinado ao retorno da palhada, desempenham um papel fundamental na disponibilidade de água e na regulação da temperatura do solo (Alhassan *et al.*, 2021). Essas modificações nas condições microclimáticas podem favorecer a redução das emissões de GEE (Sadiq *et al.*, 2024; Mirzaei *et al.*, 2022), especialmente de N₂O (Yuan *et al.*, 2022).

Du *et al.* (2023), ao observarem que as emissões de N₂O na região de Planalto de Loess, norte da China, apresentam um comportamento sazonal, reforçam que as características ambientais influenciam as emissões de GEE. Durante o verão, marcado por temperaturas elevadas e maior umidade, as emissões foram significativamente mais altas, especialmente em sistemas de cultivo convencional, devido à intensificação dos processos de nitrificação e desnitrificação. Em contraste, nos meses de outono e inverno, as emissões foram muito baixas, sem diferenças significativas entre os usos do solo. A região, com temperatura média anual de 6,9°C, apresenta uma variação climática acentuada, com verões quentes e invernos frios, reforçando o papel das condições ambientais no controle das emissões de N₂O.

Dessa forma, os resultados acima apresentados e sintetizados na Tabela 4 evidenciam como as práticas agrícolas sustentáveis contribuem para a mitigação das emissões de GEE em sistemas agrícolas de regiões semiáridas. Entre estas práticas, o manejo do solo desempenha um papel fundamental, sendo o plantio direto combinado à manutenção de palhada na superfície do solo uma prática estratégica e eficaz, fortalecendo a importância de ajustar o manejo agrícola às condições ambientais específicas. Além disso, diversos fatores ambientais, como a umidade e a temperatura do solo, desempenham um papel fundamental na dinâmica das emissões de GEE, o que foi frequentemente abordado nos artigos utilizados nesta revisão PRISMA.

Portanto, evidencia-se que a seleção de estratégias adequadas para cada sistema de cultivo é essencial para promover a sustentabilidade em sistemas agrícolas diversos. As interações entre os diferentes gases (CO₂, CH₄ e N₂O) e fatores ambientais demonstram a complexidade desses sistemas, reforçando a continuidade de pesquisas que explorem a eficiência dessas práticas a longo prazo e em diferentes contextos edafoclimáticos.

Tabela 4 - Potencial de mitigação dos GEE por práticas sustentáveis.

(continua)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %		
Acharya <i>et al.</i> (2022)	Plantio direto e Cobertura do solo	Controle: Pousio sem cultura de cobertura Gramíneas, brássicas e leguminosas	Sorgo - Fase da cultura de cobertura	10,5	-	-13,5	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	-	-	-		
				80,3	-	-13,1	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	764,76	97,04			
				62,7	-	-16,3	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	597,14	-	120,74		
				56,5	-	-6,3	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	538,10	-	46,67		
		Controle: Pousio sem cultura de cobertura Gramíneas, brássicas e leguminosas	Sorgo - Fase da cultura de comercial	85,8	-	7,7	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	-	-	-		
				113	-	34,4	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	131,70	-	446,75		
				85,7	-	16,1	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	99,88	-	209,09		
				100	-	15,3	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	116,55	-	198,70		
				Controle: Pousio sem cultura de cobertura Brássicas e leguminosas	Milho - Fase da cultura de cobertura	7,8		-3,4	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	-	-	-
						84,3		-6	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	1.080,77	-	176,47
78,2		-8,8	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹			1.002,56	-	258,82				

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
		Gramíneas e leguminosas		83,8		-10,2	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	1.074,36	-	300,00
		Controle: Pousio sem cultura de cobertura	Milho - Fase da cultura comercial	162	-	10,2	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	-	-	-
		Brássicas e leguminosas		136	-	9,2	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	83,95	-	90,20
		Gramíneas e brássicas		157	-	14,2	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	96,91	-	139,22
		Gramíneas e leguminosas		155	-	18,3	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	95,68	-	179,41
Sadiq <i>et al.</i> (2024)	Plantio direto e Retorno da palhada ao solo	Controle: Preparo convencional	-	260	-0,08	0,08	mg C m ⁻² h ⁻¹	-	-	-
		Incorporação de restolho com preparo convencional	-	245	-0,13	0,064	mg C m ⁻² h ⁻¹	94,23	-	80,00
		Sistema de plantio direto	-	171	-0,14	0,06	mg C m ⁻² h ⁻¹	65,77	-	75,00
		Gramíneas e brássicas		78,2		-8,8	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	1.002,56	-	258,82
		Gramíneas e leguminosas		83,8		-10,2	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	1.074,36	-	300,00

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
		Controle: Pousio sem cultura de cobertura	Milho - Fase da cultura comercial	162	-	10,2	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	-	-	-
		Brássicas e leguminosas		136	-	9,2	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	83,95	-	90,20
		Gramíneas e brássicas		157	-	14,2	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	96,91	-	139,22
		Gramíneas e leguminosas		155	-	18,3	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	95,68	-	179,41
Sadiq <i>et al.</i> (2024)	Plantio direto e Retorno da palhada ao solo	Controle: Preparo convencional	-	260	-0,08	0,08	mg C m ⁻² h ⁻¹	-	-	-
		Incorporação de restolho com preparo convencional	-	245	-0,13	0,064	mg C m ⁻² h ⁻¹	94,23	-	80,00
		Sistema de plantio direto	-	171	-0,14	0,06	mg C m ⁻² h ⁻¹	65,77	-	75,00
		Controle: Pousio sem cultura de cobertura	Milho - Fase da cultura comercial	162	-	10,2	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	-	-	-
		Brássicas e leguminosas		136	-	9,2	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	83,95	-	90,20
		Gramíneas e brássicas		157	-	14,2	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	96,91	-	139,22
		Gramíneas e leguminosas		155	-	18,3	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	95,68	-	179,41

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
Sadiq <i>et al.</i> (2024)	Plantio direto e Retorno da palhada ao solo	Controle: Preparo convencional	-	260	-0,08	0,08	mg C m ⁻² h ⁻¹	-	-	-
			Incorporação de restolho com preparo convencional	-	245	-0,13	0,064	mg C m ⁻² h ⁻¹	94,23	-
		Sistema de plantio direto	-	171	-0,14	0,06	mg C m ⁻² h ⁻¹	65,77	-	75,00
		Retorno de palha com plantio direto (sob plantio direto e sistema convencional de plantio)	-	180	-0,17	0,058	mg C m ⁻² h ⁻¹	69,23	-	72,50
Mirzaei <i>et al.</i> (2022)	Plantio direto- rotação de trigo- e Manejo de resíduos- 100%, 50% e remoção total.	Controle: Remoção total dos resíduos da cultura (sob preparo convencional)	CT - Preparo convencional	3,4	-	-	Mg ha ⁻¹ y ⁻¹	-	-	-

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
		50% dos resíduos da cultura (sob preparo convencional)		4,26	-	-	Mg ha ⁻¹ y ⁻¹	125,29	-	-
		100% dos resíduos da cultura (sob preparo convencional)		4,65	-	-	Mg ha ⁻¹ y ⁻¹	136,76	-	-
		Controle: Remoção total dos resíduos da cultura (sob plantio direto)	NT - Plantio direto	2,39	-	-	Mg ha ⁻¹ y ⁻¹	-	-	-
		50% dos resíduos da cultura (sob plantio direto)		2,40	-	-	Mg ha ⁻¹ y ⁻¹	100,42	-	-
		100% dos resíduos da cultura (sob plantio direto)		2,43	-	-	Mg ha ⁻¹ y ⁻¹	101,67	-	-
McDona ld <i>et al.</i> (2021)	Plantio direto e Retorno da palhada ao solo-Milho.	2016 - Controle: sem aplicação de nitrogênio	-	-	-	-0,2	kg ha ⁻¹	-	-	-
		2016 - 100% de N aplicado em uma aplicação pré-plantio	-	-	-	1,0	kg ha ⁻¹	-	-	-500,00

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
		2016 - 100% de N aplicado no meio da estação no primeiro crescimento reprodutivo da cultura do algodão	-	-	-	1,1	kg ha ⁻¹	-	-	-550,00
		2016 - 40% de N aplicado PP e 60% MS aplicado	-	-	-	0,8	kg ha ⁻¹	-	-	-400,00
		2016 - 100% de N aplicado PP com um produto estabilizador de N (Limus® Nitrogen Management)	-	-	-	0,5	kg ha ⁻¹	-	-	-250,00
		2017 - Controle: sem aplicação de nitrogênio	-	-	-	-0,2	kg ha ⁻¹	-	-	-
		2017 -100% de N aplicado em uma aplicação pré-plantio	-	-	-	0,6	kg ha ⁻¹	-	-	-275,00

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
		2017 - Controle: sem aplicação de nitrogênio	-	-	-	-0,2	kg ha ⁻¹	-	-	-
		2017 -100% de N aplicado em uma aplicação pré-plantio	-	-	-	0,6	kg ha ⁻¹	-	-	-275,00
		2017 - 100% de N aplicado no meio da estação no primeiro crescimento reprodutivo da cultura do algodão	-	-	-	0,5	kg ha ⁻¹	-	-	-250,00
		2017 - 40% de N aplicado PP e 60% MS aplicado	-	-	-	0,45	kg ha ⁻¹	-	-	-225,00
		2017 - 100% de N aplicado PP com um produto estabilizador de N (Limus® Nitrogen Management)	-	-	-	1,0	kg ha ⁻¹	-	-	-500,00
Du <i>et al.</i> (2023)	Plantio direto e Padrões de uso do solo.	Pastagem	-	-	-	1,7	kg ha ⁻¹	-	-	-
		Picea asperata	-	-	-	1,2	kg ha ⁻¹	-	-	70,59

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
		Hippophae rhamnoides	-	-	-	1,8	kg ha ⁻¹			105,88
		Medicago sativa	-	-	-	1,4	kg ha ⁻¹			82,35
		Lavoura convencional em campo de trigo	-	-	-	3,5	kg ha ⁻¹			205,88
		Plantio direto em campo de trigo	-	-	-	3,2	kg ha ⁻¹			188,24
Amami <i>et al.</i> (2021)	Plantio direto		As emissões de GEE foram medidas imediatamente após os manejos de preparo do solo							
		Plantio direto		100	-	-	mg m ⁻² h ⁻¹	-	-	-
		Aração rasa com arado de disco		130	-	-	mg m ⁻² h ⁻¹	130,00	-	-
		Aração média com arado de disco		140	-	-	mg m ⁻² h ⁻¹	140,00	-	-
		Aração profunda com arado de disco		160	-	-	mg m ⁻² h ⁻¹	160,00	-	-
		Aração rasa com arado de aiveca		125	-	-	mg m ⁻² h ⁻¹	125,00	-	-
		Aração média com arado de aiveca		140	-	-	mg m ⁻² h ⁻¹	140,00	-	-
		Aração profunda com arado de aiveca		150	-	-	mg m ⁻² h ⁻¹	150,00	-	-

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
			As emissões de GEE foram medidas no 10° dia após os manejos de preparo do solo							
		Plantio direto	solo	110	-	-	mg m ⁻² h ⁻¹	-	-	-
		Aração rasa com arado de disco		150	-	-	mg m ⁻² h ⁻¹	136,36	-	-
		Aração média com arado de disco		160	-	-	mg m ⁻² h ⁻¹	145,45	-	-
		Aração profunda com arado de disco		180	-	-	mg m ⁻² h ⁻¹	163,64	-	-
		Aração rasa com arado de aiveca		140	-	-	mg m ⁻² h ⁻¹	127,27	-	-
		Aração média com arado de aiveca		150	-	-	mg m ⁻² h ⁻¹	136,36	-	-
		Aração profunda com arado de aiveca		175	-	-	mg m ⁻² h ⁻¹	159,09	-	-
		Plantio direto	As emissões de GEE foram medidas no 10° dia após os manejos de preparo do solo	25	-	-	mg m ⁻² h ⁻¹	-	-	-

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
		Aração rasa com arado de disco		90	-	-	mg m ⁻² h ⁻¹	360,00	-	-
		Aração média com arado de disco		100	-	-	mg m ⁻² h ⁻¹	400,00	-	-
		Aração profunda com arado de disco		105	-	-	mg m ⁻² h ⁻¹	420,00	-	-
		Aração rasa com arado de aiveca		75	-	-	mg m ⁻² h ⁻¹	300,00	-	-
		Aração média com arado de aiveca		80	-	-	mg m ⁻² h ⁻¹	320,00	-	-
		Aração profunda com arado de aiveca		90	-	-	mg m ⁻² h ⁻¹	360,00	-	-
Moham med <i>et al.</i> (2021)	Plantio direto	Controle 1: Lavoura convencional em campos de milho	Região continental (Debrecen, Hungria)	174,72	-	-	emission ppm	-	-	-
		Plantio direto em campos de milho	Região continental (Debrecen, Hungria)	102,83	-	-	emission ppm	58,85	-	-
		Controle 2: Lavoura convencional em campos de milho	Região semiárida (Karaj, Irã)	538,92	-	-	emission ppm	-	-	-
		Plantio direto em campos de milho	Região semiárida (Karaj, Irã)	418,93	-	-	emission ppm	77,74	-	-

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
Nyambo , Cornelius e Araya (2020)	Biocarvão, Manejo de resíduos de cultura e Plantio direto	Controle: Preparo convencional	-	2,52	-	-	moL m ² s ⁻¹	-	-	-
		Plantio direto, sem revolvimento do solo	-	1,8	-	-	moL m ² s ⁻¹	71,43	-	-
		Retenção de resíduos da cultura	-	2,32	-	-	moL m ² s ⁻¹	92,06	-	-
		Biocarvão (produzido a partir dos resíduos culturais obtidos durante as estações de verão e inverno)	-	2,36	-	-	moL m ² s ⁻¹	93,65	-	-
		Remoção de resíduos de colheita	-	2,04	-	-	moL m ² s ⁻¹	80,95	-	-
Gay <i>et al.</i> (2022)	Biofertilizante	Controle - Cultivo sem aplicação de biofertilizante ou ureia.	Durante a estação de crescimento - avalia o impacto dos diferentes tratamentos.	0,09	-0,88	1,57	μmol m ⁻² hour ⁻¹	-	-	-

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
		Cultivo com aplicação de biofertilizante.		0,12	-0,99	1,94	μmol m ⁻² hour ⁻¹	133,33	112,50	123,57
		Cultivo com aplicação de ureia.		0,05	-0,84	1,57	μmol m ⁻² hour ⁻¹	55,56	95,45	100,00
		Cultivo de capim-switchgrass (Panicum virgatum)	Ao longo dos meses do experimento	1,2	-0,82	0,05	μmol m ⁻² s ⁻¹	1.333,33	93,18	3,18
		Cultivo de grama-trigo (Thinopyrum ponticum) sob aplicação de Biofertilizante		1,7	-0,94	0,15	μmol m ⁻² s ⁻¹	1.888,89	106,82	9,55
Bai <i>et al.</i> (2023)	Biocarvão, manejo de adubação nitrogenada e manejo de resíduos da cultura	2018 - 2019: fertilização convencional sem incorporação de palha	-	14.971,9	-1,29	4	kg ha ⁻¹	-	-	-

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
		2018 - 2019: fertilização convencional com incorporação de palha	-	19619,8	-1,07	5,8	kg ha ⁻¹	131,04	82,95	145,00
		2018 - 2019: fertilização convencional com incorporação de palha e alteração de biochar	-	16195,5	-0,3	3,7	kg ha ⁻¹	108,17	23,26	92,50
		2018 - 2019: redução de 30% na aplicação de fertilizante nitrogenado sem incorporação de palha;	-	13087,5	-1,66	2,3	kg ha ⁻¹	87,41	128,68	57,50
		2018 - 2019: redução de 30% na aplicação de fertilizante nitrogenado com incorporação de palha	-	17543,4	-1,46	2,9	kg ha ⁻¹	117,18	113,18	72,50

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
		2018 - 2019: redução de 30% na aplicação de fertilizante nitrogenado com incorporação de palha e alteração de biochar.	-	12512,3	-0,4	2,2	kg ha ⁻¹	83,57	31,01	55,00
		2018 - 2019: redução de 30% na aplicação de fertilizante nitrogenado sem incorporação de palha;	-	13087,5	-1,66	2,3	kg ha ⁻¹	87,41	128,68	57,50
		2018 - 2019: redução de 30% na aplicação de fertilizante nitrogenado com incorporação de palha	-	17543,4	-1,46	2,9	kg ha ⁻¹	117,18	113,18	72,50
		2018 - 2019: redução de 30% na aplicação de fertilizante nitrogenado sem incorporação de palha;	-	13087,5	-1,66	2,3	kg ha ⁻¹	87,41	128,68	57,50

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
		2018 - 2019: redução de 30% na aplicação de fertilizante nitrogenado com incorporação de palha	-	17543,4	-1,46	2,9	kg ha ⁻¹	117,18	113,18	72,50
		2018 - 2019: redução de 30% na aplicação de fertilizante nitrogenado com incorporação de palha e alteração de biochar.	-	12512,3	-0,4	2,2	kg ha ⁻¹	83,57	31,01	55,00
Bai <i>et al.</i> (2023)	Biocarvão, manejo de adubação nitrogenada e manejo de resíduos da cultura	2019 - 2020: fertilização convencional sem incorporação de palha	-	16283,9	-1,52	4,6	kg ha ⁻¹	-	-	-
		2019 - 2020: fertilização convencional com incorporação de palha	-	18860,3	-1,18	7,8	kg ha ⁻¹	115,82	77,63	169,57

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
		2019 - 2020: fertilização convencional com incorporação de palha e alteração de biocarvão	-	14758,5	-0,3	6,3	kg ha ⁻¹	90,63	19,74	136,96
		2019 - 2020: redução de 30% na aplicação de fertilizante nitrogenado sem incorporação de palha;	-	14569,6	-1,99	3,5	kg ha ⁻¹	89,47	130,92	76,09
		2019 - 2020: redução de 30% na aplicação de fertilizante nitrogenado com incorporação de palha	-	16313,5	-1,59	6,3	kg ha ⁻¹	100,18	104,61	136,96
		2019 - 2020: redução de 30% na aplicação de fertilizante nitrogenado com incorporação de palha e alteração de biocarvão.	-	14230,3	-0,31	4,1	kg ha ⁻¹	87,39	20,39	89,13

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
		2020 - 2021: fertilização convencional sem incorporação de palha	-	15730,8	-1,5	3,7	kg ha ⁻¹	-	-	-
		2020 - 2021: fertilização convencional com incorporação de palha	-	20269,1	-1,3	6,4	kg ha ⁻¹	128,85	86,67	172,97
		2020 - 2021: fertilização convencional com incorporação de palha e alteração de biocarvão	-	16559,1	-0,3	4,4	kg ha ⁻¹	105,27	20,00	118,92
		2020 - 2021: redução de 30% na aplicação de fertilizante nitrogenado sem incorporação de palha;	-	13291,8	-1,99	2,4	kg ha ⁻¹	84,50	132,67	64,86

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
		2020 - 2021: redução de 30% na aplicação de fertilizante nitrogenado com incorporação de palha	-	16891,4	-1,79	4,4	kg ha ⁻¹	107,38	119,33	118,92
		2020 - 2021: redução de 30% na aplicação de fertilizante nitrogenado com incorporação de palha e alteração de biocarvão.	-	13469,4	-0,34	2,9	kg ha ⁻¹	85,62	22,67	78,38
McDona Id <i>et al.</i> (2023)	Manejo de adubação nitrogenada, Plantio direto e Retorno da palhada ao solo	Controle: cultivo de algodão sem fertilizante N adicionado (início)	Início da temporada (junho - durante o crescimento vegetativo)	-	-	-218	μg m ⁻² d ⁻¹	-	-	-
		100% de aplicação pré-plantio de fertilizante N (168 kg ha ⁻¹) (início)		-	-	8071	μg m ⁻² d ⁻¹	-	-	- 3.702,29

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
		40% PP 60% de aplicação de fertilizante N de meia estação (início)		-	-	1697	μg m ⁻² d ⁻¹	-	-	-778,44
		Controle: sem fertilizante N adicionado (meio)	Meio da temporada (agosto, pico da produção da planta)	-	-	-362	μg m ⁻² d ⁻¹	-	-	-
		100% de aplicação pré-plantio de fertilizante N (168 kg ha ⁻¹) (meio)		-	-	-106	μg m ⁻² d ⁻¹	-	-	29,28
		40% PP 60% de aplicação de fertilizante N de meia estação (meio)		-	-	2307	μg m ⁻² d ⁻¹	-	-	-637,29
Pratibha <i>et al.</i> (2023)	Plantio direto e retorno da palhada ao solo	Controle: preparo convencional, nível de resíduo =0	-	2326	0,2	0,37	kg ha ⁻¹ season ⁻¹	-	-	-
		Preparo convencional, nível de resíduo = R1	-	3391	0,16	0,47	kg ha ⁻¹ season ⁻¹	145,79	80,00	127,03

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
		Preparo convencional, nível de resíduo = R2	-	3450	0,11	0,57	kg ha ⁻¹ season ⁻¹	148,32	55,00	154,05
		Preparo reduzido, nível de resíduo = 0	-	1976	0,14	0,37	kg ha ⁻¹ season ⁻¹	84,95	70,00	100,00
		Preparo reduzido, nível de resíduo = R1	-	2359	0,15	0,46	kg ha ⁻¹ season ⁻¹	101,42	75,00	124,32
		Preparo reduzido, nível de resíduo = R2	-	2413	0,15	0,43	kg ha ⁻¹ season ⁻¹	103,74	75,00	116,22
		Preparo zero, nível de resíduo = 0	-	2071	0,12	0,42	kg ha ⁻¹ season ⁻¹	89,04	60,00	113,51
		Preparo zero, nível de resíduo = R1	-	2294	0,03	0,35	kg ha ⁻¹ season ⁻¹	98,62	15,00	94,59
		Preparo zero, nível de resíduo = R2	-	2637	0,03	0,4	kg ha ⁻¹ season ⁻¹	113,37	15,00	108,11
Fudjoe <i>et al.</i> (2023)	Manejo de adubação nitrogenada e Retorno da palhada ao solo	Controle: 2020 - sem fertilização	-	-	-	25	mgm ⁻² h ⁻¹	-	-	-
		2020: Fertilizante orgânico	-	-	-	115,5	mgm ⁻² h ⁻¹	-	-	462,00

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
		2020: Palha de milho	-	-	-	98	mgm ⁻² h ⁻¹	-	-	392,00
		Controle: 2021- sem fertilização	-	-	-	18	mgm ⁻² h ⁻¹	-	-	-
		2021, SM: Fertilizante orgânico	-	-	-	110	mgm ⁻² h ⁻¹	-	-	611,11
		2021: Palha de milho	-	-	-	80	mgm ⁻² h ⁻¹	-	-	444,44
Marín-Martínez <i>et al.</i> (2021)	Compostagem de resíduos orgânicos e Esterco de cabra/ovelha	Controle: sem aditivos orgânicos	Vinhedo de Monastrell sem treliças de sequeiro por gotejamento	749	-1,41	0,18	kg ha ⁻¹	-	-	-
		Controle: sem aditivos orgânicos	Vinhedo de Monastrell com treliças irrigado por gotejamento	650	-0,9	0,16	kg ha ⁻¹	86,78	63,83	88,89
		Controle: sem aditivos orgânicos	Vinhedo de Cabernet Sauvignon com treliças irrigado	525	-1,5	0,05	kg ha ⁻¹	70,09	106,38	27,78

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
		Esterco de ovelha/cabra	Vinhedo de Monastrell sem treliças de sequeiro por gotejamento	775	-1,43	0,36	kg ha ⁻¹	-	-	-
		Esterco de ovelha/cabra	Vinhedo de Monastrell com treliças irrigado por gotejamento	2260	-1,02	0,12	kg ha ⁻¹	291,61	71,33	33,33
		Esterco de ovelha/cabra	Vinhedo de Cabernet Sauvignon com treliças irrigado	1505	-0,83	0,23	kg ha ⁻¹	194,19	58,04	63,89
		Composto de destilaria	Vinhedo de Monastrell sem treliças de sequeiro por gotejamento	748	-0,21	0,22	kg ha ⁻¹	-	-	-
		Composto de destilaria	Vinhedo de Monastrell com treliças irrigado por gotejamento	1510	-0,8	0,22	kg ha ⁻¹	201,87	380,95	100,00

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
		Composto de destilaria	Vinhedo de Cabernet Sauvignon com treliças irrigado	1000	-0,82	0,15	kg ha ⁻¹	133,69	390,48	68,18
Qian <i>et al.</i> (2023)	Filme plástico biodegradável e Manejo de resíduos de cultura	2019: Plantio plano com cobertura total de filme biodegradável, sem incorporação de palha.	-	-	-2	0,6	kg ha ⁻¹	-	-	-
		2019: Plantio plano com cobertura total de filme biodegradável e incorporação de palha.	-	-	-	0,80%	kg ha ⁻¹	-	1,05	1,33
		2019: Semeadura em sulco duplo com cobertura total de filme biodegradável e incorporação de palha	-	-	-1,9	0,9	kg ha ⁻¹	-	95,00	150,00

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
		2019: Semeadura em sulco duplo com cobertura total de filme biodegradável, sem incorporação de palha	-	-	-1,8	0,85	kg ha ⁻¹	-	90,00	141,67
		2020: Plantio plano com cobertura total de filme biodegradável, sem incorporação de palha.	-	-	-3,5	0,85	kg ha ⁻¹	-	-	-
		2020: Plantio plano com cobertura total de filme biodegradável e incorporação de palha.	-	-	-4	1,52%	kg ha ⁻¹	-	114,29	1,79
		2020: Semeadura em sulco duplo com cobertura total de filme biodegradável e incorporação de palha	-	-	-3,9	1,4	kg ha ⁻¹	-	111,43	164,71

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
		2020: Semeadura em sulco duplo com cobertura total de filme biodegradável, sem incorporação de palha	-	-	-3,49	1	kg ha ⁻¹	-	99,71	117,65
		2021: Plantio plano com cobertura total de filme biodegradável, sem incorporação de palha.	-	-	-3,9	1	kg ha ⁻¹	-	-	-
		2021: Plantio plano com cobertura total de filme biodegradável e incorporação de palha.	-	-	4,30%	1,01%	kg ha ⁻¹	-	1,10	1,01
		2021: Semeadura em sulco duplo com cobertura total de filme biodegradável e incorporação de palha	-	-	-4,49	1,02	kg ha ⁻¹	-	115,13	102,00

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
		2021: Semeadura em sulco duplo com cobertura total de filme biodegradável, sem incorporação de palha	-	-	-3,8	1,01	kg ha ⁻¹	-	97,44	101,00
Bhattacharya <i>et al.</i> (2023)	Manejo de resíduos de cultura e Plantio direto	2020-21- Controle: Plantio convencional e remoção de resíduos	-	570,6	-	0,57	kg-N ha ⁻¹ /estação	-	-	-
		2020-21: Preparo convencional com retenção de resíduos	5 t ha ⁻¹ de palha de milho	757,69	-	0,68	kg-N ha ⁻¹ /estação	132,79	-	119,30
		2020-21: Plantio direto	-	519,13	-	0,72	kg-N ha ⁻¹ /estação	90,98	-	126,32
		2020-21: Plantio direto com retenção de resíduos	5 t ha ⁻¹ de palha de milho	587,31	-	0,75	kg-N ha ⁻¹ /estação	102,93	-	131,58
Bhattacharya <i>et al.</i> (2023)	Manejo de resíduos de cultura e Plantio direto	2021-22- Controle: Plantio convencional e remoção de resíduos	-	689,43	-	0,63	kg-N ha ⁻¹ /estação	-	-	-

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
		2021-22: Preparo convencional com retenção de resíduos	5 t ha ⁻¹ de palha de milho	778,03	-	0,68	kg-N ha ⁻¹ /estação	112,85	-	107,94
		2021-22: Plantio direto	-	500,93	-	0,72	kg-N ha ⁻¹ /estação	72,66	-	114,29
		2021-22: Plantio direto com retenção de resíduos	5 t ha ⁻¹ de palha de milho	628,73	-	0,75	kg-N ha ⁻¹ /estação	91,20	-	119,05
Jiao <i>et al.</i> (2021)	Plantio direto e retorno da palhada ao solo	Controle: Preparo rotativo contínuo (10-12 cm)	-	3184,01	0,77	2,43	kg CO ₂ -C ha ⁻¹	-	-	-
		Preparo direto contínuo (0-20cm)	-	2620,8	0,65	2,66	kg CO ₂ -C ha ⁻¹	82,31	84,42	109,47
		Preparo rotativo com aração (0-20cm)	-	2039,55	1,02	2,27	kg CO ₂ -C ha ⁻¹	64,06	132,47	93,42
		Preparo direto com aração (0-20 cm)	-	2478,59	0,17	1,73	kg CO ₂ -C ha ⁻¹	77,84	22,08	71,19
		Controle: preparo rotativo contínuo (20-40 cm)	-	1148,24	-0,18	0,2	kg CO ₂ -C ha ⁻¹	-	-	-

(continuação)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
		Preparo direto contínuo (20-40 cm)	-	1967,44	-0,26	0,32	kg CO ₂ -C ha ⁻¹	171,34	144,44	160,00
		Preparo rotativo com aração (20-40 cm)	-	1088,15	-0,15	0,08	kg CO ₂ -C ha ⁻¹	94,77	83,33	40,00
		Preparo direto com aração (20-40 cm)	-	555,73	-0,19	0,22	kg CO ₂ -C ha ⁻¹	48,40	105,56	110,00
		Controle: preparo rotativo contínuo (0-40 cm)	-	4332,25	0,59	2,63	kg CO ₂ -C ha ⁻¹	-	-	-
		Preparo direto contínuo (0-40 cm)	-	4588,24	0,39	2,98	kg CO ₂ -C ha ⁻¹	105,91	66,10	113,31
		Preparo rotativo com aração (0-40cm)	-	3127,7	0,87	2,35	kg CO ₂ -C ha ⁻¹	72,20	147,46	89,35
		Preparo direto com aração (0-40cm)	-	3034,32	-0,02	1,95	kg CO ₂ -C ha ⁻¹	70,04	-3,39	74,14
Alhassan <i>et al.</i> (2021)	Plantio direto e retorno da palhada ao solo	Controle: cultivo convencional	-	11,14	-0,21	0,04	tCO ₂ eha ⁻¹ y ⁻¹	-	-	-
		Cultivo convencional com cobertura de palha	-	10,65	-0,23	0,22	tCO ₂ eha ⁻¹ y ⁻¹	95,60	109,52	628,57

(conclusão)

Autores	Prática sustentável	Tratamento	Descrição	CO₂	CH₄	N₂O	Emissão ou Fluxo	CO₂ %	CH₄ %	N₂O %
		Plantio direto	-	7,37	-0,25	0,18	tCO ₂ eha ⁻¹ y ⁻¹	66,16	119,05	514,29
		Plantio direto com cobertura de palha	-	6,65	-0,27	0,17	tCO ₂ eha ⁻¹ y ⁻¹	59,69	128,57	485,71

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Notas: O traço (–) indica ausência de informação. A coluna de descrição descreve informações complementares aos tratamentos; CO₂%, CH₄% e N₂O% indica a porcentagem de mitigação alcançada por meio do tratamento referente. A tabela apresenta a ausência de um artigo, no qual não foi possível realizar a extração das informações necessárias para sua construção.

4 CONCLUSÃO

O sistema de plantio direto, tanto isolado quanto em associado a outras práticas, é apontado como uma eficiente opção para a redução na emissão de GEE em regiões semiáridas, tendo sido observadas reduções de até 26,3% nas emissões em solos não revolvidos quando comparados a solos submetidos ao revolvimento. Outras práticas como a utilização da fertilização reduzida associada ao biocarvão, o uso combinado de fertilizantes orgânicos e minerais, a compostagem de resíduos orgânicos, o ajuste da dose de N conforme a demanda da cultura, o uso de estabilizadores de N e a aplicação de biocarvão ao solo são apontadas como eficientes na mitigação das emissões de GEE pelos solos cultivados em regiões semiáridas.

A temperatura e a umidade do solo foram fatores ambientais que produziram variações nas emissões de GEE, pois influenciaram os processos de nitrificação e desnitrificação, a atividade microbiana do solo e os processos de decomposição de matéria orgânica. Assim, enfatiza-se a importância da escolha adequada das práticas de manejo, considerando as especificidades de cada ambiente de produção, especialmente em cultivos irrigados em ambientes semiáridos.

REFERÊNCIAS

ACHARYA, P.; GHIMIRE, R.; PAYE, W. S.; GANGULI, A. C.; DELGROSSO, S. J. Net greenhouse gas balance with cover crops in semi-arid irrigated cropping systems. **Scientific Reports**, v. 12, n. 12386, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16719-w>.

ALHASSAN, A. R. M.; YANG, C.; MA, W.; LI, G. Influence of conservation tillage on greenhouse gas fluxes and crop productivity in spring-wheat agroecosystems on the Loess Plateau of China. **PeerJ**, v. 9, e11064, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.7717/peerj.11064>.

AMAMI, R.; IBRAHIMI, K.; LA SCALA JÚNIOR, N.; HMILA, A.; ABROUGUI, K.; CHEHAIBI, S. Soil physical properties, carbon dioxide emissions, and their relationships under different management systems in semi-arid region of Eastern Tunisia. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 52, n. 14, p. 1689–1705, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1892729>.

BHATTACHARYA, P.; BANDYOPADHYAY, K. K.; KRISHNAN, P.; MAITY, P. P.; PURAKAYASTHA, T. J.; BHATIA, A.; CHAKRABARTI, B.; KUMAR, S. N.; ADAK, S.; TOMER, R.; MEENAKSHI. Impact of tillage and residue management on greenhouse gas emissions and global warming potential of winter wheat in a semi-arid climate. **Journal of Agrometeorology**, v. 25, n. 4, p. 503-509, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.54386/jam.v25i4.2337>.

BAI, J.; SONG, J.; CHEN, D.; ZHANG, Z.; YU, Q.; REN, G.; HAN, X.; WANG, X.; REN, C.; YANG, G.; WANG, X.; FENG, Y. Biochar combined with N fertilization and straw return in wheat-maize agroecosystem: Key practices to enhance crop yields and minimize carbon and nitrogen footprints. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 347, 108366, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108366>.

DU, M.; YUAN, J.; ZHUO, M.; SADIQ, M.; WU, J.; XU, G.; LIU, S.; LI, J.; LI, G.; YAN, L. Effects of different land use patterns on soil properties and N₂O emissions on a semi-arid

Loess Plateau of Central Gansu. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 11, 1128236, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1128236>.

FUDJOE, S. K.; LI, L.; ANWAR, S.; SHI, S.; XIE, J.; YEBOAH, F. K.; WANG, L. The impact of fertilization on ammonia-oxidizing bacteria and comammox Nitrospira communities and the subsequent effect on N₂O emission and maize yield in a semi-arid region. **Frontiers in Microbiology**, v. 14, 1249668, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1249668>.

GAY, J. D.; GOEMANN, H. M.; CURREY, B.; STOY, P. C.; CHRISTIANSEN, J. R.; MILLER, P. R.; POULTER, B.; PEYTON, B. M.; BROOKSHIRE, E. N. J. Climate mitigation potential and soil microbial response of cyanobacteria-fertilized bioenergy crops in a cool semi-arid cropland. **GCB Bioenergy**, v. 14, n. 12, p. 1303-1320, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcbb.13001>.

JIAO, S.; SUI, B.; WANG, H.; CHEN, B.; XOMPHOUTHEB, T.; ZHAO, X. Comparative effects of long-term conventional tillage and no-till systems on greenhouse gas emissions in continuous maize monoculture soil in a semi-arid temperate climate. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 14, 181, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06472-1>.

MARÍN-MARTÍNEZ, A.; SANZ-COBEÑA, A.; BUSTAMANTE, M. A.; AGULLÓ, E.; PAREDES, C. Effect of organic amendment addition on soil properties, greenhouse gas emissions and grape yield in semi-arid vineyard agroecosystems. **Agronomy**, v. 11, n. 8, p. 1477, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy11081477>.

MENDONÇA, S. R.; ÁVILA, M. C. R.; VITAL, R. G.; EVANGELISTA, Z. R.; PONTES, N. C.; NASCIMENTO, A. dos R. Effect of different mulching on tomato development and yield. **Scientia Horticulturae**, v. 275, 109657, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109657>.

MCDONALD, M. D.; LEWIS, K. L.; DELAUNE, P. B.; BOUTTON, T. W.; REED, J. D.; GENTRY, T. J. Nitrous oxide consumption potential in a semi-arid agricultural system: effects of conservation soil management and nitrogen timing on nosZ mediated N₂O consumption. **Frontiers in Environmental Science**, v. 9, 702806, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.702806>.

MCDONALD, M. D.; LEWIS, K. L.; DELAUNE, P. B.; HUX, B. A.; BOUTTON, T. W.; GENTRY, T. J. Nitrogen fertilizer driven nitrous and nitric oxide production is decoupled from microbial genetic potential in low carbon, semi-arid soil. **Frontiers in Soil Science**, v. 2, 1050779, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.1050779>.

MIRZAEI, M.; GORJI ANARI, M.; DIAZ-PINES, E.; SARONJIC, N.; MOHAMMED, S.; SZABO, S.; MOUSAVI, S. M. N.; CABALLERO-CALVO, A. Assessment of soil CO₂ and NO fluxes in a semi-arid region using machine learning approaches. **Journal of Arid Environments**, v. 211, 104947, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2023.104947>.

MIRZAEI, M.; GORJI ANARI, M.; RAZAVY-TOOSI, E.; ZAMAN, M.; SARONJIC, N.; ZAMIR, S. M.; MOHAMMED, S.; CABALLERO-CALVO, A. Crop residues in corn-wheat rotation in a semi-arid region increase CO₂ efflux under conventional tillage but not in a no-

tillage system. **Pedobiologia - Journal of Soil Ecology**, v. 93-94, p. 150819, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2022.150819>.

MOHAMMED, S.; MIRZAEI, M.; PAPPNÉ TÖRŐ, Á.; GORJI ANARI, M.; MOGHISEH, E.; ASADI, H.; SZABÓ, S.; KAKUSZI-SZÉLES, A.; HARSÁNYI, E. Soil carbon dioxide emissions from maize (*Zea mays* L.) fields as influenced by tillage management and climate. **Irrigation and Drainage**, v. 71, n. 1, p. 228–240, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ird.2633>.

NYAMBO, P.; CORNELIUS, C.; ARAYA, T. Carbon dioxide fluxes and carbon stocks under conservation agricultural practices in South Africa. **Agriculture**, v. 10, n. 9, 374, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture10090374>.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. SEEG – Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. Versão 12. Disponível em: <https://seeg.eco.br>. Data da última atualização: 08 nov. 2024.

PAGE, M. J.; MCKENZIE, J. E.; BOSSUYT, P. M.; BOUTRON, I.; HOFFMANN, T. C.; MULROW, C. D.; SHAMSEER, L.; TETZLAFF, J. M.; AKL, E. A.; BRENNAN, S. E.; CHOU, R.; GLANVILLE, J.; GRIMSHAW, J. M.; HRÓBJARTSSON, A.; LALU, M. M.; LI, T.; LODER, E. W.; MAYO-WILSON, E.; MCDONALD, S.; MCGUINNESS, L. A.; STEWART, L. A.; THOMAS, J.; TRICCO, A. C.; WELCH, V. A.; WHITING, P.; MOHER, D. A declaração PRISMA 2020: diretriz atualizada para relatar revisões sistemáticas. **Revista Panamericana de Salud Pública**, v. 46, p. e112, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.26633/RPSP.2022.112>.

PRATIBHA, G.; MANJUNATH, M.; RAJU, B. M. K.; SRINIVAS, I.; RAO, K. V.; SHANKER, A. K.; PRASAD, J. V. N. S.; RAO, M. S.; KUNDU, S.; INDORIA, A. K.; KUMAR, U.; RAO, K. S.; ANNA, S.; RAO, C. S.; SINGH, V. K.; BISWAS, A. K.; CHAUDHARI, S. K. Soil bacterial community structure and functioning in a long-term conservation agriculture experiment under semi-arid rainfed production system. **Frontiers in Microbiology**, v. 14, 1102682, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1102682>.

QIAN, R.; GUO, R.; NASEER, M. A.; ZHANG, P.; CHEN, X.; REN, X. Long-term straw incorporation regulates greenhouse gas emissions from biodegradable film farmland, improves ecosystem carbon budget and sustainable maize productivity. **Field Crops Research**, v. 295, 108890, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108890>.

SADIQ, M.; RAHIM, N.; TAHIR, M. M.; ALASMARI, A.; ALQAHTANI, M. M.; ALBOGAMI, A.; GHANEM, K. Z.; ABDEIN, M. A.; ALI, M.; MEHMOOD, N.; YUAN, J.; SHAHEEN, A.; SHEHZAD, M.; EL-SAYED, M. H.; CHEN, G.; LI, G. Conservation tillage: a way to improve yield and soil properties and decrease global warming potential in spring wheat agroecosystems. **Frontiers in Microbiology**, v. 15, 1356426, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1356426>.

SOUSA, V. F. de; MAROUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. (Eds.). Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças. Brasília, DF: **Embrapa Informação Tecnológica**, 2011. 771 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/livraria>.

SOUSA, V. F. de; MAROUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. (Eds.). **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. 771 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/livraria>.

SIGNOR, D.; MORAES, S. A. Emissão de gases de efeito estufa em sistemas produtivos no Nordeste brasileiro. In: VOLTOLINI, T. V.; MORAES, S. A.; ARAÚJO, G. G. L.; SANTOS, R. M. (org.). **Sistemas produtivos no Nordeste brasileiro**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2021. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1140439/1/EMISSAO-DE-GASES-DE-EFEITO-ESTUFA-2021.pdf>.

WU, X.; LI, J.; XUE, X.; WANG, R.; LIU, W.; YANG, B.; JIA, Z.; ZHANG, X.; HAN, Q. Matching fertilization with available soil water storage to tackle the trade-offs between high yield and low N₂O emissions in a semi-arid area: Mechanisms and solutions. **Agricultural Water Management**, v. 288, 108488, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108488>.

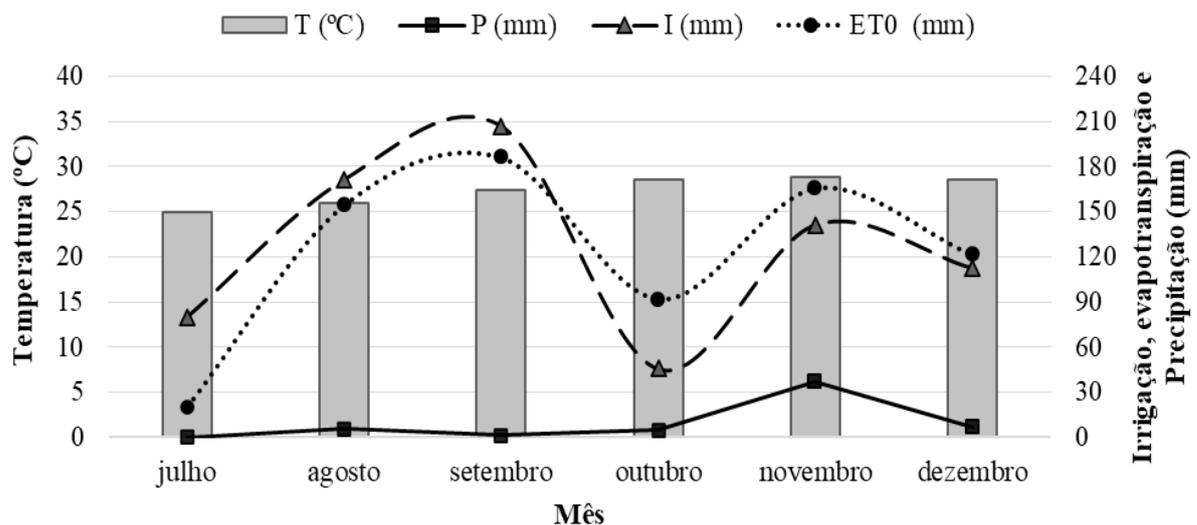
YUAN, J.; YAN, L.; LI, G.; SADIQ, M.; RAHIM, N.; WU, J.; MA, W.; XU, G.; DU, M. Effects of conservation tillage strategies on soil physicochemical indicators and N₂O emission under spring wheat monocropping system conditions. **Scientific Reports**, v. 12, n. 7066, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11391-6>.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este estudo foi realizado em 2023, no Campo Experimental de Bebedouro, da Embrapa Semiárido, localizada em Petrolina–PE. Trata-se de uma pesquisa de longa duração iniciada em 2012, implantada em Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico plíntico. O clima local foi classificado com semiárido (BSwh', Köppen), com precipitação anual inferior a 800 mm, temperaturas médias entre 23 e 27°C e vegetação de Caatinga (Moura et al., 2007).

Durante o experimento, a temperatura média foi de 27,64 °C, com máxima de 34,36 °C e mínima de 21,37 °C. A precipitação acumulada no período foi de 5,30 mm. As médias de irrigação e evapotranspiração foram de 12,55 mm e 5,83 mm, respectivamente (Gráfico 1). A irrigação foi realizada ao longo de todo o experimento, exceto em um intervalo de 15 dias destinado à incorporação da biomassa das plantas de cobertura ao solo.

Gráfico 1 - Médias de temperatura - T (°C) e valores de evapotranspiração – ET0 (mm), precipitação – P (mm) e irrigação – I (mm) do agroecossistema 2023.



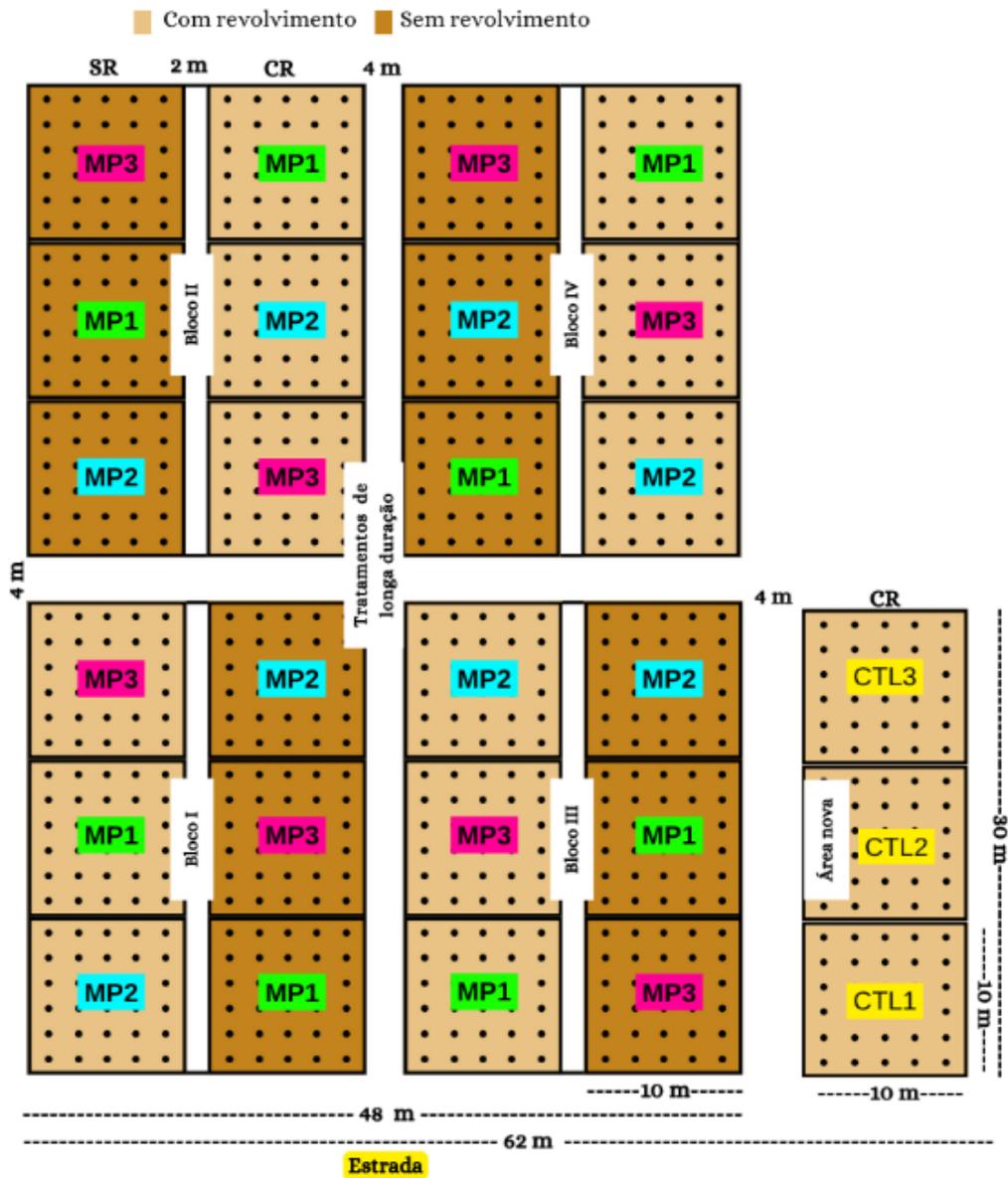
Fonte: Elaborado pela própria autora.

O sistema experimental é composto por cultivo de plantas de cobertura, seguido do plantio de meloeiro amarelo, finalizando com pousio até o início do novo ciclo. Os tratamentos foram implantados sequencialmente entre 2012 e 2019. Em 2020, 2021 e 2022, a área permaneceu em pousio. Em 2023, os cultivos foram retomados.

O delineamento experimental seguiu o modelo de blocos casualizados, em parcelas subdivididas, com quatro repetições, conforme os anos anteriores. Os tratamentos consistiram em dois manejos do solo (com e sem revolvimento) e três misturas de plantas de cobertura:

MP1 (79% leguminosas, 21% gramíneas e oleaginosas), MP2 (70% gramíneas e oleaginosas, 30% leguminosas) e MP3 (vegetação espontânea). Também foi incluído um tratamento adicional com preparo convencional do solo e sem cobertura vegetal.

Figura 2 - Croqui do experimento de agroecossistemas multifuncionais para cultivo do meloeiro amarelo.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Notas: MP1: 79% de leguminosas e 21% de gramíneas + oleaginosas; MP2: 70% de leguminosas + 30% de gramíneas e oleaginosas de indivíduos/sementes semeadas em campo; MP3: vegetação espontânea. CTL1, 2 e 3: tratamento controle, cultivo convencional sem plantas de cobertura e com preparo de solo.

As misturas de plantas foram compostas pela combinação de quantidades de sementes de 13 espécies de leguminosas, gramíneas e oleaginosas, a saber: *Calopogonium mucunoides* Desv., *Stizolobium aterrimum* Piper & Tracy, *Mucuna cochinchinensis* (Lour.) A. Chev., *Crotalaria juncea* L., *Crotalaria spectabilis* Roth, *Canavalia ensiformis* (L.), *Cajanus cajan* (L.), *Dolichos lablab* L., *Zea mays* L., *Pennisetum americanum* (L.), *Sorghum vulgare* Pers., *Sesamum indicum* L., *Ricinus communis* L e *Helianthus annuus* L..

Nas parcelas com vegetação espontânea, em ciclos anteriores, foi feito o inventário das espécies presentes antes do manejo das plantas (Salviano *et al.*, 2023). As espécies predominantes foram: Anileira (*Indigofera hirsuta* L.), Beldroega (*Portulaca oleracea* L.), Cabeça de touro (*Tribulus terrestris*), Capim alpiste (*Eragrostis pilosa* (L.) P. Beauv.), Capim barbicha de alemão (*Eragrostis pilosa* (L.) P. Beauv.), Capim-mão-de-sapo (*Dactyloctenium aegyptium* (L.) Willd.), Capim-tapete/Cabelo-de-guia (*Mollugo verticillata* L.), Erva Santa Luzia (*Chamaesyce hirta* (L.) Milisp), Jetirana/Jetirana cabeluda (*Merremia aegyptia* (L.) Urb.), Malva-veludo (*Sida cordifolia* L.), Poaia/Poaia-branca (*Richardia grandifolia* (Cham. & Schldt.) Steud), Quebra-pedra (*Phyllanthus* sp), Sensitiva (*Mimosa candollei* R. Grether), Timbete/Carrapicho (*Cenchrus echinatus* L.), Trapoeraba (*Commelina benghalensis* L.), Velame/Café bravo (*Croton lobatus* L.) (Salviano *et al.*, 2023).

As misturas de plantas foram semeadas em 26 de julho de 2023, em semeadura direta, com irrigação por gotejamento três vezes por semana. Aos 64 dias após a semeadura, foi determinada a produção de matéria seca da parte aérea, e aos 70 dias, as plantas foram cortadas. O material vegetal foi incorporado ao solo nas parcelas com revolvimento e mantido na superfície nas parcelas sem revolvimento. O teor de nitrogênio total foi determinado pelo método de Kjeldahl.

A semeadura do meloeiro amarelo (cv. Gladial) foi realizada em bandejas e, após 12 dias, as mudas foram transplantadas para o campo. O espaçamento foi de 0,3 m × 2 m, com irrigação por gotejamento e fertirrigação três vezes por semana, conforme os coeficientes de cultura e dados meteorológicos.

Durante o cultivo das MPs e do melão, foram realizados tratamentos culturais específicos, incluindo capinas, manejo da vegetação espontânea, controle fitossanitário e preparo do solo conforme o tratamento. A colheita dos frutos foi feita aos 61 dias após o transplante, com avaliação da produtividade comercial e não comercial, °Brix e tamanho dos frutos.

As emissões de GEE (CO₂, CH₄ e N₂O) foram monitoradas quinzenalmente nas MPs e semanalmente no melão, com coleta via câmaras estáticas e análise por cromatografia gasosa. Após a colheita, foram coletadas amostras de solo (0–10 cm) para análise química.

Os dados foram submetidos à análise de variância em esquema de parcelas subdivididas e ao teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). Também foram aplicadas análises de correlação de Pearson e análise de componentes principais (ACP), considerando variáveis ambientais, agronômicas, químicas e os tratamentos.

O segundo capítulo do estudo, utilizou amostras de solo oriundas do experimento de campo descrito no capítulo anterior, conduzido em agroecossistemas multifuncionais sustentáveis voltados ao cultivo do meloeiro amarelo em condições semiáridas. Essas amostras foram coletadas após a colheita do melão no ciclo de 2023 e utilizadas para condução de um experimento laboratorial com o objetivo de avaliar as emissões de óxido nitroso (N_2O) em resposta à aplicação de fertilizante nitrogenado. O ensaio foi realizado em laboratório com temperatura controlada ($25^\circ C$), na Embrapa Semiárido, em Petrolina-PE. As amostras passaram por secagem ao ar, homogeneização e peneiramento, sendo posteriormente incubadas em frascos plásticos com solo seco e umidade ajustada à capacidade de campo.

Os tratamentos testados consistiram em três tipos de misturas de plantas de cobertura (MPs), dois sistemas de manejo do solo (com e sem revolvimento) e três doses de nitrato de cálcio (0, 100 e 300 mg de N kg^{-1} de solo). Após a aplicação dos fertilizantes, foram realizadas oito coletas de gases ao longo de 59 dias. O processo de amostragem seguiu protocolo padronizado de troca gasosa, coleta com seringas e análise das concentrações de N_2O por cromatografia gasosa. Frascos em branco também foram incluídos como controle.

Com base nas análises laboratoriais, foram calculados os fluxos diários e as emissões acumuladas de N_2O , além dos fatores de emissão (FE- N_2O), conforme diretrizes do IPCC (2019). Os dados foram submetidos à análise estatística em delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições, e os efeitos das doses de nitrogênio sobre as emissões foram avaliados por regressão. Esse experimento complementar permitiu aprofundar a compreensão dos impactos das MPs e do manejo do solo nas emissões de gases de efeito estufa, conectando os resultados do campo com as respostas observadas em condições controladas.

4 ARTIGO: EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA E QUALIDADE QUÍMICA DO SOLO EM AGROECOSSISTEMAS MULTIFUNCIONAIS PARA CULTIVO DE MELOEIRO AMARELO IRRIGADO NO SEMIÁRIDO

EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM AGROECOSSISTEMAS MULTIFUNCIONAIS PARA CULTIVO DE MELOEIRO AMARELO IRRIGADO NO SEMIÁRIDO

GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN MULTIFUNCTIONAL AGROECOSYSTEMS FOR IRRIGATED YELLOW MELON CULTIVATION IN SEMI-ARID REGIONS

Vitória Rodrigues de Oliveira¹
Alessandra Monteiro Salviano²
José Mauro da Cunha e Castro³
Diana Signor⁴

RESUMO

O aumento das concentrações de GEE pode ser reduzido com estratégias sustentáveis de produção. O objetivo deste trabalho foi quantificar os fluxos de óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) em agroecossistemas multifuncionais para o cultivo do meloeiro amarelo irrigado no semiárido, avaliando como práticas de manejo do solo e culturas de cobertura influenciam as emissões desses GEE, visando ao desenvolvimento de uma produção mais sustentável. O experimento integra uma pesquisa de longa duração iniciada em 2012, com cultivo rotativo anual de plantas de cobertura e meloeiro, seguido de pousio. O delineamento foi em blocos casualizados com parcelas subdivididas e quatro repetições. Os tratamentos envolveram dois tipos de manejo do solo (com e sem revolvimento) e três misturas de plantas de cobertura (MP1, MP2 e MP3), além de uma parcela controle sem cobertura vegetal. As emissões de GEE foram monitoradas quinzenalmente durante as coberturas e semanalmente no cultivo do meloeiro. Os fluxos de CO₂ variaram de 4,91 a 405,95 mg C-CO₂ m⁻² h⁻¹; CH₄ entre -54,32 e 162,13 µg C-CH₄ m⁻² h⁻¹; e N₂O entre -74,80 e 101,06 µg N-N₂O m⁻² h⁻¹. As emissões acumuladas foram menores nos tratamentos sem revolvimento (2.991,36 Mg CO₂-eq ha⁻¹) em comparação aos com revolvimento (3.723,65 Mg CO₂-eq ha⁻¹). A análise de componentes principais evidenciou a influência do preparo do solo, da adição de fitomassa e de atributos químicos na separação dos grupos. A deposição de biomassa de plantas espontâneas mostrou-se eficaz na redução das emissões, sendo recomendada para a região.

Palavras-chave: dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, adubação verde, plantio direto.

ABSTRACT

1 Discente do Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade de Pernambuco *Campus* Petrolina. *E-mail*: oliveiravr812@gmail.com

2 Pesquisadora Embrapa Solos, UEP Recife, Pernambuco. *E-mail*: alessandra.salviano@embrapa.br

3 Pesquisador Embrapa Soja, Londrina, Paraná. *E-mail*: mauro.castro@embrapa.br

4 Pesquisadora Embrapa Semiárido e docente do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Pernambuco *Campus* Petrolina. *E-mail*: diana.signor@embrapa.br

Increased GHG concentrations can be reduced with sustainable production strategies. The objective of this study was to quantify the fluxes of nitrous oxide (N₂O), methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂) in multifunctional agroecosystems for irrigated yellow melon cultivation in the semiarid region, evaluating how soil management practices and cover crops influence the emissions of these GHGs, aiming at the development of more sustainable production. The experiment is part of a long-term research project started in 2012, with annual rotational cultivation of cover crops and melon, followed by fallow. The design was randomized blocks with subdivided plots and four replications. The treatments involved two types of soil management (with and without tillage) and three mixtures of cover crops (MP1, MP2 and MP3), in addition to a control plot without vegetation cover. GHG emissions were monitored biweekly during cover crops and weekly during melon cultivation. CO₂ fluxes ranged from 4.91 to 405.95 mg C-CO₂ m⁻² h⁻¹; CH₄ between -54.32 and 162.13 µg C-CH₄ m⁻² h⁻¹; and N₂O between -74.80 and 101.06 µg N-N₂O m⁻² h⁻¹. Cumulative emissions were lower in treatments without tillage (2,991.36 Mg CO₂-eq ha⁻¹) compared to those with tillage (3,723.65 Mg CO₂-eq ha⁻¹). Principal component analysis highlighted the influence of soil preparation, phytomass addition, and chemical attributes in the separation of groups. The deposition of spontaneous plant biomass has proven effective in reducing emissions and is recommended for the region.

Keywords: carbon dioxide, methane, nitrous oxide, green manure, direct planting.

1 INTRODUÇÃO

O efeito estufa é um fenômeno essencial para a existência da vida no planeta, resultado da presença de gases de efeito estufa (GEE), como vapor de água, dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e ozônio (O₃), que ocorrem naturalmente na atmosfera. Esses gases regulam a temperatura média global, mantendo-a entre 16 e 18°C (IPCC, 2014). Embora essenciais para o equilíbrio térmico, as concentrações atmosféricas destes gases têm aumentado rapidamente devido às atividades antrópicas (IPCC, 2023).

Em termos de concentração na atmosfera, o CO₂ corresponde a aproximadamente 66% do total de GEE, o CH₄ a 16% e o N₂O a 7%. No entanto, o impacto de cada gás no aquecimento global varia, sendo expresso em equivalente de CO₂ ou em Potencial de Aquecimento Global (PAG), nesse contexto, o CO₂ tem peso 1, enquanto o CH₄ apresenta um PAG de 28 e o N₂O de 310, indicando sua capacidade muito superior de retenção de calor na atmosfera (IPCC, 2006).

Entre as principais fontes de emissão desses gases, o solo contribui liberando CO₂, CH₄ e N₂O por meio de processos biogeoquímicos, cuja intensidade pode ser influenciada por interferências antrópicas. A emissão de CO₂ tem origem na respiração radicular, atividade microbiana e decomposição da matéria orgânica, sendo intensificada por mudanças no uso da terra e manejo inadequado de pastagens, que reduzem a capacidade de armazenamento de carbono (Abreu et al., 2024; Yang et al., 2017). Os fluxos de CH₄ do solo para a atmosfera, por sua vez, são influenciados por fatores ambientais, como umidade, microbiologia e disponibilidade de matéria orgânica, podendo ser reduzidos pela conversão de áreas úmidas em sistemas agrícolas, devido à redução da umidade e dos estoques de carbono (Abreu et al., 2024). A emissão de N₂O, muito importante em solos agrícolas, está associada aos processos de nitrificação e desnitrificação, os quais são influenciados por práticas de manejo (Signor e Cerri, 2013), principalmente o uso intensivo de fertilizantes nitrogenados.

De acordo com o IPCC (2023), em 2019, aproximadamente 79% das emissões globais de GEE foram geradas pelos setores de energia, indústria, transporte e edificações, enquanto os setores AFOLU responderam por 22% das emissões. Cerca de metade das emissões

líquidas totais do setor AFOLU foi originada do CO₂ resultante de mudanças no uso da terra e florestas, principalmente devido ao desmatamento, totalizando 13 GtCO₂eq mundial. O Brasil é responsável por 3% das emissões mundiais de GEE, ficando na sétima colocação, após a China (25,2%), EUA (12%), Índia (7%), União Europeia (6,6%), Rússia (4,1%) e Indonésia (4%) (SEEG 2023).

No Brasil, as mudanças no uso da terra representam aproximadamente 49% das emissões brutas de GEE. Mas, considerando-se as emissões resultantes do desmatamento e de outras alterações no uso da terra, juntamente com as provenientes do setor agropecuário, observa-se que a agropecuária, em sentido amplo, contribui com 74% das emissões nacionais de GEE (SEEG, 2023).

Assim, a adoção de práticas agrícolas sustentáveis tem sido utilizada como estratégia eficaz para mitigar as emissões de GEE. Entre essas, destacam-se os agroecossistemas multifuncionais, fundamentados na agricultura de conservação e que integram o plantio direto, o cultivo de culturas perenes ou anuais, e o uso de plantas de cobertura. No semiárido brasileiro, essas práticas aplicadas a sistemas irrigados promovem o acúmulo de biomassa, o aumento dos estoques de carbono e a ciclagem de nutrientes, além de contribuir para a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas (Giongo et al., 2021).

Com isso, o objetivo deste trabalho foi quantificar os fluxos de óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) e, a qualidade química do solo em modelos de agroecossistemas multifuncionais, em desenvolvimento pela Embrapa Semiárido, para o cultivo do meloeiro amarelo irrigado, visando ao desenvolvimento de um modelo de produção mais sustentável para a fruticultura na região semiárida. Nesse contexto, os esforços desta pesquisa vão ao encontro dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), em especial ao ODS 13, Ação contra a Mudança Global do Clima, ao contribuir com a geração de conhecimento sobre estratégias para reduzir as emissões na agropecuária.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em continuidade a uma pesquisa de longa duração que teve início em 2012, no Campo Experimental de Bebedouro (9°08' S, 40°8' W, 365,5 m de altitude), pertencente à Embrapa Semiárido (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) localizado no município de Petrolina, PE (Salviano *et al.*, 2023). O solo da área é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico plântico (Santos *et al.*, 2018). O clima da região é caracterizado como semiárido, classificado como BSw_h' pelo sistema de Köppen. Apesar de ser um dos semiáridos mais chuvosos do mundo, a região é caracterizada pelo balanço hídrico negativo, com precipitações pluviiais anuais inferiores a 800 mm (que ocorrem entre os meses de dezembro e abril), insolação média de 2800 h ano⁻¹, temperaturas médias anuais do ar entre 23 e 27°C, umidade relativa do ar em torno de 50% e taxa de evaporação de aproximadamente 2000 mm ano⁻¹ (Moura *et al.*, 2007), e vegetação predominante do tipo Caatinga.

Antes da condução do experimento, foram realizadas análises de solo nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm (Tabela 1) para a caracterização da área experimental e recomendação de adubação.

Tabela 1 - Caracterização do solo antes da condução do experimento referente ao ciclo do agroecossistema 2023.

	SR 0-20	SR 20-40	CR 0-20	CR 20-40
CE (dS m ⁻¹)	0,22	0,12	0,14	0,15

(continua)

pH	7,8	7,1	7,3	7,2
P (mg dm ⁻³)	40,75	33,98	49,25	50,33
K (cmol _c dm ⁻³)	0,41	0,33	0,39	0,42
Na (cmol _c dm ⁻³)	0,12	0,1	0,12	0,13

(conclusão)

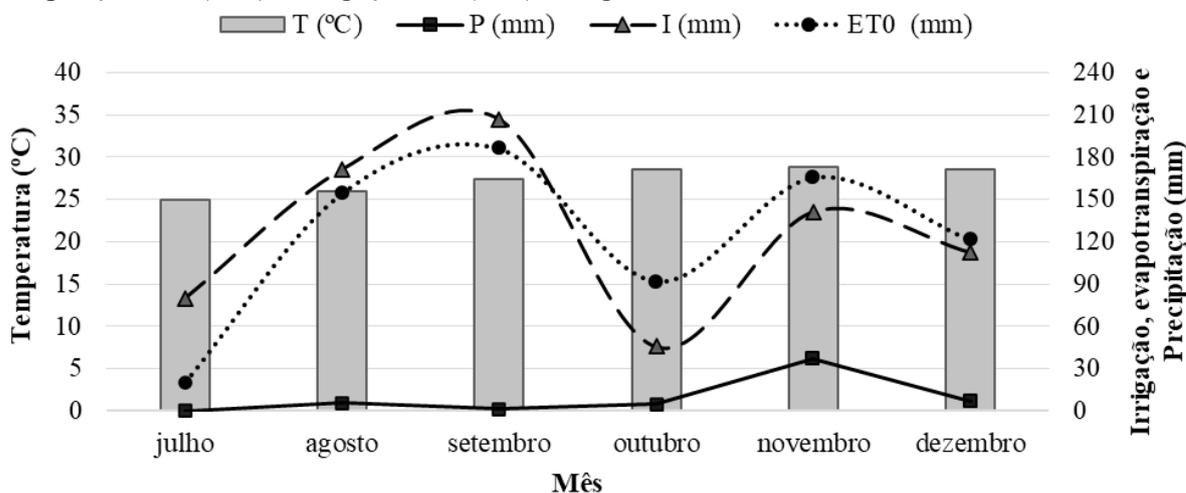
	SR 0-20	SR 20-40	CR 0-20	CR 20-40
Ca (cmol _c dm ⁻³)	1,8	1,7	2,0	2,1
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,8	0,9	1,0	1,1
CTC (cmol _c dm ⁻³)	3,13	3,03	3,51	4,2
V %	100	100	100	89,28
Cu (mg dm ⁻³)	0,44	0,44	0,17	0,42
Fe (mg dm ⁻³)	7,24	10,03	6,19	7,47
Mn (mg dm ⁻³)	16,37	12,58	7,92	16,95
Zn (mg dm ⁻³)	1,22	0,93	1,31	2,15
Densd (kg dm ⁻³)	1,36	1,32	1,37	1,42
DensP (kg dm ⁻³)	2,58	2,55	2,56	2,57
Porot (%)	47,17	48,49	46,42	44,8
Arcia (g kg ⁻¹)	691,65	656,56	706,9	643,69
Silte (g kg ⁻¹)	254,77	272,36	227,52	286,43
Argila (g kg ⁻¹)	53,58	71,08	65,58	69,88

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Legendas: CE: Condutividade elétrica; pH: Potencial hidrogeniônico; P: Fósforo disponível; K: Potássio trocável; Na: Sódio trocável; Ca: Cálcio trocável; Mg: Magnésio trocável; CTC: Capacidade de troca de cátions; V: Saturação por bases; Cu: Cobre; Fe: Ferro; Mn: Manganês ; Zn: Zinco; DensS: Densidade aparente do solo; DensP: Densidade das partículas; PoroT: Porosidade total.

Durante a condução do experimento, a temperatura média da área foi igual a 27,64°C, com máxima igual a 34,36°C e mínima igual a 21,37°C. A precipitação foi de 5,30 mm, enquanto a irrigação e a evapotranspiração médias foram de 12,55 mm e 5,83 mm, respectivamente (Figura 1) A irrigação ocorreu durante todo o período experimental, exceto durante a fase de 15 dias, referente à aplicação da biomassa das plantas de cobertura ao solo.

Figura 1 - Médias de temperatura - T (°C) e valores de evapotranspiração – ET₀ (mm), precipitação – P (mm) e irrigação – I (mm) do agroecossistema 2023.



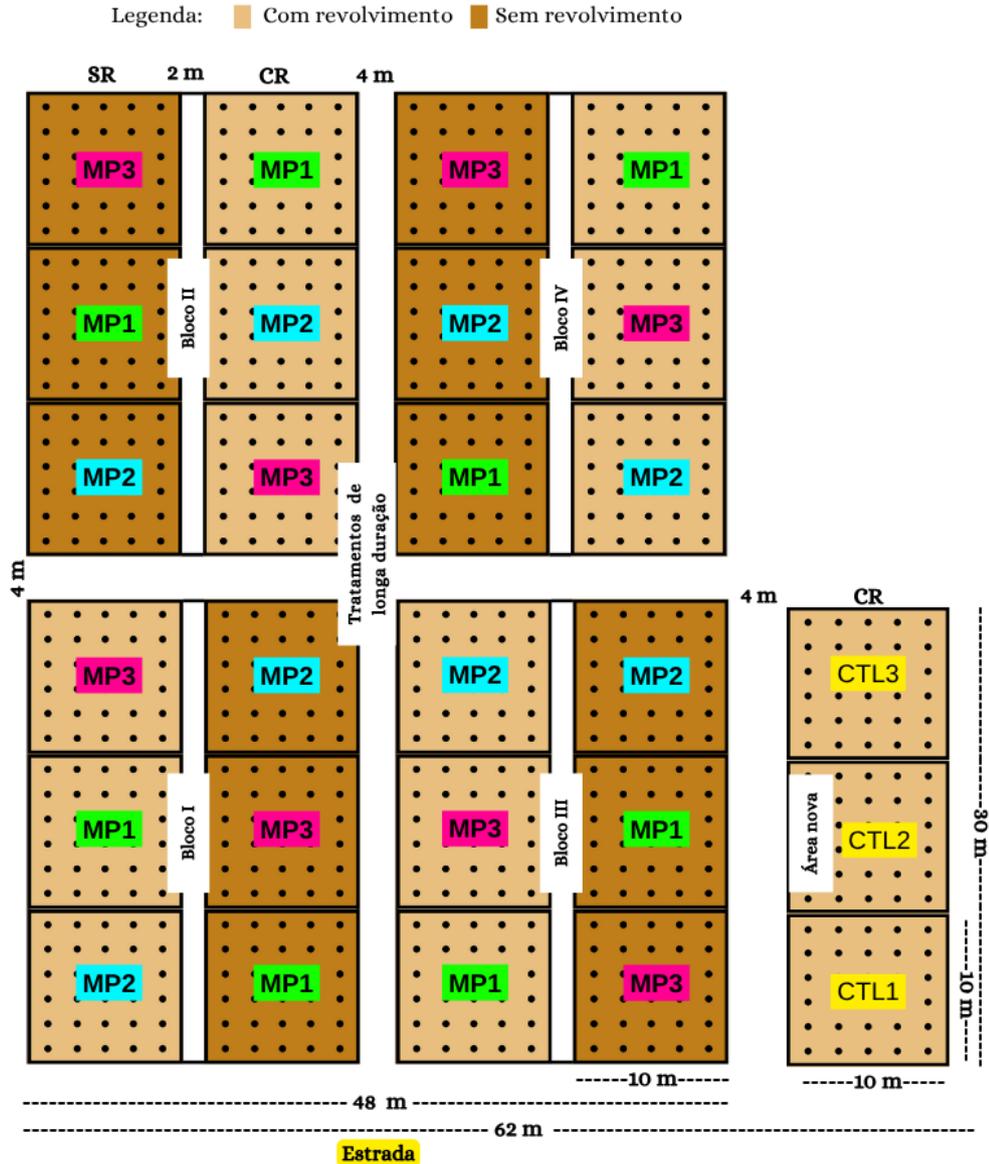
Fonte: Elaborado pela própria autora.

Desde 2012, o experimento vem sendo conduzido com os mesmos tratamentos e o mesmo delineamento experimental, com cultivo de plantas de cobertura, seguido pelo cultivo de meloeiro amarelo e, em seguida, pousio até o início do próximo ciclo. Estes tratamentos foram implantados sequencialmente entre 2012 e 2019. Em seguida, houve um pousio nos anos de 2020, 2021 e 2022. Em 2023, os tratamentos foram retomados.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, em arranjo de parcelas subdivididas, com quatro repetições (Figura 4.2). Os tratamentos aplicados foram: dois sistemas de manejo do solo (com revolvimento - CR e sem revolvimento - SR) e três arranjos populacionais de mistura de plantas (MP1: 79% de leguminosas e 21% de gramíneas e oleaginosas; MP2: 70% de gramíneas e oleaginosas e 30% de leguminosas; e MP3: vegetação espontânea) (% de número de sementes/ha). As parcelas experimentais medem de 30 m × 10 m (Figura 2). Estes tratamentos estão, portanto, no 11º ano de implantação.

Adicionalmente, no ciclo de 2023, instalou-se uma área adjacente com manejo convencional como um tratamento controle, representando o manejo usualmente empregado na região, ou seja, sem cultivo de plantas de cobertura e com preparo do solo anteriormente ao cultivo do meloeiro.

Figura 2 - Croqui do experimento de agroecossistemas multifuncionais para cultivo do meloeiro amarelo.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Notas: MP1: 79% de leguminosas e 21% de gramíneas + oleaginosas; MP2: 70% de leguminosas + 30% de gramíneas e oleaginosas de indivíduos/sementes semeadas em campo; MP3: vegetação espontânea. CTL1, 2 e 3: tratamento controle, cultivo convencional sem plantas de cobertura e com preparo de solo.

Desde 2012, quando o experimento foi implantado, ele vem sendo conduzido com os mesmos tratamentos e o mesmo delineamento experimental, com as seguintes etapas: cultivo de plantas de cobertura, aplicação da biomassa das plantas de cobertura, cultivo de meloeiro amarelo e pousio até o início do próximo ciclo.

O experimento foi repetido entre os anos de 2012 e 2019. Houve um pousio nos anos de 2020, 2021 e 2022 que teve como causa a suspensão de atividades devido à pandemia. Em 2023, o experimento foi retomado.

As misturas de plantas foram compostas pela combinação de quantidades de sementes de 13 espécies de leguminosas, gramíneas e oleaginosas, a saber: *Calopogonium mucunoides* Desv., *Stizolobium aterrimum* Piper & Tracy, *Mucuna cochinchinensis* (Lour.) A. Chev., *Crotalaria juncea* L., *Crotalaria spectabilis* Roth, *Canavalia ensiformis* (L.), *Cajanus cajan* (L.), *Dolichos lablab* L., *Zea mays* L., *Pennisetum americanum* (L.), *Sorghum vulgare* Pers., *Sesamum indicum* L., *Ricinus communis* L e *Helianthus annuus* L..

Nas parcelas com vegetação espontânea, em ciclos anteriores, foi feito o inventário das espécies presentes antes do manejo das plantas (Salviano *et al.*, 2023). As espécies predominantes foram: Anileira (*Indigofera hirsuta* L.), Beldroega (*Portulaca oleracea* L.), Cabeça de touro (*Tribulus terrestris*), Capim alpiste (*Eragrostis pilosa* (L.) P. Beauv.), Capim barbicha de alemão (*Eragrostis pilosa* (L.) P. Beauv.), Capim-mão-de-sapo (*Dactyloctenium aegyptium* (L.) Willd.), Capim-tapete/Cabelo-de-guia (*Mollugo verticillata* L.), Erva Santa Luzia (*Chamaesyce hirta* (L.) Milisp), Jetirana/Jetirana cabeluda (*Merremia aegyptia* (L.) Urb.), Malva-veludo (*Sida cordifolia* L.), Poaia/Poaia-branca (*Richardia grandifolia* (Cham. & Schltd.) Steud), Quebra-pedra (*Phyllanthus* sp), Sensitiva (*Mimosa candollei* R. Grether), Timbete/Carrapicho (*Cenchrus echinatus* L.), Trapoeraba (*Commelina benghalensis* L.), Velame/Café bravo (*Croton lobatus* L.) (Salviano *et al.*, 2023).

As misturas de plantas foram semeadas em 26 de julho de 2023, por semeadura direta, em 20 linhas de plantio em cada parcela (0,5 m entre linhas). As misturas de plantas foram irrigadas três vezes por semana, com fitas gotejadoras espaçadas a cada 1 m entre fileiras e com 0,5 m de distância entre gotejadores, com vazão média de 1,2 L h⁻¹. A lâmina de água foi calculada com base na evapotranspiração de referência (ET₀). Aproximadamente aos 70 dias após a semeadura (04 de outubro), quando as plantas estavam na fase de plena floração, realizou-se o corte da parte aérea.

A determinação da produção de matéria seca da parte aérea das MPs foi realizada aos 64 dias após a semeadura. Para isso, amostras de biomassa aérea foram coletadas em um quadrante de 1 m² localizado na região central de cada parcela. Após a coleta, as amostras foram pesadas, cortadas e homogeneizadas, sendo posteriormente submetidas à secagem em estufa com ventilação forçada a 65°C por 72 horas ou até atingirem peso seco constante e pesadas novamente para determinação da matéria seca (kg ha⁻¹).

Para a determinação do teor de nitrogênio total na matéria seca das MPs, empregou-se o método de Kjeldahl, que envolve a digestão do material em meio ácido, seguida de destilação e titulação. Ambos os procedimentos foram conduzidos conforme descrito por Teixeira *et al.* (2017).

Aos 70 dias após a semeadura realizou-se o corte das MPs. Nas parcelas com revolvimento, a biomassa das plantas de cobertura foi incorporada a 20 cm de profundidade no solo, com o auxílio de um arado de disco, seguido por uma gradagem superficial, utilizando-se grade leve de disco aberto. Nas parcelas sem revolvimento, a biomassa aérea das misturas de plantas foi cortada a 10 cm de altura e depositada sobre a superfície. No tratamento controle, houve apenas o revolvimento do solo nesta mesma época.

A semeadura do melão amarelo (cv. Gladial) foi realizada no início de outubro, em bandejas de poliestireno contendo substrato comercial à base de casca de pinus. As bandejas foram mantidas em casa de vegetação, sob sombrite 50%, com irrigação plena duas vezes ao dia, durante 12 dias. Após esse período, aos 15 dias após o manejo das MPs que compõem os agroecossistemas, realizou-se o transplantio das mudas em campo, no espaçamento de 0,3 m x 2 m, com uma planta por cova, totalizando cinco linhas de plantio em cada parcela experimental.

A irrigação durante o cultivo do meloeiro amarelo foi realizada por gotejamento, com espaçamento de 0,3 m entre os gotejadores e vazão de 2,0 L h⁻¹. O volume total de água aplicado foi estimado com base na evaporação do tanque Classe A, nos coeficientes de cultura (Kc) correspondentes a cada fase fenológica do melão: fase inicial 0,45, vegetativa 0,70, frutificação 1,0 e maturação 0,70, conforme descrito por Sousa *et al.* (2011), além da precipitação pluviométrica acumulada ao longo do experimento. Durante todo o ciclo, a irrigação foi realizada às segundas, quartas e sextas-feiras, coincidindo com a aplicação de fertilizantes via fertirrigação, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Doses de fertilizantes (kg ha⁻¹) aplicadas via fertirrigação durante o cultivo do meloeiro amarelo nos tratamentos dos agroecossistemas (MP1, MP2 e MP3, com e sem revolvimento).

Fertilizante	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	B
	kg ha ⁻¹						
Fosfato monoamônico	14,4	78,8					
Nitrato de Cálcio	31,6			40			
Sulfato de Potássio			24			7,5	
Nitrato de Potássio	7,5		20,5				
Cloreto de Potássio			15,6				
Sulfato Magnésio					10,1	13,4	
Ácido Bórico							1
Ureia	65,7						

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Durante o período de cultivo das MPs, os tratos culturais da área incluíram o preparo inicial anterior ao experimento. Esse preparo consistiu no manejo da vegetação espontânea desenvolvida durante o período de pousio, por meio do corte e deposição do material vegetal sobre o solo, seguindo os tratamentos com e sem revolvimento do solo. Em seguida, foram realizadas a marcação das linhas de plantio, a semeadura das MPs, a irrigação de todas as parcelas (inclusive aquelas com vegetação espontânea), as capinas e, por fim, o corte e o manejo das MPs conforme o tipo de manejo do solo proposto para cada tratamento.

No ciclo do meloeiro amarelo, por tratar-se de uma cultura com finalidade comercial, os tratos culturais foram maiores. Entre as práticas, realizou-se o transplantio das mudas, capinas manuais e com uso de enxada nos tratamentos sem e com revolvimento do solo. As capinas foram realizadas antes e depois da fase de floração. No manejo fitossanitário para controle de pragas e doenças, foram incluídas medidas de controle químico para mosca branca/pulgão, formigas, mosca minadora, broca das cucurbitáceas, nematoides, crestamento gomoso e oídio. Essas ações foram essenciais para garantir o desenvolvimento adequado da cultura e minimizar perdas na produção.

As emissões de GEE foram monitoradas quinzenalmente durante o cultivo das plantas de cobertura e semanalmente ao longo do ciclo de cultivo do meloeiro. A coleta foi realizada por meio de câmaras estáticas e as amostras coletadas foram acondicionadas em frascos de vidro previamente evacuados e encaminhadas para análise por cromatografia gasosa para determinação das concentrações de CO₂, CH₄ e N₂O, conforme descrito por Signor *et al.* (2022). As câmaras utilizadas nestas avaliações foram as mesmas descritas em Galdino *et al.* (2024).

A colheita dos frutos ocorreu em função do estágio de maturação, aos 61 dias após o transplante (DAT) das mudas. Para a determinação da produtividade, foram coletados os frutos de 10 plantas selecionadas aleatoriamente dentro de cada subparcela experimental. Esses frutos foram classificados em comerciais e não comerciais, considerando-se como comerciais aqueles que apresentavam formato esférico ou oval, coloração da casca amarelo vibrante uniforme e ausência de deformações. Com base nessa avaliação, foram determinadas a produtividade total (PT), a partir das produtividades comercial (PC) e não comercial (PNC), expressas em toneladas por hectare, análise detalhada da produtividade da cultura.

A análise do teor de sólidos solúveis totais (°Brix) e a determinação do tamanho do fruto (comprimento e diâmetro do fruto em milímetro) foram realizadas de acordo com o método descrito pela AOAC (2010).

Após a colheita dos frutos, foi realizada a coleta de solo para a avaliação de atributos químicos. A amostragem foi conduzida utilizando um trado tipo holandês, com coletas em 5 pontos por subparcela na profundidade de 0-10 cm. As amostras foram posteriormente homogeneizadas para formar uma amostra composta por subparcela, visando aumentar a representatividade da amostra. As análises de pH do solo, teor de carbono orgânico, fósforo disponível, potássio, cálcio e magnésio trocáveis, cobre, ferro, manganês e zinco foram realizados conforme os métodos descritos no manual de métodos de análise de solo (Teixeira *et al.*, 2017).

Os dados dos fluxos de GEE foram submetidos à análise de variância ($p < 0,01$ e $p < 0,05$), considerando o experimento em parcelas sub-subdivididas, com o manejo do solo nas parcelas, a mistura de plantas na subparcela e o período de coleta na sub-subparcela. Realizou-se teste de normalidade dos resíduos ($p < 0,05$) deste modelo antes de se prosseguir com a análise de variância e as comparações de médias. Foram realizadas duas análises de variância, separando os dois momentos do ciclo dos agroecossistemas: cultivo das plantas de cobertura e cultivo do melão. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Os dados de fluxos de GEE e as variáveis ambientais, umidade e temperatura do solo, temperatura do ar, precipitação (mm), densidade do solo ao final do experimento (0-5 cm de profundidade), biomassa das misturas de plantas (MPs), adubações aplicadas e os teores de macronutrientes (P, K, Ca e Mg) do solo foram submetidos à análise de correlação linear de Pearson ($p < 0,05$).

Para cada um dos gases estudados, os fluxos médios de cada tratamentos foram utilizados para a estimativa das emissões totais acumuladas ao longo do período total de avaliação, seguindo a metodologia descrita em Signor *et al.* (2013).

Para os atributos químicos do solo, foram calculados a média e o desvio padrão, permitindo a caracterização da variabilidade entre os tratamentos.

Para uma análise complementar, foi realizada uma análise multivariada dos dados, submetidos à análise de componentes principais (ACP). Foram consideradas como variáveis principais as emissões totais de dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4), temperatura do solo e do ar, total de adubação N aplicada, biomassa das MPs, densidade (0-5) do solo ao final do experimento, produção comercial de melão, brix°, tamanho do fruto e os parâmetros químicos do solo (pH, C.E, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn) do início e final do experimento. As variáveis suplementares incluíram o manejo do solo (MS), a mistura de plantas (MP - MP1, MP2 e MP3). A análise foi conduzida utilizando o software Statistica, versão 14.1.0.8 (TIBCO, 2020).

3 RESULTADOS

A análise de variância para os fluxos de CO_2 , CH_4 e N_2O medidos ao longo do ciclo de cultivo dos agroecossistemas multifuncionais foi realizada considerando dois períodos distintos: 1. da semeadura até o manejo das plantas de cobertura e 2. da transplantio até a colheita do melão (Tabela 4.4). Durante o período de condução das misturas de plantas, dentre os fluxos de GEE avaliados, apenas o CO_2 foi influenciado pela época de coleta (EC), enquanto os fluxos de CH_4 e N_2O não foram influenciados por nenhum dos fatores de estudo (Tabela 3).

Tabela 3 - Resumo da análise de variância dos fluxos de CO_2 , CH_4 e N_2O em agroecossistemas multifuncionais de produção de melão amarelo em um Argissolo Amarelo, em Petrolina - PE, para duas épocas do ciclo (cultivo e manejo das plantas de cobertura e cultivo do meloeiro amarelo).

(continua)

Fonte de	Graus de	Fluxos CO_2	Fluxos CH_4	Fluxos N_2O
----------	----------	----------------------	----------------------	-----------------------------

Variação	Liberdade	F Value	Pr > F	F Value	Pr > F	F Value	Pr > F
Plantas de cobertura							
Bloco	3	2,11	0,1075	0,15	0,9318	0,73	0,5397
Manejo solo (MS)	1	1,1	0,2989	0,55	0,4607	0,05	0,8221
Erro parcela (a)	3	0,21	0,8873	0,18	0,9074	0,88	0,4559
Parcela							
Mistura Plantas (MP)	2	0,49	0,6145	0,85	0,4314	0,16	0,8513
MP*MS	2	0,57	0,5682	0,06	0,9452	0,93	0,4007
Erro subparcela (b)	6	5,24	0,0002	0,28	0,9464	1,02	0,4226
Subparcela							
Época de coleta (EC)	13	18,18	<0,0001	1,51	0,198	0,39	0,8568
MP*EC	26	1,08	0,3893	1,13	0,3561	0,23	0,9924
MS*EC	13	1,36	0,2491	0,85	0,5207	0,25	0,9392
MP*MS*EC	26	0,43	0,9289	0,98	0,4687	0,26	0,9878
Erro sub-subparcela (c)	39	1,23	0,2689	1,73	0,0653	0,88	0,5892
Erro total		13.315,087		1341,7492		1906,3649	
CV (%)		88,85		401,72		1601,60	
Cultivo do meloeiro							
Bloco	3	0,52	0,6718	1,7	0,1706	1,07	0,3653
Manejo solo (MS)	1	1,34	0,2496	0,66	0,4199	2,47	0,119
Erro parcela (a)	3	1,62	0,189	0,83	0,4825	1,98	0,1208
Parcela							
Mistura Plantas (MP)	2	4,60	0,012	1,06	0,3513	1,3	0,2764
MP*MS	2	0,20	0,8155	0,24	0,7843	1,72	0,1843
Erro subparcela (b)	6	1,55	0,1699	0,37	0,8945	1,61	0,1495
Subparcela							
Época de coleta (EC)	13	5,22	<0,0001	1,48	0,1823	1,62	0,1363
MP*EC	26	1,24	0,2545	0,67	0,7962	1,35	0,1908
MS*EC	13	0,33	0,9381	0,5	0,8336	0,87	0,5361
Erro sub-subparcela (c)	39	0,76	0,7609	0,62	0,8928	1,43	0,1179

(conclusão)

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Fluxos CO ₂		Fluxos CH ₄		Fluxos N ₂ O	
		F Value	Pr > F	F Value	Pr > F	F Value	Pr > F
MP*MS*EC	26	0,43	0,9628	0,65	0,8189	1,03	0,4321
Plantas de cobertura							
Erro total		2.521.613,165		2691,6479		1337,3004	
CV (%)		131,83		1993,73		1357,64	

Fonte: Elaborado pela própria autora.

No período do cultivo do meloeiro, observou-se efeitos significativos dos tipos de misturas de plantas e das épocas de coleta sobre os fluxos de CO₂ (Tabela 4.4). Devido à grande variabilidade dos fluxos de gases, comum em estudos desta natureza, não foi possível detectar diferenças significativas nos fluxos de N₂O e CH₄ em função dos fatores aqui analisados. Esse comportamento é consistente com as observações de Tate (2015), ao mencionar que este tipo de estudo apresenta variações nas respostas da oxidação do CH₄, resultantes das mudanças nos processos bióticos e abióticos do solo. De forma semelhante, Vargas (2014) observou alta variabilidade nos fluxos de N₂O, sendo esta atribuída a fatores ambientais. Esses resultados reforçam a complexidade dos processos que regulam essas emissões em sistemas agrícolas.

Ao longo das épocas de coleta, os fluxos de CO₂ variaram de acordo com a fase de cultivo, tanto durante o ciclo de cultivo das plantas de cobertura quanto do meloeiro amarelo (Tabela 4).

Tabela 4- Fluxos de CO₂ ao longo do ciclo de cultivo de agroecossistemas multifuncionais de produção de melão amarelo em um Argissolo Vermelho-Amarelo, em Petrolina -PE.

Fase do ciclo	Datas de coleta	Dias após semeadura	Fluxos de CO ₂ (mg m ⁻² h ⁻¹)
Plantas de cobertura	17/08/2023	22	88,139 c
	31/08/2023	36	210,542 b
	14/09/2023	50	305,406 a
	05/10/2023	71	51,986 c
	11/10/2023	77	31,899 c
	18/10/2023	84	73,337 c
Dias após transplântio			
Melão	26/10/2023	7	118,703 a
	01/11/2023	13	67,944 b
	09/11/2023	21	19,394 c
	16/11/2023	28	111,764 a
	22/11/2023	34	84,185 a
	29/11/2023	41	148,243 a
	06/12/2023	48	33,722 c
	14/12/2023	56	37,468 c

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Notas: Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Durante o cultivo das plantas de cobertura, os menores fluxos foram registrados na fase inicial, nos primeiros 22 dias após a semeadura (DAS) e aumentaram até os 72 DAS que corresponde à fase de plena floração das MPs. Os fluxos foram reduzidos após ao final do ciclo das plantas de cobertura, que ocorreu no dia 04/10/2023, quando retornaram aos valores observados no início do cultivo.

A ausência de irrigação ocorrida a partir do corte das misturas de plantas e durante o manejo dos resíduos até o transplântio das mudas de meloeiro, associada à elevada evapotranspiração característica da região nesse período do ano, provavelmente, resultou, mesmo nos tratamentos com manutenção de palhada na superfície, em condições de umidade do solo insuficientes para a decomposição dos resíduos, limitando, assim, a liberação de C-CO₂ para a atmosfera nos primeiros dias após o corte das plantas de cobertura.

Essa tendência reforça a relação entre os maiores fluxos de GEE e o fornecimento de água, a decomposição da biomassa das plantas de cobertura, a presença de uma rizosfera

enriquecida e, conseqüentemente, a maior diversidade biológica do solo. Além disso, outros fatores edafoclimáticos como temperatura, densidade do solo e a adubação podem influenciar essa variação dos fluxos medidos ao longo do período produtivo.

No ciclo do meloeiro, observaram-se fluxos de CO₂ maiores nos primeiros 8 dias após o transplântio das mudas, seguidos por uma redução até o 21º dia após o transplântio. Esse pico inicial está relacionado ao retorno da irrigação após o transplântio das mudas, associado ao manejo do solo e à adição da biomassa aérea das plantas de cobertura ao solo, fatores que podem ter impulsionado a decomposição dos resíduos. Barnard *et al.* (2020) ressaltam que o umedecimento do solo seco incrementa os fluxos de CO₂ devido a fatores físicos, químicos e biológicos, tais como solutos de origem microbiana facilmente acessíveis e decomponíveis; necromassa microbiana; mudanças na conectividade do filme de água entre as partículas minerais do solo; atividade enzimática extracelular sustentada durante a secagem; dessorção de C de superfícies minerais e ruptura de agregados.

De forma geral, a fase de cultivo do meloeiro apresentou dois picos de emissão de CO₂: o primeiro aos 8 DAT e o segundo entre o 28º e o 41º DAT. Esse comportamento pode ser explicado pela dinâmica da decomposição da biomassa vegetal das plantas de cobertura. Freitas *et al.* (2019), trabalhando com as mesmas misturas de plantas e tipos de manejo do solo no cultivo de mangueira no Semiárido brasileiro, afirmam que a dinâmica da decomposição da biomassa vegetal ocorre em distintas fases devido aos processos de degradação da matéria orgânica. O aumento da umidade no solo, proveniente da irrigação, aliado a temperaturas elevadas, inicialmente favorece uma perda acelerada de massa pela decomposição de compostos de fácil degradação. Em estágios mais avançados, a decomposição torna-se mais lenta em razão do aumento da proporção de materiais recalcitrantes, o que mantém a taxa de decomposição relativamente constante e pode resultar em uma liberação de CO₂ mais tardia. Por meio da técnica dos *litter bags*, Freitas *et al.* (2019) também identificaram essa dinâmica nos processos de mineralização e liberação de nutrientes durante a decomposição da fitomassa, evidenciando a importância destas plantas de cobertura para o fornecimento de nutrientes para a cultura do meloeiro.

O efeito das plantas de cobertura sobre os fluxos de CO₂ do solo ocorreu apenas durante o ciclo do meloeiro (Tabela 4). O tratamento controle (sem plantas de cobertura e com revolvimento do solo) e a MP1, com predominância de leguminosas, tiveram os maiores fluxos de CO₂ (135,413 mg C-CO₂ m⁻² h⁻¹ e 103,453 mg C-CO₂ m⁻² h⁻¹, respectivamente), enquanto o tratamento MP3, composto pela vegetação espontânea, apresentou os menores fluxos deste gás para a atmosfera (41,051 mg C-CO₂ m⁻² h⁻¹). No tratamento controle, embora não tenha ocorrido produção de plantas de cobertura, houve preparo do solo antes do transplântio das mudas, o que por si só já estimula a decomposição da matéria orgânica do solo (Silva-Olaya *et al.*, 2013). Além disso, embora em quantidade menor do que nas parcelas do MP3, havia algumas plantas espontâneas presentes nas parcelas do tratamento controle, as quais foram incorporadas ao solo durante a operação de preparo antes do transplântio das mudas de meloeiro, o que também contribuiu para os fluxos de CO₂ observados neste tratamento. As diferenças nos fluxos de CO₂ entre os tratamentos MP1, MP2 e MP3 (Tabela 5) pode ser associada à composição química variada entre as biomassas produzidas por cada tratamento. Freitas *et al.* (2019) observaram que a MP1 possui relação C/N em torno de 25, enquanto para MP2 e MP3 esse valor está em torno de 30, o que pode explicar os maiores fluxos de CO₂ nas parcelas sob MP1.

Tabela 5 - Fluxos médios de CO₂ em função das plantas de cobertura de agroecossistemas multifuncionais de produção de melão amarelo em um Argissolo Vermelho-Amarelo em Petrolina -PE.

Fluxos de CO₂ (mg C-CO₂ m⁻² h⁻¹)

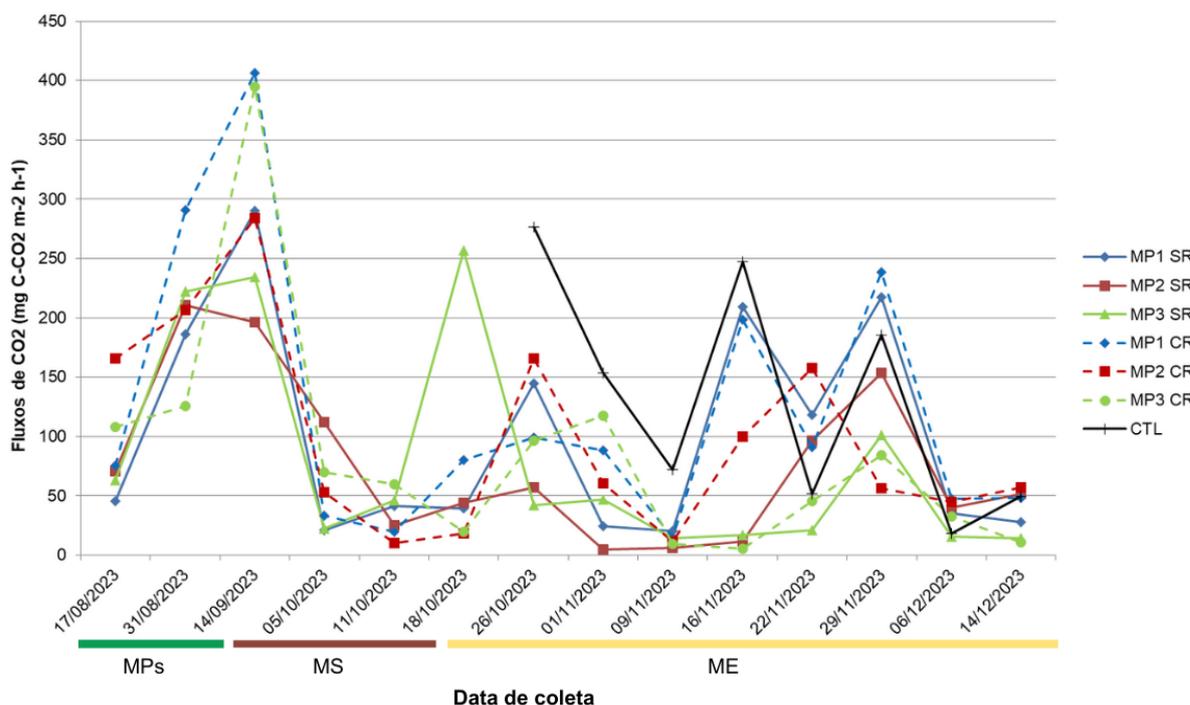
	Plantas de cobertura		Melão	
Controle	-		135,413	a
MP1	131,01	a	103,453	ab
MP2	116,946	a	66,347	bc
MP3	143,437	a	41,051	c

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Notas: Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$), MP1: 79% de leguminosas e 21% de gramíneas + oleaginosas; MP2: 70% de leguminosas + 30% de gramíneas e oleaginosas de indivíduos/sementes semeadas em campo; MP3: vegetação espontânea; CTL (Controle): cultivo convencional sem plantas de cobertura e com preparo de solo.

Ao longo do ciclo dos agroecossistemas, abrangendo tanto o cultivo das misturas de plantas (MPs) quanto o manejo da fitomassa (MS) das plantas de cobertura ao solo e o cultivo do meloeiro (ME), os fluxos de CO₂ variaram de 4,91 a 405,95 mg C-CO₂ m⁻² h⁻¹ (Figura 3).

Figura 3 - Fluxos de CO₂ ao longo do ciclo de cultivo de agroecossistemas multifuncionais de produção de melão amarelo em um Argissolo Vermelho-Amarelo, em Petrolina - PE.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Notas: MP1 SR: mistura de planta 1 sem revolvimento; MP2 SR: mistura de planta 2 sem revolvimento; MP3 SR: mistura de planta 3 sem revolvimento; MP1 CR: mistura de planta 1 com revolvimento; MP2 CR: mistura de planta 2 com revolvimento; MP3 CR: mistura de planta 3 com revolvimento; CTL (Controle): cultivo convencional sem plantas de cobertura e com preparo de solo, (MP1: 79% de leguminosas e 21% de gramíneas + oleaginosas; MP2: 70% de leguminosas + 30% de gramíneas e oleaginosas de indivíduos/sementes semeadas em campo; MP3: vegetação espontânea), MPs: Cultivo das misturas de plantas; MS: Manejo do solo para aplicação da biomassa; ME: Cultivo do meloeiro amarelo.

Os dados mostram uma tendência de ocorrência de maiores picos nos fluxos de CO₂ na fase de cultivo das misturas de plantas de cobertura, sendo que os agroecossistemas que utilizam o revolvimento do solo como estratégia de manejo dos resíduos apresentaram a tendência aos maiores fluxos quando comparados aos tratamentos que mantêm os resíduos sobre o solo (sem revolvimento). Além disso, na data em que se observou os maiores picos

(14/09/2023), os agroecossistemas que utilizam a mistura de plantas com predominância de leguminosas também apresentou tendência de maiores fluxos em comparação a tratamento com predominância de gramíneas. Esse comportamento sugere o efeito de compostos químicos exsudados pelas raízes das diferentes espécies utilizadas, alterando a atividade e a diversidade biológica do solo. Segundo Bertin et al. (2003) os compostos exsudatos incluem a secreção de íons, oxigênio livre, água, enzimas, mucilagem e uma diversidade de metabólitos primários e secundários com carbono na sua composição.

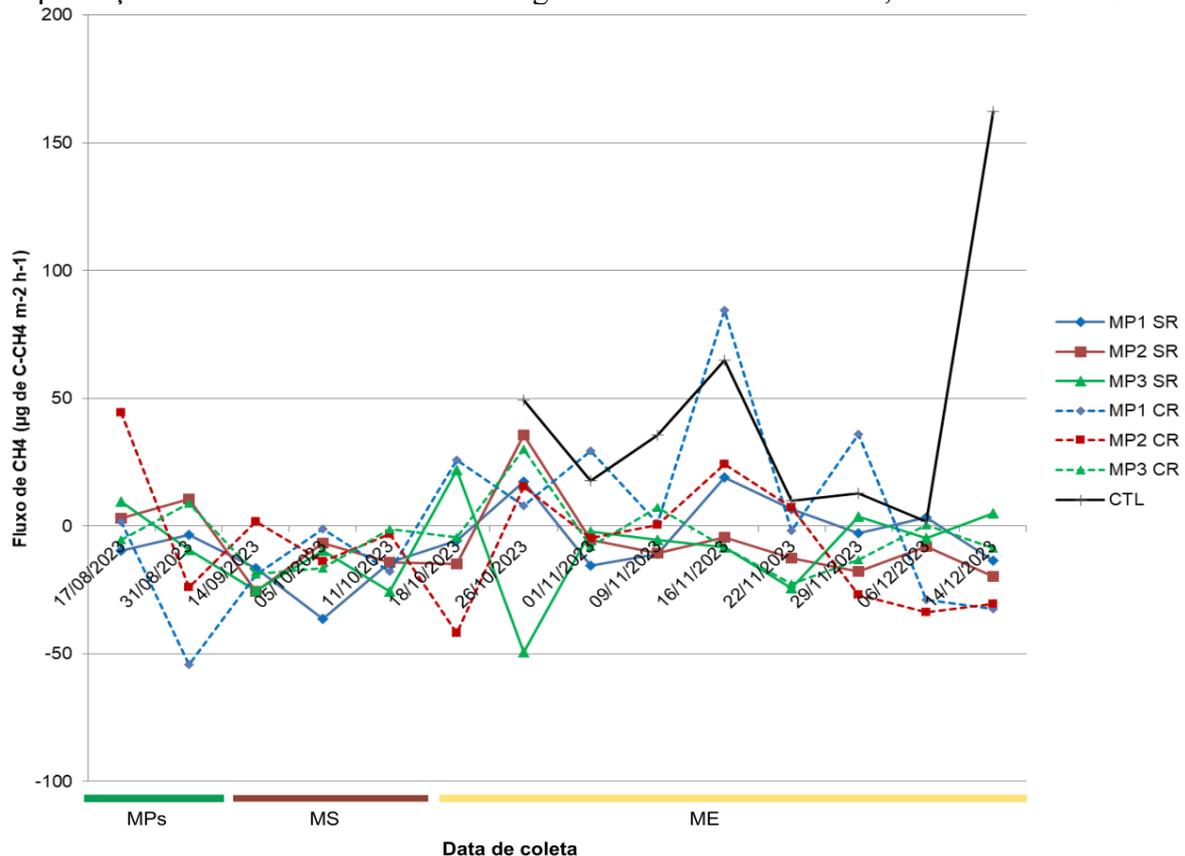
Os fluxos de CO₂ do solo para a atmosfera são influenciados pela decomposição aeróbica da matéria orgânica e pela respiração radicular, que refletem a atividade biológica e as condições ambientais do sistema avaliado, como relatado por Pérez et al. (2023). Vale destacar que o uso da adubação verde, por fornecer diferentes fontes de nutrientes para os microrganismos, favorece a maior diversidade e atividade microbiana no solo (Li *et al.*, 2020) em comparação ao tratamento controle.

Além disso, nesse período há o fornecimento de água via irrigação com objetivo de complementar a demanda hídrica das plantas de cobertura, já que seu cultivo ocorre em um período de elevadas taxas de evapotranspiração e baixas médias de precipitação. Como destacado por Barnard *et al.* (2020), diversos fatores químicos, físicos e biológicos estão intrinsecamente ligados ao aumento dos fluxos de CO₂ de solos secos quando estes são submetidos ao reumedecimento, o que também ajuda a explicar o pico nos fluxos de CO₂ observado no início do ciclo das plantas de cobertura.

Em geral, na fase de produção do melão, os agroecossistemas que utilizam a mistura de plantas com predominância de leguminosa (MP1) apresentam os maiores fluxos de CO₂, mesmo sem o revolvimento do solo (Tabela 4.6). O sistema convencional de produção de melão, considerado como tratamento controle, apresentou tendência a apresentar maiores fluxos de CO₂ até os 28 dias após o transplântio do melão. A partir daí, manteve-se com fluxos considerados intermediários, entre os agroecossistemas que utilizam a MP1 (maiores fluxos) e os demais agroecossistemas, ou semelhantes aos demais tratamentos.

Para CH₄, os fluxos variaram entre -54,32 e 162,13 µg C-CH₄ m⁻² h⁻¹ (Figura 4). Os fluxos deste gás são resultantes da decomposição anaeróbica da matéria orgânica, a qual, embora seja um processo estritamente anaeróbico, pode ocorrer mesmo em solos não alagados devido à presença de microsítios anaeróbicos. Dessa forma, o solo pode atuar como fonte ou dreno de CH₄, dependendo das condições ambientais e das interações microbianas (Tate, 2015). Signor *et al.*, (2022), avaliando a emissão de GEE na Caatinga ao longo de um ano, observaram que os fluxos de CH₄ do solo variaram de -76,21 a 113,87 µg m⁻² h⁻¹ de C-CH₄.

Figura 4 - Fluxos de CH₄ ao longo do ciclo de cultivo de agroecossistemas multifuncionais de produção de melão amarelo em um Argissolo Vermelho-Amarelo, em Petrolina - PE.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

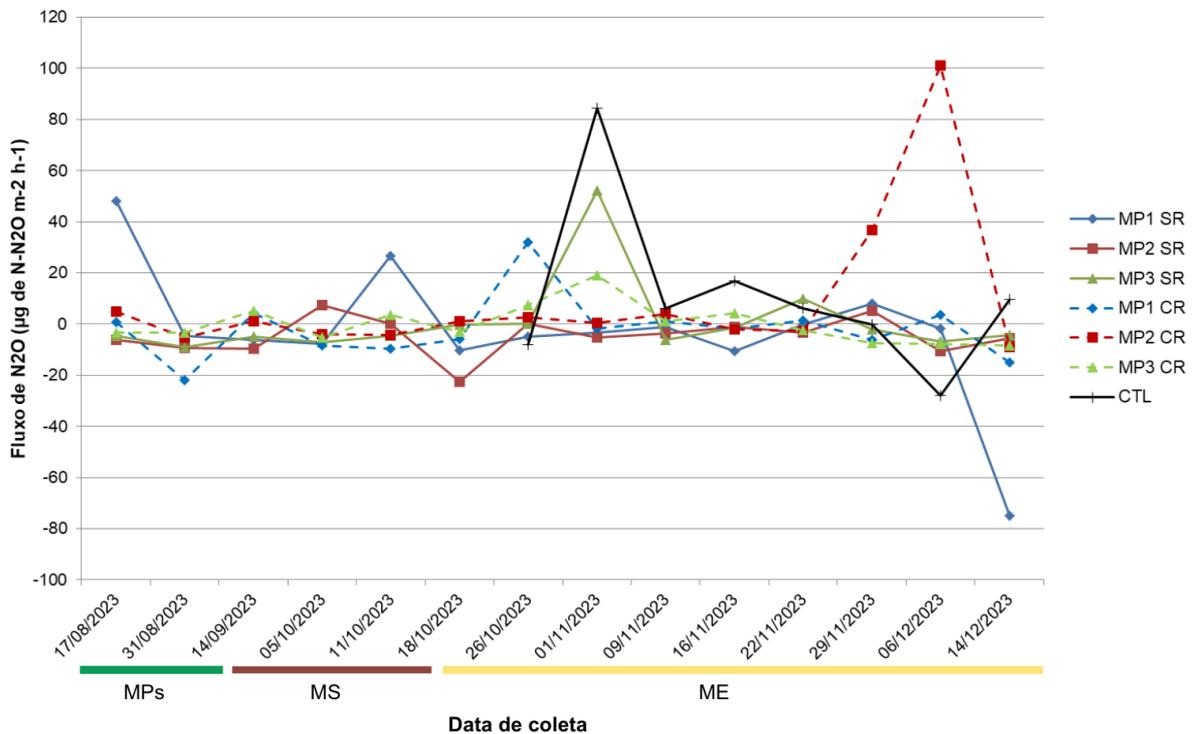
Notas: MP1 SR: mistura de planta 1 sem revolvimento; MP2 SR: mistura de planta 2 sem revolvimento; MP3 SR: mistura de planta 3 sem revolvimento; MP1 CR: mistura de planta 1 com revolvimento; MP2 CR: mistura de planta 2 com revolvimento; MP3 CR: mistura de planta 3 com revolvimento; CTL (Controle): cultivo convencional sem plantas de cobertura e com preparo de solo, (MP1: 79% de leguminosas e 21% de gramíneas + oleaginosas; MP2: 70% de leguminosas + 30% de gramíneas e oleaginosas de indivíduos/sementes semeadas em campo; MP3: vegetação espontânea), MPs: Cultivo das misturas de plantas; MS: Manejo do solo para aplicação da biomassa; ME: Cultivo do meloeiro amarelo.

Quanto ao N₂O, os fluxos apresentaram variação entre -74,80 e 101,06 µg N-N₂O m⁻² h⁻¹ (Figura 5). Os solos podem atuar como fonte ou dreno de N₂O da atmosfera, em função da produção ou consumo deste gás no solo (Chapuis-Lardy *et al.*, 2007). A depender das condições de umidade e disponibilidade de nitrogênio, o processo de desnitrificação pode ser completo, resultando na produção de N₂ no solo e em sua emissão para a atmosfera, ou incompleto, quando parte do nitrogênio pode ser emitida do solo para a atmosfera na forma de NO ou N₂O (Thomson *et al.*, 2012). Este último possui elevado potencial de aquecimento global, enquanto os outros não estão relacionados ao efeito estufa.

Por serem influenciados pela disponibilidade de N no solo, os fluxos de N₂O do solo para a atmosfera são muito afetados pela adubação nitrogenada. No presente estudo, embora a adubação não tenha sido um fator de avaliação, houve aporte de nitrogênio durante o cultivo do meloeiro. A adubação das parcelas foi realizada via fertirrigação, com adição de cerca de 70 kg ha⁻¹ de N nos agroecossistemas e de 120 kg ha⁻¹ de N no tratamento controle (Tabela 3). Devido à aplicação dos fertilizantes, incrementos nos fluxos de N₂O eram esperados ao longo do ciclo do meloeiro. Contudo, apesar de alguns picos observados na Figura 5, esses valores não foram estatisticamente significativos. Esse comportamento também é confirmado pela

ausência de correlação significativa entre os fluxos de N_2O e o aporte de nitrogênio pelos fertilizantes minerais (Figura 6) e pode ser explicado pela forma de aplicação dos fertilizantes nitrogenados, que ocorreu via fertirrigação, com parcelamento da dose em aplicações realizadas três vezes por semana ao longo de todo o ciclo, obedecendo à demanda da cultura por nitrogênio.

Figura 5 - Fluxos de N_2O ao longo do ciclo de cultivo de agroecossistemas multifuncionais de produção de melão amarelo em um Argissolo Vermelho-Amarelo, em Petrolina - PE.



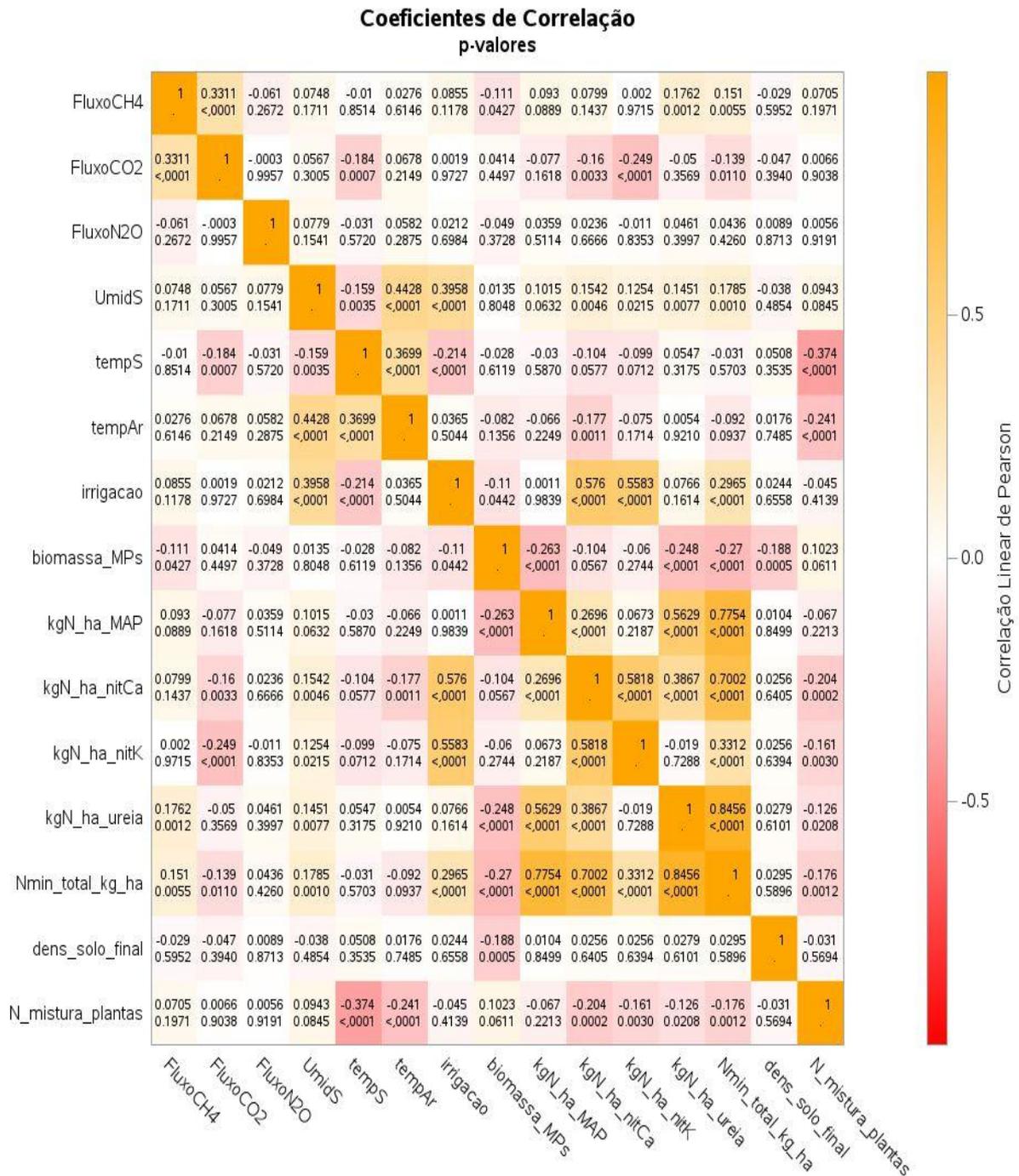
Fonte: Elaborado pela própria autora.

Notas: MP1 SR: mistura de planta 1 sem revolvimento; MP2 SR: mistura de planta 2 sem revolvimento; MP3 SR: mistura de planta 3 sem revolvimento; MP1 CR: mistura de planta 1 com revolvimento; MP2 CR: mistura de planta 2 com revolvimento; MP3 CR: mistura de planta 3 com revolvimento; CTL (Controle): cultivo convencional sem plantas de cobertura e com preparo de solo, (MP1: 79% de leguminosas e 21% de gramíneas + oleaginosas; MP2: 70% de leguminosas + 30% de gramíneas e oleaginosas de indivíduos/sementes semeadas em campo; MP3: vegetação espontânea), MPs: Cultivo das misturas de plantas; MS: Manejo do solo; ME: Cultivo do meloeiro amarelo.

Em geral, os coeficientes de correlação entre os fluxos de GEE e as variáveis analisadas foram muito baixos e não significativos (Figura 4.6). Assim, não foi possível observar a influência das variáveis edafoclimáticas, nem da aplicação dos fertilizantes nitrogenados com os fluxos de GEE. No caso da adubação, este comportamento pode estar associado ao uso da fertirrigação como estratégia de manejo, com parcelamento dos fertilizantes em três aplicações semanais ao longo do ciclo de cultivo e à redução da adubação nitrogenada proporcionada pelo uso dos adubos verdes, em comparação com a área controle.

Figura 6 – Matriz de correlação linear de Pearson entre os fluxos de CO_2 , CH_4 e N_2O e

variáveis ambientais e de manejo monitoradas no período experimental.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Notas: UmidS: umidade do solo; tempS: temperatura do solo; tempAr: temperatura do ar; biomassa_MPs: produção de biomassa das misturas de plantas; kgN-ha_MAP: quilos de nitrogênio por hectare provenientes do fertilizante MAP (fosfato monoamônico); kgN-ha_nitCa: quilos de nitrogênio por hectare provenientes do fertilizante nitrato de cálcio; kgN-ha_ureia: quilos de nitrogênio por hectare provenientes do fertilizante ureia; Nmin_total_kg_ha: nitrogênio mineral total aplicado, em quilos por hectare; dens_solo_final: densidade do solo ao final do experimento; N_mistura_plantas: nitrogênio orgânico proveniente das MPs aplicadas ao solo.

McDonald *et al.* (2023) observaram menores emissões de N₂O quando a aplicação de nitrogênio foi parcelada, em comparação com a aplicação única. Ainda vale destacar que as emissões de N₂O também são influenciadas pela dinâmica do N no solo, incluindo tanto a

absorção pela cultura quanto os processos microbiológicos de transformação deste nutriente no solo. Outro aspecto que pode interferir nessa dinâmica é a decomposição das plantas de cobertura. Conforme relatado por Wutke et al. (2014), gramíneas apresentam uma relação C:N elevada (>30), maior teor de lignina e decomposição mais lenta que espécies leguminosas. Esses autores também destacam que resíduos vegetais com essas características podem intensificar a competição pelo nitrogênio disponível no solo, favorecendo sua imobilização pelos microrganismos decompositores. Esse processo, em complemento à aplicação fracionada de fertilizante nitrogenado, pode ter limitado as perdas de N₂O do solo, uma vez que, ao longo do ciclo do meloeiro, o nitrogênio aplicado parceladamente via fertirrigação estaria sendo melhor aproveitado pelas plantas e, eventualmente, em havendo excesso em algum momento, muito provavelmente esse nutriente seria preferencialmente utilizado para a decomposição microbiana dos resíduos em detrimento da desnitrificação.

As emissões acumuladas de GEE pelo solo ao longo de todo o experimento foram, em média, 2.991,36 Mg CO₂-eq ha⁻¹ nos tratamentos sem revolvimento do solo e 3.723,65 Mg CO₂-eq ha⁻¹ nos tratamentos com revolvimento do solo, enquanto no tratamento controle as emissões totais do solo foram de apenas 1.445,53 Mg CO₂-eq ha⁻¹ (Tabela 6). Vale destacar que o período de monitoramento do tratamento controle foi menor que nas parcelas sob agroecossistemas, tendo sido realizado apenas no período de cultivo do melão (cerca de 60 dias), enquanto os agroecossistemas multifuncionais foram monitorados desde a semeadura das misturas de plantas de cobertura até o final do ciclo do meloeiro (em torno de 140 dias).

A produtividade comercial dos frutos variou de 57,6 Mg ha⁻¹ a 90,70 Mg ha⁻¹. Assim, a emissão de GEE por quilograma de fruto produzido foi semelhante entre as áreas dos agroecossistemas, em média 46,6 Mg CO₂-eq/Mg de melão, enquanto no tratamento controle esse valor foi cerca de 56% inferior, equivalente a 26,36 Mg CO₂-eq/Mg de melão. Os tratamentos com MP1 apresentaram os maiores valores de emissão de gases por tonelada de melão produzida.

Tabela 6 - Emissões cumulativas de CO₂, CH₄ e N₂O, CO₂-equivalente durante o período de cultivo dos agroecossistemas, produtividade comercial do melão e a relação entre emissão total e produtividade. Petrolina-PE, 2023.

Tratamento	Emissões cumulativas			CO ₂ -eq (Mg CO ₂ -eq ha ⁻¹)	Produtividade comercial (Mg ha ⁻¹)	Mg de CO ₂ -eq/ Mg de melão produzido
	CO ₂	N ₂ O	CH ₄			
	_____ kg ha ⁻¹ _____					
MP1-SR	3.410,52	-0,06	-0,24	3.374,75	65,20	51,76
MP2-SR	2.793,16	-0,14	-0,20	2.719,75	64,60	42,10
MP3-SR	2.893,97	-0,01	-0,30	2.879,59	70,40	40,90
MP1-CR	4.415,47	-0,07	-0,08	4.378,70	78,00	56,14
MP2-CR	3.421,51	0,22	-0,19	3.522,35	90,70	38,84
MP3-CR	3.284,64	-0,02	-0,15	3.269,90	65,60	49,85
CONTROLE	1.445,53	0,12	0,43	1.518,32	57,60	26,36

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Notas: O controle foi uma parcela avaliada apenas durante o ciclo do meloeiro. As demais parcelas foram avaliadas na fase de produção das plantas de cobertura e durante o ciclo do meloeiro.

Em pesquisa realizada por Barros (2015), analisando a pegada de carbono de sistemas de produção de melão convencional e conservacionista, foram consideradas todas as atividades responsáveis pelas emissões GEE, como as mudanças no uso da terra, fertilização, uso de maquinário agrícola movido a combustíveis fósseis e incorporação de resíduos culturais. Considerando essas atividades, o sistema com adubação verde com incorporação

dos resíduos de gramíneas ao solo apresentou a menor pegada de carbono (647,83 t CO₂ eq/t de melão), quando comparado ao tratamento sem adição de adubação verde (944,15 t CO₂ eq/t de melão). Das emissões totais relatadas por Barros (2015), aquelas provenientes da fase de cultivo no campo correspondem a apenas 10,04% do total no sistema convencional e a 10,75% no sistema de adubação verde incorporada ao solo, indicando que a fase de produção da cultura no campo não é o principal fator de contribuição para a pegada de carbono da cultura do melão. Barros (2015) destaca ainda que, entre as etapas do período experimental, o processo de mudança do uso da terra contribuiu significativamente para a pegada de carbono. No presente estudo, as emissões de GEE avaliadas não consideraram quaisquer alterações de uso da terra, pois representam a avaliação de um experimento de longa duração (11 anos), já bem estabilizado.

Outro fator relevante para a interpretação dos resultados é que este estudo integra um experimento de longa duração, interrompido por três anos devido à pandemia da COVID-19. Os dados analisados referem-se ao ciclo de 2023, primeiro ano de retomada das atividades na área experimental após esse período de pousio. Assim, os tratamentos de cultivo de misturas de plantas e manejo do solo foram interrompidos nesse período. Apesar disso, houve crescimento de plantas espontâneas em todas as parcelas do experimento, principalmente nos períodos chuvosos, o que pode, de alguma forma, ter minimizado as diferenças existentes entre os tratamentos.

A ACP resultou na extração de cinco componentes principais (CPs), considerando o autovalor maior que 1 (Tabela 7). No entanto, os dois primeiros componentes foram responsáveis por 72,27% da variação total do conjunto de dados e onde as variáveis utilizadas apresentaram maior carga fatorial. Assim, os demais componentes não serão discutidos.

O autovalor de cada componente está diretamente relacionado com a porcentagem de variância explicada por ele. As cargas fatoriais da ACP indicam a relação entre as variáveis originais e as componentes extraídas, possibilitando a identificação daquelas com maior peso (valores iguais ou maiores que 0,70). As variáveis de maior influência, destacadas em negrito na Tabela 7, refletem as principais relações observadas no conjunto de dados.

A primeira componente principal (CP1) explicou 53,16% da variabilidade dos dados analisados, sendo composta pelas emissões acumuladas de CO₂ e CH₄, bem como por variáveis que caracterizam o solo e o ambiente. Entre estas, destaca-se a temperatura do ar (tempAr), que apresentou o maior peso na composição da CP1. Foram importantes para as emissões o N adicionado na forma de fertilizante mineral (N.min), o N adicionado via fitomassa das misturas de plantas (N.org) e o nitrogênio total aplicado no sistema (Ntotal), proveniente da combinação entre a adubação mineral e a orgânica. A adição de fitomassa das misturas de plantas (ftsMPs) também integrou esta componente, indicando a importância da adição dos resíduos vegetais na dinâmica de C e de nutrientes durante o processo de decomposição. Entre os atributos químicos do solo avaliados, os mais importantes foram o pH, a condutividade elétrica (CE) e os teores de potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), manganês (Mn) e cobre (Cu). É importante destacar que os fatores de estudo foram utilizados como variável suplementar e o manejo do solo (MS) apresentou maior importância na variabilidade dos dados que as misturas de plantas utilizadas (MP).

Tabela 7 - Coordenadas fatoriais das variáveis, com base em correlações e autovalores da matriz de correlação e estatísticas relacionadas.

Variáveis	CP 1	CP 2
Emissão CO₂ (total kg ha ⁻¹)	-0,746	0,504
Emissão N₂O (total kg ha ⁻¹)	0,558	0,441
Emissão CH₄ (total kg ha ⁻¹)	0,941	-0,106

(continua)

tempS (°C)	-0,275	0,707
tempAr (°C)	-0,966	0,026
		(conclusão)
Variáveis	CP 1	CP 2
N.min (kg ha ⁻¹)	0,950	-0,283
N.Org (kg ha ⁻¹)	-0,891	0,285
Ntotal (kg ha ⁻¹)	-0,886	0,282
ftsMPs (kg)	-0,974	-0,030
Prod.ME (Mg ha ⁻¹)	-0,354	0,684
Sólidos solúveis (°Brix)	0,696	0,201
tam.Frut (cm)	-0,652	0,347
dens (g cm ⁻³)	0,635	0,113
pH	-0,903	0,021
CE (dS m ⁻¹)	-0,786	-0,591
P (mg dm ⁻³)	-0,234	-0,856
K (cmol _c dm ⁻³)	-0,716	0,036
Ca (cmol _c dm ⁻³)	-0,810	-0,537
Mg (cmol _c dm ⁻³)	-0,741	-0,597
Cu (mg dm ⁻³)	0,760	-0,362
Fe (mg dm ⁻³)	-0,043	-0,801
Mn (mg dm ⁻³)	-0,708	-0,126
Zn (mg dm ⁻³)	-0,557	-0,190
*MP	0,508	-0,326
*MS	-0,955	-0,186
Autovalores	12,227	4,396
Variância total (%)	53,163	19,113
Variância acumulada (%)	53,163	72,276

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Notas: CO₂: dióxido de carbono, N₂O: óxido nitroso; CH₄: metano; tempS: temperatura média do solo durante o experimento; tempAr: temperatura média do ar durante o experimento; N.min: aplicação total de nitrogênio na forma mineral; N.org: nitrogênio proveniente da adubação orgânica fornecida pelas misturas de plantas; Ntotal: nitrogênio total resultante da adubação mineral e orgânica aplicada nas MPs; ftsMPs: fitomassa das misturas de plantas; Prod.ME: produtividade comercial do melão; brix: teor de sólidos solúveis do melão amarelo; tam.Frut: tamanho dos frutos de melão; dens: densidade do solo; pH: potencial hidrogeniônico; CE: condutividade elétrica; e os teores de P: fósforo; K: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco; MP: mistura de plantas; MS: manejo do solo.

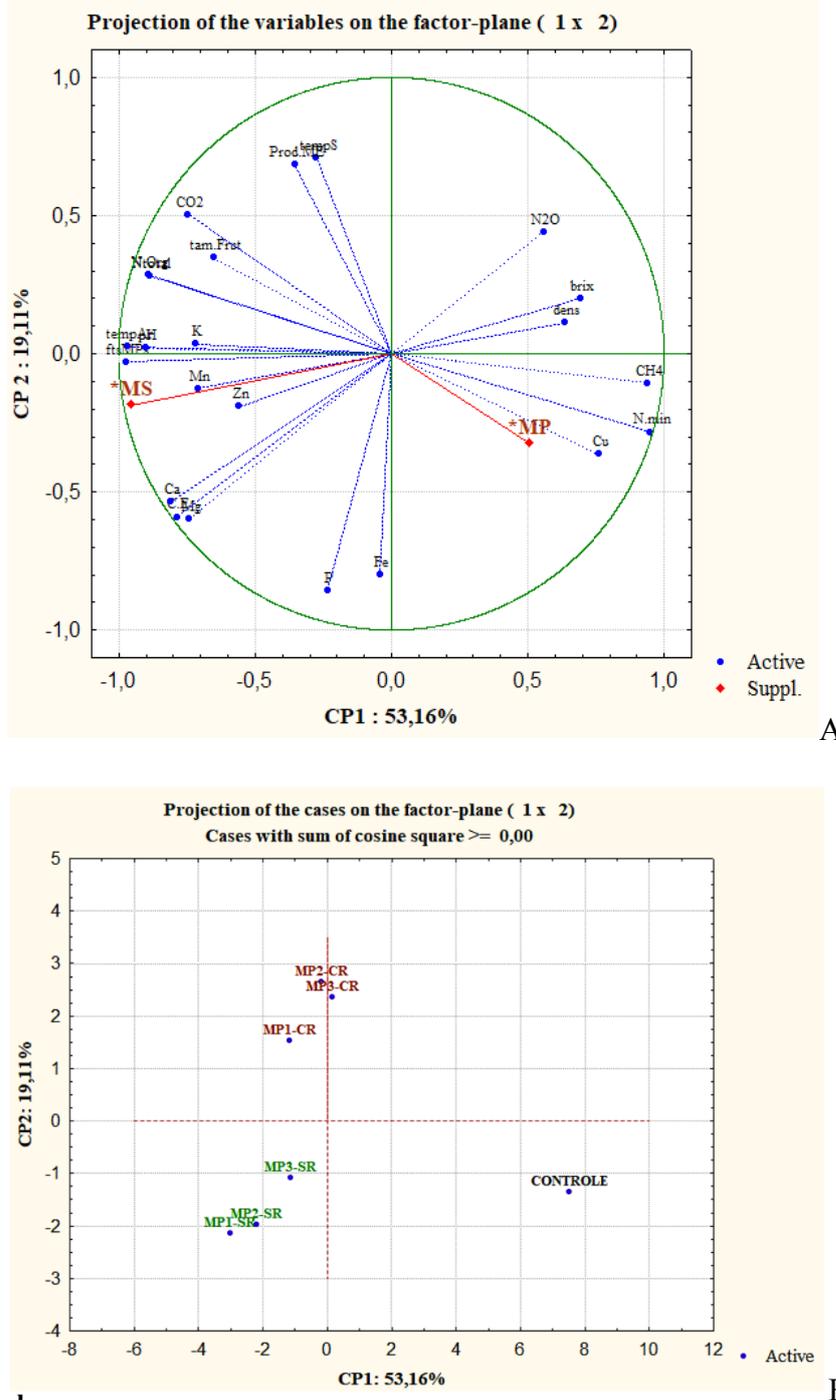
Dessa forma, a CP1 representa, predominantemente, processos biogeoquímicos relacionados aos ciclos do carbono e do nitrogênio, os quais impactam diretamente as emissões de GEE, principalmente CO₂ e CH₄. A contribuição da temperatura do ar (tempAr) na CP1 sugere que as condições climáticas desempenham um papel na regulação desses processos, podendo afetar a dinâmica do solo e as emissões de GEE. Esses fatores influenciam a produção ou consumo de GEE, incluindo o CH₄. Além disso, o manejo adotado pode favorecer ou inibir os processos biogeoquímicos responsáveis pelas emissões desse gás (Wu *et al.*, 2010).

A CP2 explicou 19,11% da variabilidade total dos dados e apresentou uma forte associação com variáveis relacionadas aos teores de fósforo (P) e ferro (Fe) no solo, à produtividade de melão e à temperatura do solo, mas com um menor impacto na emissão de GEE, restringindo-se apenas ao CO₂ e N₂O. Os teores de P e Fe apresentaram sinal contrário

aos dos autovetores da produtividade e das emissões, indicando que elas se correlacionam de forma negativa, enquanto a temperatura média do solo (tempS) provavelmente favoreceu a produtividade e as emissões de gases. A tempS está associada à regulação de processos edáficos, como a mineralização da matéria orgânica e a disponibilidade de nutrientes, muito relacionados à atividade microbiana no solo.

Na Figura 6 podemos observar os gráficos biplot com a projeção das variáveis e dos tratamentos para o plano CP1x CP2.

Figura 6 - Gráficos biplot (CP1 x CP2) com a projeção das variáveis (A) e dos diferentes agroecossistemas de produção de melão amarelo (B) avaliados em região semiárida.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Notas: MP1 SR: mistura de planta 1 sem revolvimento; MP2 SR: mistura de planta 2 sem revolvimento; MP3 SR: mistura de planta 3 sem revolvimento; MP1 CR: mistura de planta 1 com revolvimento; MP2 CR: mistura de planta 2 com revolvimento; MP3 CR: mistura de planta 3 com revolvimento; CTL (Controle): cultivo convencional sem plantas de cobertura e com preparo de solo. (MP1: 79% de leguminosas e 21% de gramíneas + oleaginosas; MP2: 70% de leguminosas + 30% de gramíneas e oleaginosas de indivíduos/sementes semeadas em campo; MP3: vegetação espontânea), MPs: Cultivo das misturas de plantas; MS: Manejo do solo.

As variáveis que apresentam maior correlação entre si, dentro de cada componente, são representadas no gráfico biplot pelos vetores mais próximos e com ângulos agudos (<90°). Outra importante observação é que as variáveis dentro de cada quadrante são as mais importantes para explicar o comportamento dos tratamentos que estão projetados no mesmo quadrante, considerando-se a sobreposição dos dois gráficos biplot (Figura 6).

Ao analisar o gráfico de projeção dos tratamentos no plano da CP1 × CP2 (Figura 6 b), observa-se a formação de três grupos (GP). O GP1, localizado no primeiro quadrante, corresponde ao tratamento controle, caracterizado pelo cultivo do meloeiro amarelo sob manejo convencional. O GP2, posicionado entre os quadrantes 1 e 2, é formado pelos agroecossistemas que utilizam a incorporação da fitomassa após o seu corte (CR), independentemente do tipo de mistura de plantas utilizada (MP1, MP2 e MP3). Por sua vez, o GP3, situado no terceiro quadrante, é composto pelos agroecossistemas em que a estratégia de manejo é manter os resíduos vegetais sobre o solo (SR), com o plantio direto do melão sobre a palhada. Essa distribuição destaca o manejo do solo como o fator mais importante para a variabilidade dos dados avaliados neste experimento. As diferenças entre as características de cada grupo podem ser observadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Médias das variáveis para cada grupo formado pela ACP.

	GP1	GP2	GP3
Emissão CO₂ (kg ha ⁻¹)	1445,53	3707,21	3032,55
Emissão N₂O (kg ha ⁻¹)	0,12	0,04	-0,07
Emissão CH₄ (kg ha ⁻¹)	0,43	-0,14	-0,25
tempS (°C)	30,00	30,72	30,23
tempAr (°C)	39,60	41,47	41,85
N mineral aplicado (kg ha ⁻¹)	119,20	70,10	70,10
N orgânico das plantas de cobertura (kg ha ⁻¹)	0,00	98,03	88,10
N total aplicado (kg)	69,60	72,18	72,08
FTS_MPs (kg)	0,01	1,51	1,90
Produ. melão comercial (Mg ha ⁻¹)	57,60	78,10	66,73
Sólidos solúveis (°Brix)	9,70	9,32	9,18
tam.Frut (cm)	38,41	41,24	41,14
dens (g cm ⁻³)	1,62	1,52	1,47
pH	6,50	7,00	7,13
CE (dS m ⁻¹)	0,30	0,47	0,80
P (mg dm ⁻³)	63,80	51,27	78,07
K (cmol _c dm ⁻³)	0,20	0,30	0,33
Ca (cmol _c dm ⁻³)	2,00	2,60	3,53
Mg (cmol _c dm ⁻³)	1,10	1,33	1,87
Cu (mg dm ⁻³)	2,30	1,83	1,93
Fe (mg dm ⁻³)	34,30	27,63	34,20
Mn (mg dm ⁻³)	46,70	54,13	55,83
Zn (mg dm ⁻³)	4,10	4,80	5,20

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Notas: CO₂: dióxido de carbono, N₂O: óxido nitroso; CH₄: metano; tempS: temperatura média do solo durante o experimento; tempAr: temperatura média do ar durante o experimento; Nitrogênio total: total resultante da adubação mineral e orgânica aplicada nas MPs; ftsMPs: fitomassa das misturas de plantas; Prod.ME: produtividade comercial do melão; brix: teor de sólidos solúveis do melão amarelo; tam.Frut: tamanho dos frutos de melão; dens: densidade do solo; pH: potencial hidrogeniônico; CE: condutividade elétrica; e os teores no solo de P: fósforo disponível; K: potássio trocável; Ca: cálcio trocável; Mg: magnésio trocável; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco; MP: mistura de plantas; MS: manejo do solo. GP1: tratamento controle; GP2: tratamentos com revolvimento do solo; GP3: tratamentos sem revolvimento do solo.

Considerando-se a sobreposição das figuras 6A e B, o sistema de produção convencional do melão (tratamento controle) caracteriza-se pelas maiores médias de emissão total de CH₄ e N₂O, quantidade de N aplicado como adubo mineral, pH, CE e teores dos macronutrientes na camada de 0-5 cm de profundidade, e menores emissões totais de CO₂. Essa camada do solo foi escolhida para compor a ACP já que, segundo Rafael et al. (2024) e Costa (2024), é onde ocorre a maior influência do manejo do solo nos agroecossistemas multifuncionais avaliados. Para informações mais detalhadas da fertilidade do solo sob estes sistemas de manejo, os resultados relativos à sua caracterização química até 100 cm de profundidade podem ser observados no anexo (Tabela B).

O GP2, caracterizado pelo uso do revolvimento do solo na incorporação da fitomassa das misturas de plantas de cobertura, apresenta como principais características maiores médias de emissão total de CO₂, produtividade, tamanho do fruto e temperatura do solo, N-orgânico e N-total adicionado ao sistema.

Por outro lado, no GP3, onde se agrupam os tratamentos que não utilizam o revolvimento do solo, a emissão total de CO₂ é intermediária entre os outros grupos, enquanto as emissões totais de N₂O e CH₄ são menores. Além disso, o grupo apresenta menor pH, em faixa mais adequada para as plantas, e menor CE, além de maiores teores de cobre.

É importante destacar que, dentro do GP2, o agroecossistema composto pela combinação MP1CR, e do GP3, o agroecossistema MP3SR, apresentam menor semelhança com os outros dois componentes do seu grupo. Como exemplo, podemos destacar que o MP3SR apresentou a menor relação entre a emissão em CO₂-eq por tonelada de melão produzido (Tabela 6), enquanto o MP1CR apresentou a maior relação. Outras diferenças podem ser verificadas nas Tabelas A e B, apresentadas no Anexo.

As relações identificadas nesta ACP estão em concordância com os resultados apresentados anteriormente, bem como os observados por Lima (2015), que, ao estudar esses mesmos agroecossistemas no ano de 2019, observou menores emissões de CO₂ em tratamentos sem revolvimento do solo. Esse efeito foi atribuído ao tipo de manejo, uma vez que a ausência de revolvimento manteve as emissões em níveis semelhantes, independentemente da mistura de plantas utilizadas. Além disso, observou-se que a adubação nitrogenada influenciou negativamente os fluxos de CO₂ nos agroecossistemas, assim como estimulou as emissões totais de CH₄. Iamagute et al. (2015), também observaram que as emissões de CO₂ foram intensificadas nas parcelas submetidas ao preparo convencional do solo. Entretanto, Figueiredo et al. (2015) destacam que o manejo do solo associado à aplicação de resíduos vegetais, como no caso da cana-de-açúcar, também pode contribuir para a emissão de CO₂.

Esses resultados corroboram com Giongo et al. (2022), que destacam que os agroecossistemas vegetais manejados com o uso de MPs promovem benefícios na qualidade química do solo, favorecendo tanto cultivos perenes quanto anuais, a exemplo do meloeiro amarelo. A deposição dos resíduos vegetais na superfície do solo favorece a ciclagem de nutrientes, reduzindo perdas por lixiviação e aumentando a disponibilidade de elementos

essenciais às culturas, como os macro e micronutrientes avaliados neste estudo. Os autores concluem que, em cultivos perenes, esse manejo contribui para a manutenção da fertilidade do solo a longo prazo, enquanto nos sistemas anuais favorece o balanço nutricional ao longo dos ciclos produtivos. Dessa forma, efeitos combinados reforçam a sustentabilidade dos agroecossistemas ao melhorar a fertilidade do solo.

Para melhor esclarecer as diferenças das emissões de GEE dos agroecossistemas em relação ao cultivo convencional é importante que o monitoramento destas áreas seja realizado pelo mesmo período, já que isso afeta o cálculo da emissão acumulada. No presente estudo, as medições dos fluxos de GEE no tratamento controle foram iniciadas na fase de transplântio das mudas de melão e, portanto, as emissões totais apresentadas referem-se apenas ao período de cultivo do meloeiro, enquanto nos agroecossistemas, os fluxos foram medidos desde a fase de cultivo das plantas de cobertura e, portanto, representam um período maior. Apesar do sistema convencional de produção não apresentar a etapa de cultivo dos adubos verdes, a área é mantida em pousio, apresentando vegetação espontânea não irrigada e, portanto, diferente da parcela MP3. Assim, o solo da área controle também está sujeito às alterações de temperatura, disponibilidade de água (no período chuvoso), atividade biológica, dentre outros fatores que influenciam os fluxos de GEE do solo para a atmosfera.

A partir dos resultados apresentados, sugere-se a necessidade de mais estudos sobre as emissões de GEE utilizando misturas de plantas com maior proporção de espécies gramíneas, considerando suas características de maior resistência à degradação. Assim, seria possível manter o solo coberto por mais tempo e, conseqüentemente, reduzir o potencial de emissão de CO₂ dos agroecossistemas devido à decomposição mais lenta. De acordo com Costa (2025), cultivo solteiro ou consorciado de milheto, devido à sua composição bioquímica mais recalcitrante, com predominância de compostos de lignina, é uma estratégia eficiente para aumentar o tempo de permanência dos resíduos vegetais no solo, adicionar matéria orgânica, macro e micronutrientes, promovendo a proteção do solo, aspecto muito relevante na região semiárida.

Além disso, há de se considerar que o solo onde está instalado o sistema é de textura predominantemente arenosa, com baixa capacidade de estabilização da matéria orgânica adicionada. Assim, outros estudos que ajudem a elucidar quais as variáveis com maior impacto nesse processo, poderiam subsidiar a adoção de práticas para aumentar a eficiência do sequestro de C nesses solos. Outro aspecto a ser abordado seria a avaliação dos agroecossistemas em solos com de textura média a argilosa, com maior capacidade de estabilização do C. Todos esses estudos podem trazer novas perspectivas para aumentar a sustentabilidade da cadeia produtiva do melão no semiárido.

4 CONCLUSÃO

Os tratamentos com revolvimento do solo produziram maior emissão de gases do GEE por tonelada de melão produzido.

A mistura de plantas com maior proporção de leguminosas (MP1) esteve associada aos maiores fluxos de CO₂ para a atmosfera e isso se refletiu na maior proporção total de GEE por tonelada de fruto produzido. O tratamento com plantas espontâneas resultou na menor quantidade de GEE por tonelada de fruto produzido.

O fator mais relevante na separação das áreas foi o preparo do solo, representado pelo tipo de manejo adotado, com ou sem revolvimento.

Portanto, visando a redução das emissões de GEE para a atmosfera, o cultivo de meloeiro amarelo com presença de plantas espontâneas sem revolvimento do solo, ou seja, deposição de biomassa de plantas espontâneas sobre o solo antes do transplântio das mudas, é uma prática de baixa emissão de carbono recomendada para a região.

REFERÊNCIAS

- ABREU, N. L.; RIBEIRO, E. S. C.; SOUSA, C. E. S.; MORAES, L. M.; OLIVEIRA, J. V. C.; FARIA, L. A.; RUGGIERI, A. C.; CARDOSO, A. S.; FATURI, C.; RÊGO, A. C.; SILVA, T. C. Mudanças de uso da terra e emissão de gases de efeito estufa: uma explanação sobre os principais drivers de emissão. **Ciência Animal Brasileira**, v. 25, 77646P, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-6891v25e-77646P>.
- AOAC- Association Of Official Agricultural Chemists. Official methods of analysis of the Association of the Agricultural Chemists Gaithersburg, 2020.
- BARNARD, R.L.; BLAZEWICZ, S.J.; FIRESTONE, M.K. Rewetting of soil: revisiting the origin of soil CO₂ emissions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 147, 2020, p. 107819.
- BARROS, V. S. Pegada de carbono do melão produzido em sistemas convencional ou conservacionista. 2015. 116 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – **Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA**, Mossoró, 2015
- BERTIN, C.; YANG, X.; WESTON, L. A. The role of root exudates and allelochemicals in the rhizosphere. **Plant and Soil**, v. 256, p. 67-83, 2003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1026290508166>.
- CHAPUIS-LARDY, L.; WRAGE, N.; METAY, A.; CHOTTE, J.-L.; BERNOUX, M. Soils, a sink for N₂O? A review. **Global Change Biology**, v. 13, n. 1, p. 1-17, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01280.x>.
- COSTA, W. R. S. Composição bioquímica de resíduos de plantas de cobertura cultivadas em áreas de mangueira e qualidade de solos arenosos no Semiárido. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – **Universidade Federal do Vale do São Francisco**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, 2024.
- DE FIGUEIREDO, E. B.; PANOSSO, A. R.; REICOSKY, D. C.; LA SCALA JUNIOR, N. Short-term CO₂-C emissions from soil prior to sugarcane (*Saccharum spp.*) replanting in southern Brazil. **GCB Bioenergy**, v. 7, n. 2, p. 316–327, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12151>.
- FREITAS, M. S. C. de et al. Decomposition and nutrient release of cover crops in mango cultivation in Brazilian semi-arid region. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, e0170402, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20170402>.
- GALDINO, T. L. G.; SIGNOR, D.; MORAES, S. A. de. Modification of closed static chambers for collection of greenhouse gases emitted by soil. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 21, p. 1549–1558, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05068-4>.
- GIONGO, V.; SILVA, D. J.; SALVIANO, A. M.; CUNHA, T. J. F.; FIGUEIRÊDO, M. C. B. Desenhos de agroecossistemas multifuncionais para o cultivo de frutícolas irrigadas no Semiárido. **Comunicado Técnico Embrapa Semiárido**, n. 182, Petrolina, PE, p. 1-16, 2021. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/222829/1/Desenhos-de-agroecossistemas-CT182.2021>.

IAMAGUTI, J. L.; MOITINHO, M. R.; TEIXEIRA, D. D. B.; BICALHO, E. S.; PANOSSO, A. R.; LA SCALA JUNIOR, N. Preparo do solo e emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo em área canavieira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 5, p. 497–504, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n5p497-504>.

IPCC. Diretrizes de 2006 do IPCC para inventários nacionais de gases de efeito estufa. Hayama: IGES, 2006. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Cambridge University Press**, 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>.

IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **IPCC**, Geneva, Switzerland, 184 p., 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.

LI, N.; GAO, D.; ZHOU, X.; CHEN, S.; LI, C.; WU, F. Intercropping with potato-onion enhanced the soil microbial diversity of tomato. *Microorganisms*. 1ed. 2020, v. 8, p. 834. LIMA, L. O. Dinâmica e modelagem da matéria orgânica do solo e emissão de gases de efeito estufa em cultivo irrigado no semiárido nordestino. 2022. 115 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – **Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências Agrárias**, Areia, 2022.

MOURA, M.S.B.; GALVÍNCIO, J.D.; BRITO, L.T.L.; SOUZA, L.S.B.; SÁ, I.I.S.; SILVA, T.G.F. Clima e água de chuva no Semi-Árido. In: BRITO, L.T.L.; MOURA, M.S.B.; GAMA, G.F.B. (Org.). *Potencialidades da água de chuva no Semi-Árido brasileiro*. 1ed. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2007, v. 1, p. 37-59. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/157643>.

MARCOS-PÉREZ, M.; SÁNCHEZ-NAVARRO, V.; ZORNOZA, R. Soil greenhouse gas emissions in intercropped systems between melon and cowpea. **Spanish Journal of Soil Science**, v. 13, 2023, p. 11368. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/sjss.2023.11368>.

RAFAEL, M. R. S.; SALVIANO, A. M.; GIONGO, V.; MELO, S. B.; OLSZEWSKI, N.; OLIVEIRA, V. R. Agroecossistemas multifuncionais sustentáveis para produção de manga no semiárido: qualidade química e física do solo. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 17, n. 3, e11696, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2024v17n3e11696>.

SALVIANO, A. M.; CASTRO, J. M. da C.; MELO, S. B. de; MACEDO, M. V. de; OLIVEIRA, V. R.; GIONGO, V. Multivariate analysis as a tool in the selection of sustainable melon agroecosystems in the semi-arid region. **Revista Caatinga**, v. 36, n. 3, p. 543–552, jul.–set. 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252023v36n307rc>.

SANTOS, T. L. et al. Cleaner fruit production with green manure: the case of Brazili an melons. *Journal of Cleaner Production*, v. 181, p. 260-270, 2018.

SEEG - **OBSERVATÓRIO DO CLIMA**. Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil (1970-2021). SEEG 10 anos. 2023. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>.

SIGNOR, D.; CERRI, C. E. P. Nitrous oxide emissions in agricultural soils: a review. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, n. 3, p. 322-338, 2013. Disponível em: <https://www.agro.ufg.br/pat>.

SIGNOR, D.; MEDEIROS, T. A. F.; MORAES, S. A.; CORRÊA, L. C.; TOMAZI, M.; MOURA, M. S. B.; DEON, M. Soil greenhouse gases emissions in a goat production system in the Brazilian semiarid region. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 52, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-40632022v5272371>.

SILVA-OLAYA, A. M.; CERRI, C. E. P.; LA SCALA JR, N.; DIAS, C. T. S.; CERRI, C. C. Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. **Environmental Research Letters**, v. 8, 2013, p. 015014. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015014>.

TATE, K.R. Soil methane oxidation and land-use change - from process to mitigation. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 80, p. 260-272, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.10.010>.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Eds.). Manual de Métodos de Análise de Solo. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/181717/1/Manual-de-Metodos-de-Analise-de-Solo-2017.pdf>

THOMSON, A. J.; GIANNOPOULOS, G.; PRETTY, J.; BAGGS, E. M.; RICHARDSON, D. J. Biological sources and sinks of nitrous oxide and strategies to mitigate emissions. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 367, p. 1157-1168, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0415>.
TIBCO Software Inc. (2020). **Data Science Workbench**, version 14. <http://tibco.com>.

VARGAS, V.P. Gases de efeito estufa de solos cultivados com cana-de-açúcar: manejo do nitrogênio e da palhada. 2014. 239 f. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical e Subtropical) – **Instituto Agronômico de Campinas – IAC**, Campinas, 2014
WU, X.; YAO, Z.; BRÜGGEMANN, N.; SHEN, Z. Y.; WOLF, B.; DANNENMANN, M.; ZHENG, X.; BUTTERBACH-BAHL, K. Effects of soil moisture and temperature on CO₂ and CH₄ soil-atmosphere exchange of various land use/cover types in a semi-arid grassland in Inner Mongolia, China. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 42, p. 773-787, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.01.013>.

WUTKE, E. B.; CALEGARI, A.; WILDNER, L. P.; AMBROSANO, E. J.; ESTEVES, J. A. F. Espécies de adubos verdes e plantas de cobertura e recomendações para uso. In: WUTKE, E. B.; CALEGARI, A.; WILDNER, L. P.; AMBROSANO, E. J.; ESTEVES, J. A. F. (Org.). **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2023, v. 1, p. 57-171. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1153241>.

YANG, X.; MENG, J.; LAN, Y.; CHEN, W.; YANG, T.; YUAN, J.; LIU, S.; HAN, J. Effects of maize stover and its biochar on soil CO₂ emissions and labile organic carbon fractions in

Northeast China. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 240, p. 24–31, 2017.
Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.001>.

YANG, X.; MENG, J.; LAN, Y.; CHEN, W.; YANG, T.; YUAN, J.; LIU, S.; HAN, J. Effects of maize stover and its biochar on soil CO₂ emissions and labile organic carbon fractions in Northeast China. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 240, p. 24–31, 2017.
Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.001>.

**5 ARTIGO: FATORES DE EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO POR FERTILIZANTE
NITROGENADO EM SISTEMAS CONSERVACIONISTAS NA REGIÃO
SEMIÁRIDA**

**FATORES DE EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO POR FERTILIZANTE
NITROGENADO EM SISTEMAS CONSERVACIONISTAS NA REGIÃO
SEMIÁRIDA**

***NITROUS OXIDE EMISSION FACTORS BY NITROGEN FERTILIZER IN
CONSERVATION SYSTEMS IN THE SEMI-ARID REGION***

Vitória Rodrigues de Oliveira¹
Alessandra Monteiro Salviano²
José Mauro da Cunha e Castro³
Diana Signor⁴

RESUMO

Fertilizantes nitrogenados são a principal fonte de emissão de gases de efeito estufa (GEE) pelo solo em sistemas agrícolas. O objetivo deste trabalho foi avaliar, em condições controladas, o efeito de longo prazo da adição de plantas de cobertura e do manejo do solo sobre o fator de emissão de óxido nitroso induzido pela aplicação de nitrato de cálcio em um solo do Semiárido brasileiro. Foram utilizadas amostras de solo provenientes de um experimento de longa duração com dois tipos de manejo (com e sem revolvimento) e três misturas de plantas de cobertura: MP1 (79% leguminosas), MP2 (70% gramíneas e oleaginosas) e MP3 (vegetação espontânea). As amostras foram incubadas sob três doses de nitrato de cálcio (0, 100 e 300 mg kg⁻¹), em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial (3 x 2 x 3), com quatro repetições. Amostras de gases foram coletadas aos 3, 7, 15, 21, 28, 42 e 59 dias após a aplicação do fertilizante. Os maiores fluxos de N₂O ocorreram nos primeiros sete dias. As emissões acumuladas aumentaram linearmente com as doses de N apenas nos tratamentos sem revolvimento do solo, sendo mais intensas em MP3, seguidas por MP1 e MP2. Para a maior dose de N aplicada, os fatores de emissão de N₂O foram inferiores aos valores do IPCC: 0,74% nos tratamentos com revolvimento e 1,16% nos sem revolvimento. Os resultados indicam que o manejo do solo e a escolha de plantas de cobertura influenciam significativamente as emissões de N₂O em ambientes semiáridos.

Palavras-chave: capacidade de campo, ponto de murcha permanente, eficiência do uso da água, plantas de cobertura, plantio direto

ABSTRACT

¹Discente do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Pernambuco *Campus* Petrolina. *E-mail*: oliveiravr812@gmail.com

²Pesquisadora Embrapa Solos, UEP Recife, Pernambuco. *E-mail*: alessandra.salviano@embrapa.br

³Pesquisador Embrapa Soja, Londrina, Paraná. *E-mail*: mauro.castro@embrapa.br

⁴Pesquisadora Embrapa Semiárido e docente do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Pernambuco *Campus* Petrolina. *E-mail*: diana.signor@embrapa.br

Nitrogen fertilizers are the main source of greenhouse gas (GHG) emissions from soil in agricultural systems. The objective of this study was to evaluate, under controlled conditions, the long-term effect of cover crop addition and soil management on the nitrous oxide emission factor induced by calcium nitrate application in a soil from the Brazilian semiarid region. Soil samples from a long-term experiment with two types of management (with and without tillage) and three cover crop mixtures were used: MP1 (79% legumes), MP2 (70% grasses and oilseeds) and MP3 (spontaneous vegetation). The samples were incubated under three doses of calcium nitrate (0, 100 and 300 mg kg⁻¹), in a completely randomized design, in a factorial scheme (3 x 2 x 3), with four replications. Gas samples were collected at 3, 7, 15, 21, 28, 42 and 59 days after fertilizer application. The highest N₂O fluxes occurred in the first seven days. Cumulative emissions increased linearly with N doses only in treatments without soil disturbance, being more intense in MP3, followed by MP1 and MP2. For the highest N dose applied, N₂O emission factors were lower than the IPCC values: 0.74% in treatments with disturbance and 1.16% in those without disturbance. The results indicate that soil management and the choice of cover crops significantly influence N₂O emissions in semiarid environments.

Keywords: greenhouse gases, no-till, cover crops, calcium nitrate

1 INTRODUÇÃO

O aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) tem sido acompanhado por discussões científicas sobre as mudanças do clima, considerando suas causas e implicações para o meio ambiente e as atividades humanas, em escala mundial e nacional. As concentrações atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), principais GEE, têm se elevado ao longo das últimas décadas, principalmente em função de atividades antrópicas (IPCC, 2023).

Dentre os principais GEE, o N₂O tem sido amplamente discutido na literatura científica devido ao seu elevado potencial de aquecimento global, estimado em 298 vezes superior ao CO₂ (IPCC, 2014). A atividade agrícola é considerada uma das principais fontes emissoras desse gás, respondendo por aproximadamente 60% das emissões globais de N₂O, especialmente em função do uso de fertilizantes nitrogenados (IPCC, 2007; IPCC, 2014). No Brasil, a agricultura é um dos principais setores emissores de GEE e os fertilizantes sintéticos nitrogenados são a principal fonte dessas emissões, totalizando, em 2023, 37,6 Mt CO₂eq, (SEEG, 2024).

Apesar do impacto da adubação nitrogenada para as emissões de GEE, essa prática agrícola é amplamente utilizada e necessária devido à grande demanda de N pelas plantas. As emissões agrícolas de N₂O são moduladas por diversos fatores ambientais e práticas de manejo, principalmente o teor de N no solo (Signor e Cerri, 2013). Fatores como temperatura e umidade do solo exercem influência sobre a dinâmica do carbono, nitrogênio e oxigênio (Jiã et al., 2023), enquanto a concentração de oxigênio pode ser modulada conforme as práticas de manejo adotadas (Du et al., 2022). O pH do solo também pode contribuir, uma vez que regula a liberação de N₂O em processos biológicos e abióticos (Zaman et al., 2012).

Dessa forma, práticas de manejo como o parcelamento da adubação (McDonald *et al.*, 2023), o uso de fontes com estabilizadores de nitrogênio (Guzmán-Bustamante *et al.*, 2022), o uso de diferentes fontes de N e o ajuste da dose à demanda da cultura (Signor *et al.*, 2013) podem ser empregadas para minimizar as perdas de nitrogênio na forma de N₂O.

Compreender, em escala regional e local, como diferentes práticas de manejo podem influenciar a longo prazo as emissões de N₂O do solo induzidas por fertilizantes nitrogenados é uma estratégia relevante na proposição de estratégias para a mitigação das emissões de

GEE. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar, em condições controladas, o efeito de longo prazo da adição de plantas de cobertura e do manejo do solo sobre as emissões de N₂O induzidas pela aplicação de nitrato de cálcio em um solo do Semiárido brasileiro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em laboratório, sob temperatura controlada, na sede da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) Semiárido, localizada em Petrolina-PE. O ensaio foi conduzido com amostras de solo provenientes de agroecossistemas multifuncionais sustentáveis destinados ao cultivo do meloeiro amarelo em condições semiáridas, inserido em um experimento de longa duração, estabelecido há 12 anos, sendo composto pelo cultivo de três tipos de misturas de plantas (MPs) (MP1: 79% de leguminosas e 21% de gramíneas e oleaginosas; MP2: 70% de gramíneas e oleaginosas e 30% de leguminosas; e MP3: vegetação espontânea) (% de número de sementes/ha) e dois sistemas de manejo do solo (com revolvimento - CR e sem revolvimento - SR). Este experimento é conduzido anualmente, sendo composto por duas fases: 1. cultivo das misturas de plantas (MPs), que envolve a semeadura, o crescimento até o pleno florescimento (cerca dos 70 dias após semeadura) e o manejo da fitomassa no solo; e 2. cultivo do meloeiro amarelo.

As amostras de solo utilizadas no presente estudo foram coletadas após a colheita do melão no ciclo de 2023 (Tabela 5.1). As amostras utilizadas no experimento foram coletadas em todas as subparcelas do experimento de campo e, em seguida, o solo foi seco ao ar, homogeneizado e tamisado a 2 mm. Em seguida, amostras com 100 g de solo seco foram acondicionadas em frascos plásticos de 1100 mL, devidamente identificados. Após a preparação de cada unidade amostral, as amostras foram organizadas sobre a bancada do laboratório, em condições de temperatura controlada (25°C), e a umidade do solo de cada frasco foi ajustada à capacidade de campo.

Tabela 1 -Caracterização química de um Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico plúntico (0-10 cm), após 12 ciclos de cultivo irrigado de meloeiro amarelo em agroecossistemas multifuncionais, 2023.

	MP1	MP2	MP3	MP1	MP2	MP3
	Sem Revolvimento			Com Revolvimento		
CE (dS m ⁻¹)	0,48	0,51	0,61	0,48	0,46	0,44
Ph	7,1	7,15	7,1	7	7	7
P (mg dm ⁻³)	58,86	64,81	57,28	56,49	48,31	52,6
K (cmol _c dm ⁻³)	0,35	0,34	0,45	0,36	0,33	0,32
Na (cmol _c dm ⁻³)	0,11	0,1	0,13	0,1	0,09	0,09
Ca (cmol _c dm ⁻³)	3,2	3,2	3	2,4	2,6	2,7
Mg (cmol _c dm ⁻³)	1,45	1,5	1,55	1,2	1,3	1,15
Cu (mg dm ⁻³)	1,24	1,91	1,98	1,18	1,16	1,18
Fe (mg dm ⁻³)	8,94	11,72	11,13	13,26	8,05	11,19
Mn (mg dm ⁻³)	53,7	53,65	48,93	51,94	49	51,85
Zn (mg dm ⁻³)	4,21	3,19	3,43	4,38	2,82	3,01

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Notas: CE: condutividade elétrica; pH: potencial hidrogeniônico; e os teores no solo de P: fósforo disponível; K: potássio trocável; Na: sódio trocável; Ca: cálcio trocável; Mg: magnésio trocável; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco; MP1: 79% de leguminosas e 21% de gramíneas e oleaginosas; MP2: 70% de gramíneas e oleaginosas e 30% de leguminosas; e MP3: vegetação espontânea.

Em seguida, realizou-se a primeira amostragem de GEE do teste de incubação, correspondente ao dia 0 (pré-aplicação da adubação). Após essa coleta inicial, procedeu-se à fertilização do solo com soluções de nitrato de cálcio (17% de nitrogênio), aplicadas em duas doses (100 e 300 mg/kg de solo), além de um tratamento controle, sem aplicação do fertilizante. As soluções foram aplicadas na proporção de 1 mL por frasco e, no tratamento controle, adicionou-se o mesmo volume de água destilada, garantindo a uniformidade da umidade entre os tratamentos.

Após a aplicação dos fertilizantes, as coletas subsequentes foram realizadas aos 3, 7, 15, 21, 28, 42 e 59 dias após a aplicação do nitrato de cálcio ao solo, totalizando oito coletas ao longo do experimento, que teve duração de 59 dias.

Em todas as datas previamente estabelecidas para as coletas de GEE, foi realizado um cronograma de troca gasosa entre as amostras e o ambiente externo, seguindo um procedimento padronizado. Esse processo consistiu na abertura de todos os frascos por 30 minutos. Após esse período, os frascos foram fechados na mesma ordem em que foram abertos. Quatro horas após o fechamento, foi realizada a coleta dos gases.

As coletas foram realizadas com seringa de polipropileno de 15 mL, acoplada a uma agulha, a qual foi inserida em um septo de borracha localizado no centro da tampa dos frascos. Após a inserção da agulha, o gás no interior do frasco foi bombeado cinco vezes para homogeneização e, em seguida, a amostra coletada foi transferida para frascos de vidro evacuados (-10 kPa). As amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Cromatografia Gasosa da Embrapa Semiárido, onde as concentrações de N₂O foram determinadas utilizando um cromatógrafo Agilent, modelo 7890A, conforme descrito por Galdino et al. (2024).

Frascos em branco foram incubados nas mesmas condições experimentais e também tiveram amostras coletadas e analisadas. Os resultados emitidos pelo laboratório, após as análises dos GEE, foram organizados em uma planilha eletrônica para o cálculo dos fluxos em cada data de coleta, considerando o tempo de incubação, a massa de solo incubada, o volume do frasco, a leitura do branco e a concentração de N₂O dentro de cada frasco. A partir dos fluxos diários, estimou-se a emissão total acumulada ao longo do período de avaliação, conforme descrito em Galdino et al. (2024).

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3 x 2 x 3 (três tipos de plantas de cobertura, 2 manejos do solo e 3 doses de nitrogênio), com quatro repetições. Os fluxos diários e as emissões acumuladas de N₂O foram submetidos à análise de variância. Para os fluxos, os dias de incubação também foram considerados como variáveis. Os efeitos das doses de N sobre as emissões acumuladas foram avaliados por análise de regressão.

A partir das emissões totais, os fatores de emissão de N₂O induzidos pelo fertilizante nitrogenado foram calculados conforme as diretrizes de IPCC (2019):

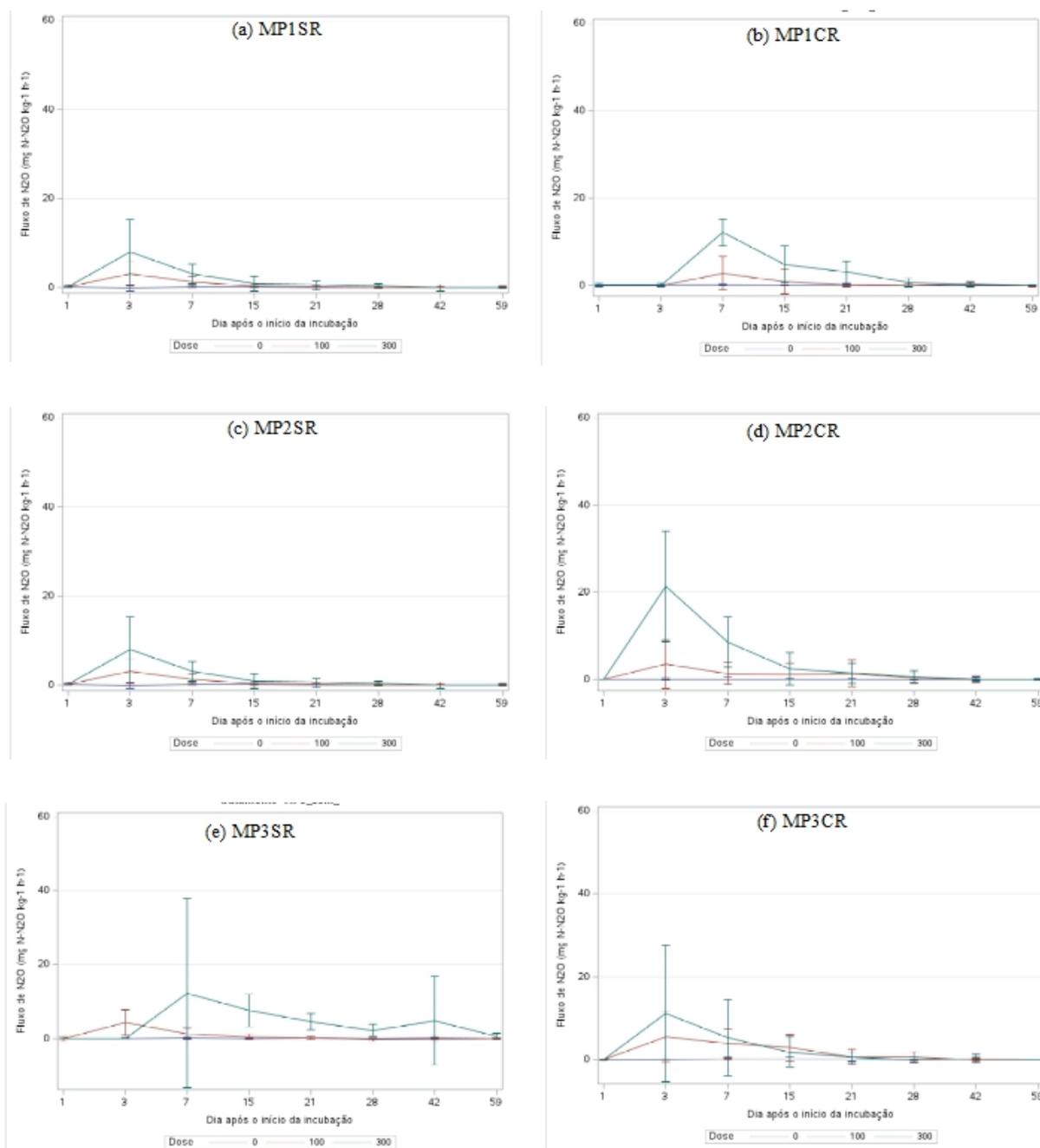
Fator de Emissão (%) = $100 * (\text{Emissão de N}_2\text{O do tratamento} - \text{Emissão de N}_2\text{O do controle}) / \text{Dose de N aplicada}$

Os fatores de emissão de cada parcela experimental foram submetidos à análise de variância e teste de comparação de médias.

3 RESULTADOS

Os fluxos de N₂O foram mais intensos nos primeiros dias após a aplicação do nitrato de cálcio ao solo, com picos ocorrendo entre o terceiro e o sétimo dia após o início do experimento (Figura 1). Resultados semelhantes também foram observados por Liyanage et al. (2022) avaliando o efeito da aplicação de dois tipos de fertilizantes orgânicos (esterco bovino e uma mistura de esterco de bovinos, aves e suínos) sobre os fluxos de N₂O do solo, em condições controladas.

Figura 1 - Fluxos de N_2O , em condições controladas, em função de doses de nitrato de cálcio aplicadas em solos de agroecossistemas multifuncionais sustentáveis em um Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico plúntico.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Notas: Barras verticais indicam o erro-padrão da média (n=4).

Diferenças significativas nos fluxos de N_2O entre os tratamentos foram observadas aos 3, 7 e 15 dias após a aplicação de $(CaNO_3)_2$ e ocorreram apenas para a dose de 300 mg de N kg⁻¹ de solo. Para a dose de 100 mg kg⁻¹, as diferenças entre tratamentos foram significativas apenas ao nível de probabilidade $p < 0,10$. Esse comportamento mostra que o umedecimento do solo para a incubação e a aplicação de uma dose intermediária de N não induziram os fluxos de N_2O , embora a umidade do solo seja um fator importante para a formação do N_2O ,

uma vez que o processo de desnitrificação é estritamente anaeróbico. No entanto, sua eficiência também depende da disponibilidade de oxigênio e nitrogênio, pois estes influenciam a ocorrência da desnitrificação completa ou incompleta, resultando na produção e emissão de N_2 para a atmosfera ou na liberação de compostos como NO e N_2O (Thomson et al., 2012). Entretanto, a disponibilidade de N no solo é o principal fator que governa as perdas por N_2O , sendo o fluxo total desse gás do solo para a atmosfera, dependente de um balanço entre o N dos processos de nitrificação e desnitrificação e a demanda de N pelas plantas e pelos microrganismos do solo (Davidson et al., 2000).

Os maiores fluxos de N_2O ocorreram nos tratamentos MP2CR e MP3SR, ambos com a dose 300 mg kg^{-1} de N, e foram observados aos 3 e 7 dias após a aplicação do $(\text{CaNO}_3)_2$, respectivamente.

As emissões de N_2O acumuladas ao longo do período de avaliação foram influenciadas pela interação entre doses de N aplicadas, manejo do solo e misturas de plantas de cobertura. As doses de N promoveram incrementos lineares nas emissões de N_2O apenas nos tratamentos sem revolvimento do solo (Tabela 2). Os coeficientes angulares das retas ajustadas foram de 11,45 para a MP1, 5,25 para a MP2 e 26,76 para a MP3. Esses valores demonstram que o aumento de uma unidade na dose de N aplicado ao solo na forma de nitrato de cálcio aumentou as emissões de N_2O de forma mais expressiva no solo manejado com plantas espontâneas e de forma menos intensa no solo manejado com aporte de plantas de cobertura com predominância de gramíneas (MP2).

Nos tratamentos com revolvimento, os ajustes não foram significativos. No tratamento MP1CR, as emissões totais foram de -327,62; 1245,58 e 3605,41 $\text{mg N-N}_2\text{O kg}^{-1}$ de solo para as doses 0, 100 e 300 mg kg^{-1} de N, respectivamente. Para MP2CR, esses valores foram, respectivamente, 889,36; 1085,00 e 2454,22 $\text{mg N-N}_2\text{O kg}^{-1}$ de solo. Finalmente, no tratamento MP3CR as emissões totais foram de 1018,38; 1597,94 e 2181,19 $\text{mg N-N}_2\text{O kg}^{-1}$ de solo para as doses 0, 100 e 300 mg kg^{-1} de N, respectivamente. Apesar da aparente diferença entre as médias, devido à variabilidade dos dados, os efeitos de dose não foram significativos nos tratamentos CR.

Tabela 2 - Ajustes lineares das emissões de N_2O por um Argissolo Vermelho-Amarelo em função da aplicação de doses de nitrato de cálcio.

Manejo do solo	Mistura de plantas	Ajuste linear	Coefficiente de Regressão (R2)	Nível de significância (p)
Sem revolvimento	MP1	$y = 11,45x - 233,35$	0,85	<0,0001
	MP2	$y = 5,25x - 134,08$	0,86	<0,0001
	MP3	$y = 26,76x - 1013,61$	0,49	0,067
Com revolvimento	MP1		ns	
	MP2		ns	
	MP3		ns	

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Notas: MP1: 79% de leguminosas e 21% de gramíneas e oleaginosas; MP2: 70% de gramíneas e oleaginosas e 30% de leguminosas; e MP3: vegetação espontânea) (% de número de sementes/ha). y: Emissão de N_2O ($\text{mg N-N}_2\text{O kg}^{-1}$ de solo); x: Dose de nitrogênio na forma de nitrato de cálcio (mg de N kg^{-1} de solo); ns: não significativo.

Embora os solos incubados tenham sido previamente secos ao ar e peneirados, atributos químicos e biológicos resultantes dos tratamentos que têm sido aplicados no campo há 12 anos não foram alterados. Possivelmente a diferença observada entre as misturas de plantas seja resultado do aporte anual de biomassas com diferentes qualidades, conforme

Freitas et al., (2024). A repetição sucessiva dos tratamentos ao longo dos anos pode estar promovendo uma diferenciação também das comunidades microbianas em cada tratamento.

Além disso, o maior aporte de N orgânico nas plantas do MP1, com maior quantidade de leguminosas, em comparação ao MP2, com predominância de gramíneas, pode ter levado a um enriquecimento na comunidade de microrganismos do solo relacionados ao ciclo do nitrogênio. Assim, nas condições do presente estudo, microrganismos relacionados ao ciclo do nitrogênio podem ter contribuído para as perdas mais intensas de N₂O do fertilizante nas parcelas do MP1 em comparação ao MP2, comprovada pelos diferentes coeficientes angulares das regressões ajustadas. Outra possibilidade para justificar essa diferença nos coeficientes angulares dos tratamentos MP1 e MP2 pode estar relacionada com a maior relação C/N dos resíduos em MP2. Freitas *et al.* (2019), trabalhando com o cultivo de mangueira sob os mesmos tratamentos do presente estudo, observaram que a relação C/N dos resíduos foi menor em MP1 (25,01) e maior em MP2 (30,18), o que indica uma decomposição mais lenta em MP2, possivelmente reduzindo a disponibilidade imediata de nitrogênio para os microrganismos do solo. Gramíneas apresentam uma relação C:N elevada (>30), maior teor de lignina e decomposição mais lenta que espécies leguminosas, características que podem intensificar a competição pelo nitrogênio disponível no solo, favorecendo sua imobilização pelos microrganismos decompositores (Wutke *et al.*, 2014).

Além disso, a ausência de efeito significativo nas parcelas com revolvimento pode indicar que este tratamento esteja reduzindo a população de microrganismos desnitrificadores. Isso pode estar acontecendo devido à predominância de decomposição aeróbica dos resíduos em função do revolvimento, o que leva a um tempo de residência dos resíduos muito menor nos tratamentos com revolvimento, como reportado por Freitas *et al.* (2019).

Os fatores de emissão de N₂O para o nitrato de cálcio, calculados com base nas recomendações utilizadas nos inventários nacionais de GEE (IPCC, 2019), foram influenciados pela interação entre doses de N e tipo de manejo de solo (Tabela 3). Os fatores de emissão representam a porcentagem do N adicionado via fertilizante que é perdida para a atmosfera na forma de N₂O. Em inventários nacionais de GEE, quando não há dados de medições nacionais disponíveis, as emissões induzidas pelo uso de fertilizantes minerais sintéticos podem ser estimadas de acordo com os fatores de emissão propostos pelo IPCC (1.6%, com incerteza variando de 1.3 a 1.9%) (IPCC, 2019). Os fatores de emissão observados no presente estudo variaram de 0,72% a 1,57% da dose de N aplicada ao solo.

Tabela 3 - Fatores de emissão de N₂O em função da aplicação de doses de nitrato de cálcio em um Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico plúntico sob dois sistemas de manejo.

Dose de N (mg kg ⁻¹ de solo)	Com Revolvimento	Sem Revolvimento
100	1,57 Aa	0,72 Ba
300	0,85 Ab	1,22 Aa

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Notas: Letras maiúsculas comparam as médias na linha e letras minúsculas comparam as médias na coluna. Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Signor et al. (2013) mostraram que os fatores de emissão de fertilizantes nitrogenados são influenciados pela dose do fertilizante e também pela fonte de nitrogênio utilizada, enquanto Kuang et al. (2021) ressaltam que, em áreas submetidas a irrigação por gotejamento, os fatores de emissão dos fertilizantes são menores que os propostos pelo IPCC.

Em função da variabilidade dos dados, sob o manejo conservacionista (sem revolvimento), os fatores de emissão de nitrato de cálcio foram estatisticamente similares entre as duas doses avaliadas. Apesar disso, ambos os valores se encontram abaixo do fator de

emissão recomendado pelo IPCC. Na área com revolvimento, mesmo na dose mais elevada avaliada, o fator de emissão ficou abaixo do proposto pelo IPCC (0,85%).

Esses resultados reforçam a importância de estudos locais para a geração de fatores de emissão que possam direcionar os inventários nacionais de GEE a fim de que as emissões nacionais estimadas nestes documentos sejam o mais próximo possível da realidade.

4 CONCLUSÃO

A aplicação de nitrato de cálcio ao solo dos agroecossistemas multifuncionais aumentou linearmente as emissões de N₂O do solo apenas nos tratamentos sem revolvimento, sendo o efeito mais intenso no solo que recebe anualmente aporte de biomassa de plantas leguminosas. Os fatores de emissão de N₂O a partir do uso de nitrato de cálcio em solos sem revolvimento é inferior ao valor proposto pelo IPCC (0,97% em média).

REFERÊNCIAS

- DAVIDSON, E. A.; KELLER, M.; ERICKSON, H. E.; VERCHOT, L. V.; VELDKAMP, E. Testing a conceptual model of soil emissions of nitrous and nitric oxides. **BioScience**, v. 50, n. 8, p. 667–680, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2000\)050\[0667:TACMOS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2000)050[0667:TACMOS]2.0.CO;2).
- DU, M.; YUAN, J.; ZHUO, M.; SADIQ, M.; WU, J.; XU, G.; LIU, S.; LI, J.; LI, G.; YAN, L. Effects of different land use patterns on soil properties and N₂O emissions on a semi-arid Loess Plateau of Central Gansu. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 11, 1128236, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1128236>.
- FREITAS, M. S. C.; SOUTO, J. S.; GONÇALVES, M.; ALMEIDA, L. E. S.; SALVIANO, A. M.; GIONGO, V. Decomposição e liberação de nutrientes de plantas de cobertura na cultura da manga no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, e0170402, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20170402>.
- GALDINO, T. L. G.; SIGNOR, D.; MORAES, S. A. de. Modification of closed static chambers for collection of greenhouse gases emitted by soil. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 21, p. 1549–1558, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05068-4>.
- GUZMAN-BUSTAMANTE, I.; SCHULZ, R.; MÜLLER, T.; RUSER, R. Split N application and DMP based nitrification inhibitors mitigate N₂O losses in a soil cropped with winter wheat. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 123, p. 119–135, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10705-022-10211-7>.
- MCDONALD, M. D.; LEWIS, K. L.; DELAUNE, P. B.; HUX, B. A.; BOUTTON, T. W.; GENTRY, T. J. Nitrogen fertilizer driven nitrous and nitric oxide production is decoupled from microbial genetic potential in low carbon, semi-arid soil. **Frontiers in Soil Science**, v. 2, 1050779, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.1050779>.
- IPCC. Mudanças Climáticas 2023: Relatório de Síntese. Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Mudanças Climáticas 2023: Relatório de Síntese. Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel

Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. IPCC, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.

IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 2007. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>.

IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. SEEG – Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil (1970-2023). Observatório do Clima, 2024. Disponível em: <http://www.observatoriodoclima.eco.br/>.

KUANG, W.; GAO, X.; TENUTA, M.; ZENG, F. A global meta-analysis of nitrous oxide emission from drip-irrigated cropping system. **Global Change Biology**, v. 27, n. 13, p. 3244–3256, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.15636>.

RAFAEL, M. R. S.; SILVA, P. G.; LIMA, A. M. N.; CUNHA, J. C.; GIONGO, V.; SALVIANO, A. M. Plantas de cobertura em ambiente semiárido: estratégia tecnológica para o aumento da produção de biomassa, adição de carbono e ciclagem de nutrientes. In: RAFAEL, M. R. S. Ciclagem de nutrientes e qualidade do solo em agroecossistemas multifuncionais frutícolas irrigados no Semiárido. Juazeiro – BA: **Universidade Federal do Vale do São Francisco**, 2020. Cap. 3, p. 23-38.

SIGNOR, D.; CERRI, C. E. P. Nitrous oxide emissions in agricultural soils: a review. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, n. 3, p. 322-338, 2013. Disponível em: <https://www.agro.ufg.br/pat>.

THOMSON, A. J.; GIANNOPOULOS, G.; PRETTY, J.; BAGGS, E. M.; RICHARDSON, D. J. Biological sources and sinks of nitrous oxide and strategies to mitigate emissions. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 367, p. 1157-1168, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0415>.

WUTKE, E. B.; CALEGARI, A.; WILDNER, L. do P. Espécies de adubos verdes e plantas de cobertura e recomendações para uso. In: LIMA FILHO, O. F. de; AMBROSANO, E. J.; ROSSI, F.; CARLOS, J. A. D. (Ed.). Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática. Brasília, DF: Embrapa, 2014. v. 1 p. 59-168. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1153241>

ZAMAN, M.; NGUYEN, M.L.; ŠIMEK, M.; NAWAZ, S.; KHAN, M.J.; BABAR, M.N.; ZAMAN, S. Emissions of Nitrous Oxide (N₂O) and Di-Nitrogen (N₂) from the Agricultural Landscapes, Sources, Sinks, and Factors Affecting N₂O and N₂ Ratios. **Greenhouse Gases – Emission, Measurement and Management**, 2012. Disponível em: <https://www.intechopen.com>.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A agricultura é uma atividade de grande importância econômica para o Brasil. No contexto das mudanças climáticas, o setor contribui para as emissões de GEE, principalmente pelo uso de fertilizantes nitrogenados aplicados ao solo, mas também pode lançar mão de estratégias de manejo que mitiguem essas emissões. Uma dessas estratégias é o cultivo sem o revolvimento frequente do solo.

Os resultados do presente estudo mostram que, em regiões semiáridas de todo o mundo, o plantio direto tem sido uma prática de manejo eficiente para promover essa mitigação. O aporte de material orgânico ao solo, como a biomassa aérea de plantas de cobertura, também é indicado como uma alternativa para promover o acúmulo de carbono no solo e reduzir as emissões de GEE.

Contudo, no presente estudo, o efeito da deposição contínua de diferentes tipos de plantas de cobertura não influenciou a emissão de GEE em sistemas de produção de meloeiro amarelo no Semiárido brasileiro. Entretanto, as emissões podem ser mitigadas com o não revolvimento do solo. Nesse sentido, o cultivo de meloeiro amarelo com presença de plantas espontâneas sem revolvimento do solo, ou seja, deposição de biomassa de plantas espontâneas sobre o solo antes do transplante das mudas, é uma prática de baixa emissão de carbono recomendada para a região.

Os resultados sugerem ainda que, nas condições de cultivo do semiárido brasileiro, o uso da fertirrigação é uma ferramenta relevante para mitigar as emissões de N_2O oriunda dos fertilizantes nitrogenados.

Finalmente, os agroecossistemas estudados apresentaram fatores de emissão de N_2O a partir do uso de fertilizantes nitrogenados menores que os propostos pelo IPCC. Estas informações podem contribuir para os inventários nacionais de emissões de GEE.

REFERÊNCIAS

- CARDOSO, E. J. B. N.; VASCONCELLOS, R. L. F.; BINI, D.; MIYAUCHI, M. Y. H.; SANTOS, C. A.; ALVES, P. R. L.; PAULA, A. M.; NAKATANI, A. S.; PEREIRA, J. M.; NOGUEIRA, M. A. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? **Scientia Agricola**, v. 70, n. 4, p. 274–289, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000400009>
- CASTILHO, K. B.; CORTEZ, J. W.; OLSZEWSKI, N.; SALVIANO, A. M.; TRINDADE, M. H. Análise multivariada da qualidade química de um Latossolo sob sistemas de manejo do solo. **Revista Agrarian**, v. 10, n. 36, p. 162-169, 2017
- FERNANDES, C. H. S.; TEJO, D. P.; ARRUDA, K. M. A. Desenvolvimento do Sistema de Plantio Direto no Brasil: Histórico, Implantação e Culturas Utilizadas. **Uniciências**, v. 23, n. 2, p. 83-88, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17921/1415-5141.2019v23n2p83-88>.
- FREITAS, L.; OLIVEIRA, I. A.; SILVA, L. S.; FRARE, J. C. V.; FILLA, V. A.; GOMES, R. P. Indicadores da qualidade química e física do solo sob diferentes sistemas de manejo. **UNIMAR Ciências**, v. 26, n. 1-2, p. 08-25, 2017. Disponível em: <https://ojs.unimar.br/index.php/ciencias/article/view/511>.
- GIONGO, V.; SALVIANO, A. M.; CUNHA, T. J. F.; SIGNOR, D.; TAURA, T. A.; OLZEWSKI, N.; LIMA, R. L. F. de A.; BRITO, M. C. F. Desenhos de agroecossistemas multifuncionais sustentáveis e intensivos. In: SOTTA, E. D.; SAMPAIO, F. G.; MARZALL, K.; SILVA, W. G. da (Org.). Estratégias de adaptação às mudanças do clima dos sistemas agropecuários brasileiros. Brasília, DF: MAPA, 2021. p. 152-153. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/228653/1/Desenhos-de-agroecossistemas-multifuncionais-2021>.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA**. Melão no Brasil. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/melao/br>.
- MAPA -MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA**. . Projeções do agronegócio: Brasil 2022/23 a 2032/33. Brasília: MAPA, 2023.
- PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA (IPCC)**. Mudança do Clima 2023: Relatório Síntese. Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. Genebra, Suíça: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>.
- SANTOS, T. de L.; NUNES, A. B. A.; GIONGO, V.; BARROS, V. da S.; FIGUEIREDO, M. C. B. de. Cleaner fruit production with green manure: The case of Brazilian melons. **Journal of Cleaner Production**, v. 181, p. 260-270, 2018.

APÊNDICE A – TABELA SOBRE MÉDIA DAS EMISSÕES DE CO₂ DURANTE O CICLO DO AGROECOSSISTEMA PARA CULTIVO DO MELOEIRO, CICLO 2023

Tabela – Média das emissões de CO₂ durante o ciclo do agroecossistema para cultivo do meloeiro, ciclo 2023.

Época de coleta	Controle		MP1		MP2		MP3	
	SR							
	Me	P	Me	P	Me	P	Me	P
17/08/2023	276,81	78,05	45,34	37,19	70,39	315,84	63,42	108,45
31/08/2023			186,19	113,31	210,46	78,11	222,14	20,21
14/09/2023			289,95	41,58	196,19	89,46	234,40	85,12
05/10/2023			-	-	111,76	213,44	22,68	89,14
11/10/2023			41,36	43,38	25,06	24,46	46,16	34,34
18/10/2023			39,52	110,60	43,89	82,15	257,00	20,96
26/10/2023	276,81	78,05	144,85	30,13	57,19	153,34	42,31	160,32
01/11/2023	-	-	24,58	12,68	4,92	70,69	47,17	224,06
09/11/2023	72,10	39,86	20,09	20,54	6,09	27,31	-	-
16/11/2023	247,25	60,61	208,99	49,58	11,32	62,71	17,21	105,97
22/11/2023	51,37	145,12	118,20	42,88	96,39	31,90	20,75	380,10
29/11/2023	185,43	21,91	217,04	72,80	153,58	60,60	101,45	27,78
06/12/2023	18,54	70,57	35,54	17,36	40,36	47,62	15,81	15,42
14/12/2023	49,35	42,25	28,08	234,39	51,68	17,47	14,47	102,75
	CR							
			Me	P	Me	P	Me	P
17/08/2023			75,08	15,05	165,90	84,10	107,90	36,70
31/08/2023			290,73	89,35	206,60	44,30	126,00	21,70
14/09/2023			405,95	249,58	284,20	261,70	394,40	46,50
05/10/2023			33,07	82,10	53,00	215,00	70,30	23,50
11/10/2023			19,66	14,14	10,50	211,90	59,50	377,60
18/10/2023			80,30	32,83	18,70	153,70	19,80	153,90
26/10/2023			99,22	16,99	165,60	19,30	96,20	46,80
01/11/2023			88,57	138,41	60,40	119,80	117,70	46,80
09/11/2023			14,90	116,79	11,80	11,10	9,80	100,20
16/11/2023			198,19	8,07	99,60	36,30	5,50	67,80
22/11/2023			90,90	27,45	157,90	26,50	45,60	79,20
29/11/2023			238,13	37,10	56,70	20,10	84,20	58,90
06/12/2023			47,37	38,55	44,70	51,10	32,70	152,80
14/12/2023			48,49	49,62	57,30	30,20	10,70	10,80

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Notas: Me: média; P: erro padrão; MP1 SR: mistura de planta 1 sem revolvimento; MP2 SR: mistura de planta 2 sem revolvimento; MP3 SR: mistura de planta 3 sem revolvimento; MP1 CR: mistura de planta 1 com revolvimento; MP2 CR: mistura de planta 2 com revolvimento; MP3 CR: mistura de planta 3 com revolvimento; CTL (Controle): cultivo convencional sem plantas de cobertura e com preparo de solo,(MP1: 79% de leguminosas e 21% de gramíneas + oleaginosas; MP2: 70% de leguminosas + 30% de gramíneas e oleaginosas de indivíduos/sementes semeadas em campo; MP3:

vegetação espontânea), MPs: Cultivo das misturas de plantas; MS: Manejo do solo; ME: Cultivo do meloeiro amarelo.

APÊNDICE B – TABELA SOBRE MÉDIA DOS PARÂMETROS QUÍMICOS DO SOLO EM DIFERENTES PROFUNDIDADES APÓS O CICLO DO AGROECOSSISTEMA PARA O CULTIVO DO MELOEIRO AMARELO, CICLO 2023

ANEXO B – Média dos parâmetros químicos do solo em diferentes profundidades após o ciclo do agroecossistema para o cultivo do meloeiro amarelo, ciclo 2023.

(continua)

		MP1	MP2	MP3	MP1	MP2	MP3	CTL
		SR			CR			CTL
		0-5 cm						
C.E (dS m ⁻¹)	Me	0,86	0,82	0,67	0,50	0,52	0,46	0,31
	P	0,04	0,11	0,06	0,02	0,03	0,03	0,04
pH	Me	7,10	7,15	7,18	7,00	7,00	7,00	6,53
	P	0,10	0,05	0,09	0,00	0,00	0,00	0,23
P (mg dm ⁻³)	Me	83,87	80,52	88,82	52,97	77,55	47,64	66,3 1
	P	21,06	10,78	15,66	2,83	29,73	12,31	2,55
K (cmol _c dm ⁻³)	Me	0,31	0,32	0,43	0,31	0,29	0,31	0,20
	P	0,04	0,04	0,05	0,02	0,02	0,04	0,01
Ca (cmol _c dm ⁻³)	Me	3,75	3,63	2,65	2,65	2,68	2,70	2,00
	P	0,38	0,22	0,94	0,13	0,16	0,24	0,00
Mg (cmol _c dm ⁻³)	Me	1,80	1,90	2,33	1,33	1,30	1,33	1,00
	P	0,18	0,09	0,57	0,09	0,09	0,11	0,06
Cu (mg dm ⁻³)	Me	1,60	2,01	2,14	1,88	1,79	1,89	2,36
	P	0,15	0,18	0,05	0,14	0,04	0,06	0,06
Fe (mg dm ⁻³)	Me	37,58	35,45	27,38	27,37	34,43	25,62	36,6 4
	P	3,16	2,37	2,38	5,95	10,16	1,62	2,51
Mn (mg dm ⁻³)	Me	56,55	49,92	51,91	60,32	51,43	51,73	46,0 5
	P	5,41	4,86	2,51	6,32	5,59	4,77	3,80
Zn (mg dm ⁻³)	Me	12,94	4,71	4,65	5,24	4,66	4,60	4,44
	P	7,63	0,55	0,67	0,71	0,24	0,51	0,38
		5-10 cm						
C.E (dS m ⁻¹)	Me	0,50	0,94	0,52	0,40	0,43	0,42	0,34
	P	0,04	0,50	0,09	0,05	0,01	0,02	0,06
pH	Me	7,15	7,18	7,15	7,00	6,83	7,00	6,80
	P	0,09	0,06	0,07	0,00	0,18	0,00	0,20
P (mg dm ⁻³)	Me	40,01	49,86	55,94	50,69	43,59	68,80	73,8 8
	P	8,57	7,42	4,15	3,87	3,13	12,43	1,11
K (cmol _c dm ⁻³)	Me	0,31	0,30	0,37	0,34	0,32	0,31	0,25
	P	0,06	0,05	0,02	0,02	0,04	0,04	0,01
Ca (cmol _c dm ⁻³)	Me	2,35	2,65	2,50	2,73	2,35	2,00	2,00
	P	0,24	0,39	0,21	0,16	0,15	0,20	0,23
Mg (cmol _c dm ⁻³)	Me	1,25	1,30	1,33	1,38	1,28	0,93	1,03

	P	0,16	0,21	0,14	0,10	0,11	0,16	0,12
Cu (mg dm ⁻³)	Me	1,86	2,00	2,11	2,15	2,09	2,10	2,92
	P	0,06	0,09	0,06	0,08	0,03	0,03	0,30
Fe (mg dm ⁻³)	Me	30,76	31,29	27,15	23,52	20,65	28,04	34,1 1
	P	4,22	3,84	4,69	4,85	3,61	10,09	3,48
Mn (mg dm ⁻³)	Me	37,49	42,54	45,27	44,59	52,66	51,13	54,9 9
	P	4,96	1,92	4,63	2,28	6,13	4,59	3,14
(continuação)								
		MP1	MP2	MP3	MP1	MP2	MP3	CTL
		SR			CR			CTL
5 - 10 cm								
Zn (mg dm ⁻³)	Me	3,41	3,49	6,99	4,82	3,34	4,93	5,20
	P	0,42	0,39	1,99	0,26	0,75	0,47	0,99
10 - 20 cm								
C.E (dS m ⁻¹)	Me	0,50	0,94	0,52	0,40	0,43	0,42	0,34
	P	0,04	0,50	0,09	0,05	0,01	0,02	0,06
pH	Me	7,15	7,18	7,15	7,00	6,83	7,00	6,80
	P	0,09	0,06	0,07	0,00	0,18	0,00	0,20
P (mg dm ⁻³)	Me	40,01	49,86	55,94	50,69	43,59	68,80	73,8 8
	P	8,57	7,42	4,15	3,87	3,13	12,43	1,11
K (cmolc.dm ⁻³)	Me	0,31	0,30	0,37	0,34	0,32	0,31	0,25
	P	0,06	0,05	0,02	0,02	0,04	0,04	0,01
Ca (cmolc.dm ⁻³)	Me	2,35	2,65	2,50	2,73	2,35	2,00	2,00
	P	0,24	0,39	0,21	0,16	0,15	0,20	0,23
Mg (cmolc.dm ⁻³)	Me	1,25	1,30	1,33	1,38	1,28	0,93	1,03
	P	0,16	0,21	0,14	0,10	0,11	0,16	0,12
Cu (mg dm ⁻³)	Me	1,86	2,00	2,11	2,15	2,09	2,10	2,92
	P	0,06	0,09	0,06	0,08	0,03	0,03	0,30
Fe (mg dm ⁻³)	Me	30,76	31,29	27,15	23,52	20,65	28,04	34,1 1
	P	4,22	3,84	4,69	4,85	3,61	10,09	3,48
Mn (mg dm ⁻³)	Me	37,49	42,54	45,27	44,59	52,66	51,13	54,9 9
	P	4,96	1,92	4,63	2,28	6,13	4,59	3,14
Zn (mg dm ⁻³)	Me	0,96	1,33	1,59	5,05	2,73	1,84	2,30
	P	0,16	0,39	0,35	3,20	0,43	0,25	0,05
20-40 cm								
C.E (dS m ⁻¹)	Me	0,28	0,24	0,28	0,29	0,22	0,24	0,16
	P	0,03	0,01	0,02	0,03	0,00	0,02	0,04
pH	Me	6,60	6,60	6,75	6,85	6,85	6,83	6,53
	P	0,25	0,25	0,25	0,15	0,15	0,18	0,23
P (mg dm ⁻³)	Me	24,58	29,95	36,66	33,49	26,11	30,94	51,9 8
	P	3,45	5,32	4,25	3,70	4,51	7,78	20,5 2
K (cmolc.dm ⁻³)	Me	0,32	0,27	0,28	0,33	0,26	0,27	0,28

	P	0,06	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03	0,02
Ca (cmol _c dm ⁻³)	Me	1,53	1,70	1,33	1,90	1,98	1,53	1,40
	P	0,20	0,21	0,08	0,37	0,37	0,08	0,06
Mg (cmol _c dm ⁻³)	Me	0,80	0,88	0,65	0,93	1,05	0,75	0,73
	P	0,09	0,14	0,03	0,19	0,17	0,07	0,03
Cu (mg dm ⁻³)	Me	2,35	2,27	2,24	2,16	2,25	2,22	2,33
	P	0,10	0,18	0,07	0,06	0,03	0,18	0,08
Fe (mg dm ⁻³)	Me	2,71	2,15	1,82	20,04	3,58	23,89	2,27
	P	0,50	0,35	0,17	18,21	1,55	22,62	0,50
Mn (mg dm ⁻³)	Me	21,31	23,38	20,17	98,95	18,90	17,80	27,1 2
	P	1,04	4,17	2,97	78,10	1,20	2,93	0,59
Zn (mg dm ⁻³)	Me	30,93	34,73	28,24	32,73	25,88	25,67	58,0 1
	P	7,48	4,50	7,03	4,66	2,40	7,75	5,49

(continuação)

		MP1	MP2	MP3	MP1	MP2	MP3	CTL
		SR			CR			CTL
40-60 cm								
C.E (dS m ⁻¹)	Me	0,24	0,21	0,18	0,20	0,26	0,24	0,24
	P	0,01	0,01	0,04	0,00	0,04	0,00	0,00
pH	Me	6,55	6,38	6,35	6,68	6,65	6,80	7,00
	P	0,26	0,23	0,22	0,19	0,21	0,20	0,00
P (mg dm ⁻³)	Me	9,67	12,39	17,51	11,71	7,39	11,69	22,70
	P	4,43	4,85	3,90	2,36	1,07	4,58	3,98
K (cmol _c dm ⁻³)	Me	0,17	0,18	0,22	0,22	0,18	0,22	0,33
	P	0,01	0,03	0,05	0,04	0,01	0,02	0,02
Ca (cmol _c dm ⁻³)	Me	1,75	1,63	1,85	1,83	1,93	2,00	1,70
	P	0,15	0,10	0,07	0,09	0,05	0,07	0,10
Mg (cmol _c dm ⁻³)	Me	0,95	0,78	0,85	0,88	0,98	1,03	0,87
	P	0,07	0,05	0,03	0,05	0,05	0,09	0,07
Cu (mg dm ⁻³)	Me	1,78	1,75	1,82	2,14	1,98	2,01	2,00
	P	0,16	0,03	0,07	0,09	0,04	0,02	0,07
Fe (mg dm ⁻³)	Me	15,75	17,75	16,00	20,07	15,68	13,79	45,22
	P	3,77	2,56	3,69	6,25	0,69	4,40	15,20
Mn (mg dm ⁻³)	Me	9,12	10,26	7,58	10,37	8,97	7,95	12,10
	P	2,10	2,03	1,43	2,96	1,04	0,82	2,29
Zn (mg dm ⁻³)	Me	1,72	3,03	1,87	2,54	5,73	2,15	2,05
	P	0,39	1,36	0,79	0,74	2,62	0,47	0,47
60-80 cm								
C.E (dS m ⁻¹)	Me	0,22	0,23	0,18	0,23	0,24	0,25	0,30
	P	0,01	0,01	0,03	0,01	0,02	0,02	0,05
pH	Me	6,13	6,18	6,15	6,23	6,50	6,40	6,10
	P	0,32	0,09	0,12	0,08	0,19	0,23	0,06
P (mg dm ⁻³)	Me	1,84	4,58	11,37	7,55	2,04	4,52	9,86
	P	0,62	2,32	5,39	3,73	0,60	2,13	2,39
K (cmol _c dm ⁻³)	Me	0,07	0,17	0,12	0,30	0,29	0,22	0,72
	P	0,01	0,04	0,02	0,06	0,02	0,02	0,16
Ca (cmol _c dm ⁻³)	Me	2,15	1,80	1,88	1,95	1,85	1,55	1,80

	P	0,19	0,08	0,17	0,10	0,15	0,10	0,12
Mg (cmol _c dm ⁻³)	Me	1,10	0,88	1,00	1,00	1,28	0,78	0,93
	P	0,14	0,05	0,09	0,11	0,38	0,03	0,03
Cu (mg dm ⁻³)	Me	1,83	1,47	1,65	1,49	1,47	1,41	1,79
	P	0,13	0,05	0,13	0,06	0,04	0,01	0,23
Fe (mg dm ⁻³)	Me	16,32	18,62	20,28	14,60	16,50	17,41	41,74
	P	2,26	2,40	7,04	1,59	1,51	3,26	11,74
Mn (mg dm ⁻³)	Me	5,96	6,08	7,65	4,48	5,36	4,74	13,87
	P	1,61	1,16	1,90	0,99	0,87	0,34	2,84
Zn (mg dm ⁻³)	Me	0,95	2,65	2,43	2,99	3,01	1,64	2,46
	P	0,28	0,48	0,27	1,00	2,31	0,41	0,39
		MP1	MP2	MP3	MP1	MP2	MP3	CTL
		SR			CR			CTL
		80 - 100 cm						
C.E (dS m ⁻¹)	Me	0,23	0,21	0,23	0,22	0,22	0,25	0,31
	P	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,04
		(conclusão)						
		MP1	MP2	MP3	MP1	MP2	MP3	CTL
		SR			CR			CTL
		80 - 100 cm						
pH	Me	6,00	6,13	6,18	6,18	6,50	6,33	6,07
	P	0,19	0,08	0,11	0,09	0,17	0,24	0,07
P (mg dm ⁻³)	Me	2,65	1,88	3,50	0,96	3,82	5,30	5,92
	P	0,66	0,57	1,63	0,24	2,95	2,08	4,14
K (cmol _c dm ⁻³)	Me	0,17	0,18	0,17	0,25	0,31	0,24	0,41
	P	0,01	0,02	0,03	0,04	0,07	0,02	0,09
Ca (cmol _c dm ⁻³)	Me	1,68	1,75	2,03	1,83	2,20	1,73	1,63
	P	0,13	0,09	0,23	0,09	0,07	0,08	0,09
Mg (cmol _c dm ⁻³)	Me	0,80	0,85	0,95	0,88	1,08	0,88	0,83
	P	0,04	0,03	0,12	0,05	0,05	0,08	0,07
Cu (mg dm ⁻³)	Me	1,38	1,38	1,43	1,42	1,55	1,46	1,47
	P	0,04	0,03	0,03	0,01	0,07	0,04	0,05
Fe (mg dm ⁻³)	Me	19,59	19,96	22,45	17,93	22,89	24,22	41,49
	P	3,44	2,16	8,99	5,54	3,12	4,81	4,93
Mn (mg dm ⁻³)	Me	4,47	5,16	5,17	4,94	8,43	5,47	6,74
	P	0,75	1,28	0,96	0,51	2,63	0,63	1,28
Zn (mg dm ⁻³)	Me	0,83	1,13	1,15	1,37	4,48	3,74	2,22
	P	0,22	0,63	0,44	0,37	2,61	2,00	1,35

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Notas: Me: média; P: erro padrão. pH: potencial hidrogeniônico; C.E: condutividade elétrica; teores de P:fósforo (P); K:potássio (K); Ca: cálcio (Ca); Mg: final de magnésio; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco; MP: mistura de plantas; MS: manejo do solo.