



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**FLUXO DE N₂O E CARBONO DO SOLO COM MANEJO DE
FERTILIZANTE NITROGENADO EM UMA SUCESSÃO DE
MILHO/SOJA E PLANTAS DE COBERTURA NO CERRADO**

DOUGLAS RODRIGUES DE JESUS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

BRASÍLIA/DF
JULHO/2025



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**FLUXO DE N₂O E CARBONO DO SOLO COM MANEJO DE
FERTILIZANTE NITROGENADO EM UMA SUCESSÃO DE
MILHO/SOJA E PLANTAS DE COBERTURA NO CERRADO**

DOUGLAS RODRIGUES DE JESUS

ORIENTADORA: Prof^a. Dr^a. MARIA LUCRÉCIA GEROSA RAMOS
CO-ORIENTADORA: Pesq^a. Dr^a. ARMINDA MOREIRA DE CARVALHO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

FLUXO DE N₂O E CARBONO DO SOLO COM MANEJO DE
FERTILIZANTE NITROGENADO EM UMA SUCESSÃO DE
MILHO/SOJA E PLANTAS DE COBERTURA NO CERRADO

DOUGLAS RODRIGUES DE JESUS

DESSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA, COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM AGRONOMIA.

APROVADA POR:

ORIENTADORA

Dr^a. MARIA LUCRÉCIA GEROSA RAMOS- Universidade de Brasília
e-mail: lucrecia@unb.br

COORIENTADORA

Dr^a ARMINDA MOREIRA DE CARVALHO- Empresa Brasileira de Pesquisa
Agropecuária- Embrapa Cerrados
e-mail: arminda.carvalho@embrapa.br

AVALIADOR INTERNO

CÍCERO CÉLIO DE FIGUEIREDO- Universidade de Brasília
e-mail: cicerocef@unb.br

AVALIADOR EXTERNO

HELSON MARIO MARTINS DO VALE - Instituto de Biologia,
Universidade de Brasília
e-mail: helson@unb.br

BRASÍLIA/DF, 29 de julho de 2025.

FICHA CATALOGRÁFICA

Jesus, Douglas Rodrigues de
Fluxo de N₂O e carbono do solo com manejo de fertilizante nitrogenado em uma sucessão de milho/soja e Plantas de Cobertura no cerrado. / Douglas Rodrigues de Jesus; orientação de Maria Lucrécia Gerosa Ramos.

– Brasília, 2025.
113 p.: il.

Dissertação de Mestrado (M) – Universidade de Brasília/Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2025.

1. *Cajanus cajan*. 2. *Crotalaria juncea*. 3. *Mucuna aterrima*. 4. *Raphanus sativus*. 5. mudanças climáticas. 6. efeito estufa. I. Jesus, Douglas Rodrigues de. II. Universidade de Brasília, faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária. Mestrado em Agronomia. III. Título. IV. Ramos, Maria Lucrécia Gerosa.

CDD ou CDU
Agris / FAO

JESUS, Douglas Rodrigues de. Fluxo de N₂O e carbono do solo sob a eficiência do fertilizante nitrogenado em sistema de sucessão de culturas em plantio direto no cerrado. Brasília, DF: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2025, 113 p. Dissertação de Mestrado.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: DOUGLAS RODRIGUES DE JESUS

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: FLUXO DE N₂O E CARBONO DO SOLO COM MANEJO DE FERTILIZANTE NITROGENADO EM UMA SUCESSÃO DE MILHO/SOJA E PLANTAS DE COBERTURA NO CERRADO

GRAU: MESTRE **ANO:** 2025

É concedida à Universidade de Brasília de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado para única e exclusivamente propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais, de publicação. Nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada à fonte.

Nome: Douglas Rodrigues de Jesus

Matrícula: 231106065 e E-mail: douglas.jesus@aluno.unb.br

DEDICATÓRIA

*A Deus, ao meus pais, irmã, sobrinhos
e a todos os meus professores e amigos
de coração, com muito amor e carinho.*

EPÍGRAFE

*Além de um ato de conhecimento,
a educação é também um ato político.*

Paulo Freire (1986)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha profunda gratidão a Deus, fonte suprema de toda ciência e sabedoria. Agradeço de maneira especial aos meus pais, Teresa Rodrigues de Sousa e Edmilson Francisco de Jesus, pela base sólida e pelo constante apoio, que foram fundamentais ao longo de toda minha trajetória. Agradeço também a minha irmã Graciele Rodrigues de Jesus e aos meus primos em especial a Ana Luiza Rodrigues de Jesus Brandão, Warley da Silva Sousa e Juliana Virginio dos Santos.

Minha sincera gratidão se estende às minhas orientadoras: à Prof^a. Dr^a Maria Lucrécia Gerosa Ramos, cuja orientação foi imprescindível, e à minha co-orientadora, Pesq^a. Dr^a Arminda Moreira de Carvalho, pessoa pela qual tenho imensa admiração. Agradeço também à Dr^a. Fabiana Piontekowski Ribeiro e à Dr^a Raíssa de Araújo Dantas pelas orientações complementares e pela contribuição indispensável.

Sou profundamente grato à equipe “AgroPós”, formada pela Doutoranda Thais Rodrigues de Sousa, pela Ms^a Ana Caroline Pereira da Fonseca e pela Mestranda Fernanda Rodrigues da Costa Silva, onde estudamos juntos e adquirimos conhecimento nesses últimos dois anos. Sem o apoio, a ajuda e o trabalho em grupo de vocês, seria impossível alcançar os resultados obtidos.

Meus agradecimentos se estendem ao Dr. Gustavo Cassiano da Silva e Pesq. Dr. Robélío Leandro Marchão, por suas valiosas contribuições.

Em especial, agradeço às bolsistas da Embrapa Cerrados, Heloisa Carvalho Ribeiro e Rayane Silvino Marciel, pela dedicação, prestatividade e solidariedade, bem como aos demais bolsistas Ikaroh Alves de Barros, Larissa Rodrigues Oliveira, Alex Alves da Cruz, Isabela Magalhães e Alan Cordeiro de Brito, pela ajuda na coleta e na preparação das amostras. Agradeço também a Priscila Brelaz da Silva por toda a ajuda na preparação das amostras.

Agradeço Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES). À empresa brasileira de pesquisa agropecuária (Embrapa Cerrados) pelas condições oferecidas, que permitiram a disponibilização da infraestrutura necessária para a realização deste trabalho, assim como a todos os seus colaboradores. Em especial, expresso minha gratidão à equipe de técnicos e analistas: Francisco Delvico, Josias, Juaci, Vlayrton, Aline, Natalia e Orlando, que me auxiliaram no campo e no laboratório, oferecendo todo o suporte necessário para o desenvolvimento desta pesquisa. Agradeço também a todos os funcionários que contribuíram, direta ou indiretamente.

Aos professores da Universidade de Brasília (UnB), em especial ao Dr. Luiz Felipe Salem, ao Dr. Alcides Gatto e à Dr^a. Michelle Souza Vilela e novamente à Dr^a. Fabiana Piontekowski Ribeiro, minha eterna gratidão pelo vasto conhecimento transmitido ao longo da minha trajetória acadêmica, o que foi essencial para meu crescimento.

Por fim, expresso minha gratidão à banca de defesa pelas valiosas sugestões e considerações, que, sem dúvida, contribuirão para o aprimoramento deste trabalho.

Muito Obrigado!

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ilustração de alternativas para aumentar o armazenamento de carbono no solo e reduzir as emissões de óxido nitroso para culturas de milho e soja através da diversificação dos sistemas agrícolas no Cerrado brasileiro.	26
Figura 2. Resumo do processo de desnitrificação para gerar N_2O no solo. Fonte: Embrapa (2017).	30
Figura 3. Mapa de localização da área experimental na Embrapa Cerrados, em Planaltina, DF, Brasil.	50
Figura 4. Precipitação (mm) e temperatura média do ar ($^{\circ}C$) de novembro de 2015 a novembro de 2016, Planaltina, Distrito Federal, Brasil.	51
Figura 5. Modelo de câmaras estáticas e sequência utilizada para realização das coletas de N_2O do solo: (1) tratamento; (2) bases inseridas no campo; (3) câmaras estáticas; (4) bomba de vácuo; (5) vials; (6) coleta do N_2O e (7) Leitura no Cromatógrafo Gasoso. .	53
Figura 6. Etapas para realização das coletas e extração do sobrenadante do solo. (1) amostragem de solo com o trado holandês; (2) homogeneização e transporte; (3) pesagem solo úmido e seco pós estufa, para o espaço poroso preenchido por água; (4) SNAP CAPS com 50 ml de solução a base de cloreto de potássio (KCL); (5) solução de KCL mais 15g de solo; (6) análise final no Analisador de Fluxo de Injeção (FIA).	55
Figura 7. Fluxos de N_2O em cultivo de milho em sucessão à plantas de coberturas, sem aplicação de N em cobertura no milho (a) com aplicação de N em cobertura no milho (b). As setas pretas indicam aplicação de N em cobertura no solo via fertilizantes nas datas: 14/12/2015, 05/01/2016. A seta verde indica o corte da <i>Raphanus sativus</i>	58
Figura 8. Concentrações de nitrato (NO_3^-) sem aplicação de N em cobertura no milho (a) com aplicação de N em cobertura no milho (b); e amônio (NH_4^+) sem aplicação de N em cobertura no milho (c) com aplicação de N em cobertura no milho (d). As setas pretas indicam aplicação de N em cobertura no solo via fertilizantes nas datas: 14/12/2015, 05/01/2016. A seta verde indica o corte da <i>Raphanus sativus</i>	61
Figura 9. Espaço poroso preenchido por água (EPPA) sem aplicação de N (a) com aplicação de N (b); temperatura média do solo sem aplicação de N (c) com aplicação de N (d); em cultivo de milho em sucessão à plantas de cobertura e cerrado nativo. A seta verde indica o corte da <i>Raphanus sativus</i>	62
Figura 10. Análise de componentes principais relacionadas das variáveis ambientais relacionadas ao N_2O , sem N em cobertura no milho (a) e com N em cobertura no milho (b) em sucessão às plantas de cobertura e cerrado, Planaltina, DF, Brasil.	63
Figura 11. Síntese das emissões de óxido nitroso em terras agrícolas fertilizadas globais a partir de fatores de emissão específicos da cultura (Wang <i>et al.</i> , 2022). Adaptação com alguns estudos para o Brasil (1) = presente estudo; (2) (Campanha <i>et al.</i> , 2019; (3) Canisares <i>et al.</i> , 2021).	68
Figura 12. Mapa de Localização da área experimental na Embrapa Cerrados, em Planaltina, DF, Brasil.	82
Figura 13. Densidade do solo em $g\ cm^{-3}$ (a) e Carbono total do solo $g\ kg^{-1}$ (b) coletados em Cerrado Nativo.	89
Figura 14. Teores de carbono solo ($g\ kg^{-1}$) em áreas de Plantas de Cobertura em sucessão a milho-soja, no Cerrado. Os asteriscos (*) indicam diferenças estatísticas ao nível de 5% pelo teste de Tukey.	89
Figura 15. Análise de componentes principais relacionadas, estoque de Carbono, frações da matéria orgânica nas solo substâncias húmicas (Ácido Fúlvico (AF); Ácido Húmico (AH) e Humina (HUM)), Biomassa e produtividade. A figura (a) Círculo de autovetores	

das variáveis, figura (b) correlação entre os tratamentos com e sem a aplicação de N-fertilizante e figura (c) mostra a correlação com as culturas para o ano de 2024. 95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Média e desvio padrão ($\pm$) de N_2O acumulado em $kg\ ha^{-1}$ do milho (safra), cultivado após as plantas de cobertura (safrinha) e Entressafra (resíduos das plantas) com e sem aplicação de N-fertilizante em sistema plantio direto no Cerrado.	59
Tabela 2. Média e desvio padrão ($\pm$) da produtividade do milho, índice de emissão N_2O por produtividade em diferentes tratamentos.	64
Tabela 3. Média e desvio padrão ($\pm$) da eficiência do uso de fertilizantes nitrogenados e do fator de emissão de N_2O em diferentes tratamentos.	64
Tabela 4. Atributos químicos do solo da área experimental dos diferentes sistemas com o uso de Plantas de cobertura em sucessão ao milho/soja.	82
Tabela 5. Descrição da sequência de cultivos na área experimental conforme os anos agrícolas.	83
Tabela 6. Média e desvio padrão ($\pm$) dos estoques de carbono no solo ($Mg\ ha^{-1}$) em 0-100 cm	90
Tabela 7. Média e desvio padrão ($\pm$) das frações de carbono em diferentes camadas do solo (0-10, 10-20 e 20-40 cm de profundidade). Ácido Fúlvico (AF); Ácido Húmico (AH) e Humina (HUM) em $g\ kg^{-1}$	91
Tabela 8. Média e desvio padrão ($\pm$) do delta carbono (ΔC) até 100 cm em 2013, 2018, e 2024.	92
Tabela 9. Média e desvio padrão ($\pm$) da produtividade do milho e da soja em sucessão as Plantas de Cobertura nos anos de 2013, 2018 e 2024 no Cerrado.	93
Tabela 10. Média e desvio padrão ($\pm$) da produção de matéria seca das Plantas de Cobertura nos anos de 2012, 2017 e 2023.	94

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

%	Porcentagem
ACP	Análise de componentes principais
C3	fotorrespiração plantas C3
C	Carbono
Ca	Cálcio
CN	Com Nitrogênio
AH	Ácido húmico
C/N	Carbono/Nitrogênio
CO ₂	Dióxido de carbono
CONAB	A Companhia Nacional de Abastecimento
COP	Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas
COT	Carbono orgânico total
CPAC	Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados
DAE	Dias após a emergência
DF	Distrito Federal
Dap	Densidade aparente
DAE	Dias após a emergência
EA	Eficiência agronômica
EUFN	Eficiência de uso do fertilizante nitrogenado
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPPA	Espaço poroso preenchido por água
eq	Equivalente
FE	Fator de Emissão
FBN	Fixação biológica de nitrogênio
FDN	Fibra em detergente neutro
AF	Ácido fúvico
P	Fósforo
g	Gramas
GEE	Gás de efeito estufa
h	Hora
H ₂ O	Água

ha	hectare
HUM	Humina
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
K	Potássio
KCL	Cloreto de potássio
Mg	Magnésio
MS	Matéria seca
mm	Milímetros
MO	molibdênio
MOS	Matéria orgânica do solo
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
Mg	Magagramas
mt	Milhões de toneladas
NaOH	Hidróxido de sódio
N	Nitrogênio
NPK	Nitrogênio, fósforo e potássio
N ₂ O	Óxido Nitroso
MNO _r	Nitrogênio orgânico
NO	Óxido nítrico
N ₂	Nitrogênio
NH ₄ ⁺	Amônia
NO ₃ ⁻	Nitrato
P ₂ O ₅	Superfosfato simples
P	Fósforo
pH	potencial hidrogeniônico
PCs	Plantas de cobertura
ppm	Partes por milhão
SN	Sem Nitrogênio
SPD	Sistema Plantio direto
S	Enxofre

RESUMO GERAL

JESUS, Douglas Rodrigues de. Fluxo de N₂O e carbono do solo com manejo de fertilizante nitrogenado em uma sucessão de milho/soja e Plantas de Cobertura no cerrado 2025. 112, p. Dissertação (Mestrado em Agronomia- Produção Sustentável) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.

Diante do desafio duplo de neutralidade de carbono (C) e mitigar as emissões de gases de efeito estufa (GEE), o uso de plantas de cobertura (PCs) e a rotação de culturas são estratégias eficazes para aumentar os níveis de nitrogênio (N) do solo, para o sucesso do sistema plantio direto (SPD). O objetivo do trabalho foi avaliar o efeito do uso de PCs na safrinha na rotação milho/soja nos estoques de C do solo, na eficiência de uso do N-fertilizante e nas emissões de óxido nitroso (N₂O), com e sem aplicação de N em cobertura na cultura do milho. O experimento foi realizado na região do Cerrado, com parcelas constituídas por diferentes PCs. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com parcelas subdivididas e três repetições. As parcelas foram as PCs (*Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea*, *Raphanus sativus* e *Mucuna aterrima*) e as subparcelas representadas pelos manejos do fertilizante nitrogenado (com e sem N-fertilizante em cobertura) para a cultura do milho. As emissões de N₂O no solo foram medidas no período de novembro de 2015 a outubro de 2016, utilizando-se o método de câmaras estáticas, sendo a concentração de N₂O analisada por cromatografia gasosa. As análises do C do solo foram realizadas utilizando um analisador elementar (CHNS). As amostras do solo para determinação dos estoques de C foram coletadas em 2013 na sucessão milho e PCs e no Cerrado nativo, em 2018 na sucessão milho e PCs e em 2024 na sucessão soja e PCs. As amostras foram feitas para todos os tratamentos das PCs (2013, 2018 e 2024) e com e sem N em cobertura no milho (2018 e 2024), nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm. Houve efeito das doses de N, e entre tratamentos quanto às emissões de N₂O para o período do milho com exceção da *Crotalaria juncea*. Os fluxos acumulados de N₂O durante o período de avaliação ano agrícola, como entressafra com cobertura viva (PCs) e morta (pousio) foram $\leq 2,95 \text{ kg ha}^{-1}$. Foi observada uma correlação entre os fluxos de N₂O e as seguintes co-variáveis: temperatura do solo, espaço poroso preenchido por água (EPPA) e N-mineral. No geral, as parcelas de milho fertilizado e não fertilizado com N apresentaram emissões de N₂O em escala de rendimento se diferiu entre as doses para a *Mucuna aterrima* com aplicação de N-fertilizante. Ao comparar os estoques de C do solo entre anos, 2018 obteve-se as maiores médias ($p < 0,05$) em relação aos demais anos. Em 2024 esse estoque foi superior a 2013. Os teores das frações químicas da matéria orgânica do solo (MOS) foram influenciados pela fertilização nitrogenada em cobertura do milho nas diferentes profundidades. Os teores de ácido fúlvico foram superiores nas parcelas sem N em cobertura no milho, nas profundidades de 0-10 e 20-40 cm enquanto HA foi superior nas parcelas com N em cobertura nas camadas 10-20 e 20-40 cm. Os resultados do presente estudo oferecem informações importantes para estratégias de manejo agrícola de longo prazo que visam o aumento da produtividade, armazenamento de C no solo e a redução das emissões GEE, contribuindo para minimizar os efeitos das mudanças climáticas.

Palavras-chave: *Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea*, *Mucuna aterrima*, *Raphanus sativus*, mudanças climáticas, efeito estufa.

GENERAL SUMMARY

JESUS, Douglas Rodrigues de. N₂O Flux and soil carbon with nitrogen fertilizer management in a maize/soybean succession and cover crops in the cerrado. 2025. 112, p. Dissertation (Master's Degree in Agronomy - Sustainable Production) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.

Faced with the dual challenge of carbon (C) neutrality and mitigating greenhouse gas (GHG) emissions, the use of cover crops (CCs) and crop rotation are effective strategies for increasing soil nitrogen (N) levels, contributing to the success of the no-till system (NTS). The aim of this study was to evaluate the effect of using CCs during the off-season in the maize/soybean rotation on soil C stocks, N-fertilizer use efficiency, and nitrous oxide (N₂O) emissions, with and without the application of top-dressed N to the maize crop. The experiment was carried out in the Cerrado region, with plots consisting of different CCs. The experimental design was randomized blocks, with split plots and three replications. The main plots consisted of CCs (*Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea*, *Raphanus sativus*, and *Mucuna aterrima*), and the subplots represented nitrogen fertilizer management (with and without top-dressed N fertilizer) for the maize crop. Soil N₂O emissions were measured from November 2015 to October 2016 using the static chamber method, and N₂O concentrations were analyzed using gas chromatography. Soil C analysis was carried out using an elemental analyzer (CHNS). Soil samples for determining C stocks were collected in 2013 (maize and CC succession and native Cerrado), in 2018 (maize and CC succession), and in 2024 (soybean and CC succession). Samples were taken for all CC treatments (2013, 2018, and 2024), with and without N topdressing in maize (2018 and 2024), at depths of 0–5, 5–10, 10–20, 20–40, 40–60, 60–80, and 80–100 cm. There was an effect of N application and treatment type on N₂O emissions during the maize growing season, except for *Crotalaria juncea*. The cumulative N₂O fluxes during the evaluation period of the agricultural year, under both live cover (CCs) and dead cover (fallow), were $\leq 2.95 \text{ kg ha}^{-1}$. A correlation was observed between N₂O fluxes and the following covariates: soil temperature, pore space filled with water (PSFW), and mineral N. Overall, maize plots with and without N fertilization showed differences in N₂O emissions at the yield scale, with variations observed between treatments, particularly for *Mucuna aterrima* under N-fertilized conditions. When comparing soil C stocks across years, 2018 had the highest averages ($p < 0.05$) compared to the other years. In 2024, stocks were also higher than in 2013. The chemical fractions of soil organic matter (SOM) were influenced by nitrogen fertilization of maize at different depths. Fulvic acid content was higher in the plots without N fertilization at the 0–10 and 20–40 cm depths, while humic acid (HA) content was higher in the N-fertilized plots at the 10–20 and 20–40 cm layers. The results of this study provide important insights for long-term agricultural management strategies aimed at increasing productivity, enhancing soil C sequestration, and reducing GHG emissions, thereby contributing to climate change mitigation.

Palavras-chave: *Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea*, *Mucuna aterrima*, *Raphanus sativus*, climate change, greenhouse effect.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	19
2. HIPÓTESE.....	20
3. JUSTIFICATIVA	21
4. OBJETIVOS	21
4.1 Objetivo geral	21
4.2 Objetivos específicos.....	21
5. REVISÃO DE LITERATURA.....	21
5.1 Sistema plantio direto e uso de plantas de cobertura (PCs).....	21
5.1.3 Mucuna-preta (<i>Mucuna aterrima</i>)	23
5.1.4 Nabo-forrageiro (<i>Raphanus sativus</i>)	23
5.1.2 Guandu (<i>Cajanus cajan</i>).....	24
5.1.1 Crotalaria-juncea (<i>Crotalaria juncea</i>).....	25
5.2 Fornecimento de nitrogênio e estoques de carbono no solo.....	26
5.3 Sistemas conservacionistas e emissão de gases de efeito estufa (GEE).....	28
6. REFERÊNCIAS	31
CAPÍTULO 1	45
FLUXOS DE N₂O NO SOLO EM SUCESSÃO MILHO-PLANTAS EM RESPOSTA A MANEJO DE FERTILIZANTES NIROGENADOS NO CERRADO	45
RESUMO.....	46
ABSTRACT	47
1. INTRODUÇÃO	48
2 MATERIAL E MÉTODOS	50
2.1 Descrição da área experimental.....	50
2.2 Histórico, delineamento e manejo do experimento	51
2.3 Amostragem e análises dos fluxos de N ₂ O no solo	52
2.4 N-Mineral (NO ₃ ⁻ e NH ₄ ⁺) e espaço poroso preenchido por água (EPPA).....	54
2.6 Emissões de N ₂ O em escala do rendimento e fator de emissão	56
2.7 Análise estatística	57
3. RESULTADOS	57
3.1 Fluxos diários e emissão acumulada de N ₂ O	57
3.2 Variáveis edafoclimáticas e interação com emissão de N ₂ O.....	60

3.3 Produtividade do milho, emissões de N ₂ O em escala do rendimento, eficiência do uso de fertilizantes nitrogenado (EUFN) e fator de emissões (FE).	63
4. DISCUSSÃO	64
4.1 Efeito das plantas de cobertura e adubação nitrogenada em cobertura no milho nas emissões de N ₂ O	64
4.2. Emissões acumuladas de N ₂ O	66
4.3. Emissões de N ₂ O em escala de rendimento, eficiência de N e fator de emissão de N ₂ O	67
5. CONCLUSÃO	69
6. REFERÊNCIAS	69
CAPÍTULO 2	77
ESTOQUES DE CARBONO E FRAÇÕES DA MATERIA ORGÂNICA DO SOLO EM SISTEMA MILHO/SOJA EM SUCESSÃO ÀS PLANTAS DE COBERTURA COM MANEJO DE N-FERTILIZANTE	77
RESUMO	78
ABSTRACT	79
1. INTRODUÇÃO	80
2. MATERIAL E MÉTODOS	81
2.1. Localização e características da área experimental	81
2.2. Histórico, delineamento e práticas de manejo do experimento	83
2.3 Amostragem e análises de solo	83
2.4 Determinação do carbono total e cálculo do estoque de carbono	84
2.5 Fracionamento químico da matéria orgânica (Substâncias húmicas)	85
2.6 Produtividade do milho e soja	86
2.7 Biomassa das plantas de cobertura	87
2.8 Análises estatísticas	87
3. RESULTADOS	88
3.1 Densidade do solo, teores de C estoques de carbono total e frações da matéria orgânica do solo	88
3.2 Variações dos estoques de C (ΔC)	91
3.3 Produtividade das culturas (milho e soja)	92
3.4 Produção de matéria seca (MS) das PCs	93
3.5 Relação entre estoque de carbono e frações húmicas com a produtividade da soja e MS das PCs	94
4. DISCUSSÃO	96

4.1 Densidade do solo, teores e estoques de Carbono do solo	96
4.2 Delta Carbono (ΔC) do solo	97
4.3 Frações da matéria orgânica do solo (substâncias húmicas)	99
4.4 Produtividade e biomassa das plantas de cobertura.....	100
4.5 Interações entre as variáveis analisadas.....	100
5. CONCLUSÃO.....	101
6. REFERÊNCIAS	101
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	113

1. INTRODUÇÃO GERAL

A comunidade científica global busca estratégias de desenvolvimento sustentável, agricultura regenerativa e proteção dos recursos naturais (CF, 2015). Recentemente na 6ª conferência sobre Mudanças Climáticas (COP 26), houve várias estimativas sobre o impacto das novas “Contribuição Nacionalmente Determinada NDC” (Nationally Determined Contribution – NDC) e os compromissos com emissão líquida neutra de gases de efeito estufa (GEE), que se totalmente implementados limitará o aquecimento global entre 1,8°C e 2,4°C até 2100. Porém, não se atingiu nem a meta de limitar o aquecimento a 1,5°C até o momento (Lennan; Morgera, 2022).

Em 2016, o governo brasileiro se comprometeu, por meio da sua NDC em reduzir as emissões de GEE em 48% até 2030 (Brasil, 2016). Na COP 26, apresentou planos ainda mais ambiciosos, das reduções de 48% para 50% das emissões de GEE's até 2030, principalmente, comprometendo-se a reduzir o desmatamento e zerar a derrubada ilegal das matas nativas até o ano de 2028 (Hunter *et al.*, 2021; BRASIL, 2022).

A compreensão da complexa relação entre a mudança no uso da terra e os estoques de carbono (C) no solo torna-se fundamental para a implementação eficaz de práticas agrícolas com baixas emissões de C (Carvalho *et al.*, 2024). Em áreas de cultivos anuais, a adoção do sistema plantio direto (SPD), que tem como um de seus pilares a rotação de culturas e o uso de plantas de cobertura (PCs), enquadra-se como uma das estratégias de manejo para promover o aumento do C orgânico do solo e, consequentemente, mitigar as emissões de GEE (Rigon *et al.*, 2021; Carvalho *et al.*, 2023, Oliveira *et al.*, 2023).

Nesse contexto, o Cerrado, é uma ecorregião de savana com 204 milhões de hectares, e é o segundo maior bioma do país em biodiversidade (Nóbrega *et al.*, 2018). Este bioma concentra a maior área de produção de alimentos (Bonanomi *et al.*, 2019; Vieira *et al.*, 2020; de Carvalho *et al.*, 2023), representa assim a principal fronteira agrícola do país (Teixeira; Fonseca, 2022), e merece atenção especial no que se refere às medidas de descarbonização acordadas. Apesar de possuir solos naturalmente pobres em nutrientes disponíveis, o Cerrado possui características geográficas, principalmente as relacionadas ao relevo, que justificam sua importância na produção, distribuição e comercialização de commodities agrícolas (Lima; Persson, 2020; Mendonça *et al.*, 2020), como o milho e a soja.

As culturas do milho e soja são de grande relevância para a economia brasileira e o Brasil é o segundo maior exportador de alimentos do mundo (George *et al.*, 2019; Vieira

et al., 2020). Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a soja é a maior cultura de exportação, e o milho é a terceira maior *commodity* exportada. Estima-se uma safra para 2024/25 de 169.487,9 milhões de toneladas para a soja e 131.973,7 milhões de toneladas para milho, com destaque pela elevada rentabilidade e liquidez (CONAB, 2025).

O aumento do rendimento dessas principais culturas em sistemas conservacionistas como o SPD com uso de PCs, que apresenta aumento no retorno dos resíduos ao solo e mineralização do nitrogênio (N) da palhada, promove o acúmulo de C no solo e contribuem para mitigar GEE, principalmente, N₂O (Canisares *et al.*, 2021). As PCs representam uma prática agronômica que desempenha um papel importante na qualidade do solo, na melhora das propriedades físicas, químicas e biológicas (Abdalla *et al.*, 2019; Adetunji *et al.*, 2020, Carvalho *et al.*, 2024).

A introdução de PCs em sistemas agrícolas contribui com a redução das emissões de GEE devido ao aumento do armazenamento de C do solo e à diminuição das emissões indiretas de N₂O por lixiviação, reduzindo o teor de nitrato (NO₃⁻) no solo (Carvalho *et al.*, 2024), principal substrato para a desnitrificação (Basche *et al.*, 2014; Abdalla *et al.*, 2019). Os sistemas de cultivo intensivos com revolvimento do solo e baixo input de nutrientes, que apresentam, como consequência, baixas produtividades de biomassa, acarretam rápida depleção do estoque de C, consumindo as reservas do solo e potencializam as emissões de GEE (Roohi *et al.*, 2022; de Sá *et al.*, 2025).

O SPD associado ao uso de PCs também promove um aumento na ciclagem de nutrientes, principalmente N, reduzindo a dependência dos fertilizantes nitrogenados (De Carvalho *et al.*, 2024) e, consequentemente, pode mitigar emissões de N₂O (De Oliveira *et al.*, 2023). Diante dos dois cenários apresentados, reforça-se a importância de investigações futuras voltadas à quantificação do impacto do aumento do estoque de C orgânico e sua relação com as emissões de GEE em solos sob sistemas de rotação de culturas e com uso de PCs.

2. HIPÓTESE

- A transição de milho/soja com uso de PCs e manejo do N altera os estoques de C do solo, e fluxos de N₂O em SPD.

3. JUSTIFICATIVA

- O manejo do solo com sistema de transição milho/soja em SPD em sucessão PCs na entressafra (cobertura viva ou monta) representa uma estratégia adotada para mitigar as emissões de GEE e armazenar C no solo, com redução da necessidade de aplicação de fertilizantes nitrogenados na cultura do milho.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo geral

Avaliar o efeito da transição milho/soja com uso das plantas de cobertura em SPD nas emissões de óxido nitroso e nos estoques de carbono do solo, além da eficiência do fertilizante nitrogenado com e sem aplicação de N em cobertura na cultura de milho.

4.2 Objetivos específicos

- Avaliar as emissões de óxido nitroso em sistema milho/PCs, com e sem aplicação de N-fertilizante em cobertura no milho.
- Avaliar os estoques de C no solo no período de 10 anos em um sistema de transição milho/soja com uso de plantas de cobertura em sucessão às culturas.
- Avaliar a eficiência de uso do N-fertilizante pelo milho em sistema milho/PCs e o efeito residual na soja/PCs.

5. REVISÃO DE LITERATURA

5.1 Sistema plantio direto e uso de plantas de cobertura (PCs)

O sistema plantio direto (SPD) desde que desenvolvido com os pilares de sua sustentabilidade (Sá *et al.*, 2025), onde a rotação de culturas e uso de PCs representa uma alternativa fundamental para agricultura regenerativa (Gawęda; Haliniarz, 2021). As PCs que são espécies vegetais cultivadas em sucessão, rotação ou em consórcio com as culturas comerciais, com objetivo de buscar a proteção da superfície do solo, bem como a manutenção e a melhoria das propriedades físico-hídricas, químicas e biológicas do solo, em todo seu perfil.

Nesse contexto, partes das plantas utilizadas podem ser aplicadas para outros fins, como na produção de sementes, fibras e na alimentação animal (Carvalho *et al.*, 2024). Essa prática evita períodos de solo descoberto, reduzindo o risco de erosão e perdas de nutrientes por lixiviação, principalmente de N, o qual também pode ter sua emissão na forma de N₂O, que é um GEE com o potencial de aquecimento de 298 vezes maior do que o do dióxido de C (CO₂) em um horizonte de 100 anos (Abdalla *et al.*, 2019).

As PCs da família Leguminosae, tem um papel importante na fixação biológica de N₂ (FBN), enriquecendo o solo com esse nutriente biologicamente e reduzindo sua necessidade externa por meio dos fertilizantes nitrogenados (Silva *et al.*, 2021; Mottin *et al.*, 2022; Sabóia *et al.*, 2022; Carvalho *et al.*, 2024). A FBN inicia-se com a quebra da ligação tripla da molécula de N₂ do ar atmosférico, que possui cerca de 78% de N em sua concentração, pelos microrganismos (*Rhizobium* sp) fixadores de N₂ através da enzima nitrogenase, transformando N₂ em amônio e aminoácidos dentro dos nódulos (Dias, 2020; Hungria *et al.*, 2001).

Diferente das leguminosas, as PCs da família das gramíneas, com seu extenso sistema radicular, contribuem para prevenir a erosão do solo (Sari *et al.*, 2013). Solos desprotegidos são suscetíveis à erosão, o que resulta no desprendimento de partículas, que devido à energia cinética das precipitações ou irrigações causa a perda de solo e nutrientes, conseqüentemente, a sedimentação nos recursos hídricos (Passos *et al.*, 2018). Por isso, manter o solo coberto é importante para reduzir os processos erosivos e compactação (Cherubin *et al.*, 2024).

Portanto, sistemas de cultivos diversificados melhoram as propriedades físicas, química e biológicas do solo, principalmente, a matéria orgânica do solo (MOS) (Babu *et al.*, 2023). A diversificação de cultivos com PCs, como crotalárias, mucuna, guandu, milheto, braquiária, entre outras, e com adoção da rotação de culturas, pode melhorar o sistema produtivo e aumentar o sucesso do SPD (Cherubin *et al.*, 2024). Essa prática em SPD com uso de PCs e rotação de culturas, além de melhorar a qualidade do solo, aumenta a resiliência dos sistemas agrícolas por meio, principalmente, de uma ciclagem de nutrientes mais eficiente (Wolschick *et al.*, 2016). Além disso, a substituição de monoculturas por SPD com rotação e uso de PCs proporciona incrementos nos rendimentos do sistema agrícola (Rambo *et al.*, 2021; Roohi *et al.*, 2022).

As perdas do N podem atingir de 12% a 50% do N aplicado na forma de ureia dependendo da forma de aplicação (Trivelin *et al.*, 2002) e representam não apenas

prejuízo econômico para o produtor, mas também impactos ambientais negativos, como aumento das emissões de GEE e contaminação de recursos hídricos.

Em geral, as interações solo-planta estão inteiramente relacionadas à ciclagem de nutrientes, que são importantes para aumentar a disponibilidade dos mesmos e aumentar a eficiência do N no solo (de Albuquerque *et al.*, 2013). A implementação de PCs também contribui para a redução da densidade do solo, melhorar a infiltração de água, consequentemente, contribui para sustentabilidade do agroecossistema ao garantir condições adequadas ao desenvolvimento das culturas (Pacheco *et al.*, 2017).

5.1.3 Mucuna-preta (*Mucuna aterrima*)

A mucuna-preta (*Mucuna aterrima*) é originária da África pertencente à família Fabaceae e destaca-se como uma planta anual de ciclo longo com o florescimento entre 140 à 180 dias, adaptada a climas tropicais e subtropicais. Possui a habilidade de recuperar solos degradados (de Oliveira *et al.*, 2017), e, além de ser uma planta com baixa demanda nutricional, pode suprimir e/ou controlar plantas daninhas, pragas, doenças e nematoides (Cherubin *et al.*, 2024).

Essa espécie contribui com a recuperação da capacidade produtiva do solo, principalmente, pela sua capacidade de simbiose com bactérias fixadoras de N atmosférico dos gêneros *Rhizobium* e *Bradyrhizobium*. Possui alta capacidade de produção de biomassa, atingindo até 50 toneladas por hectare de massa verde (equivalente a 6 a 9 toneladas de massa seca), e a sua alta capacidade de fixação de N atmosférico é de 120 a 210 kg de N por hectare por ano (Carvalho *et al.*, 2006; Wutke *et al.*, 2007). Além do elevado potencial de fornecimento de N por meio da FBN, apresenta também a capacidade de extrair do solo, em média, 185 kg ha⁻¹ de N, 14 kg ha⁻¹ de P e 125 kg ha⁻¹ de K (Cherubin *et al.*, 2024).

5.1.4 Nabo-forrageiro (*Raphanus sativus*)

O nabo-forrageiro pertencente à família das Brassicaceae; é uma planta de cobertura com capacidade de descompactar o solo (Rambo *et al.*, 2021). É uma planta herbácea, anual, ereta, e pode atingir até 180 cm de altura, com o ciclo do florescimento entre 45 a 60 dias, com tolerância à geada e à seca, sendo empregada como planta de

cobertura de inverno nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste (Carvalho *et al.*, 2006; Lima; Lajús, 2021; Cherubin *et al.*, 2024).

Possui crescimento inicial rápido e boas características agronômicas, como resistência a pragas e doenças, embora não seja indicada para consumo humano devido à presença de ácido erúico nas sementes, mas destaca-se na produção de biodiesel. Além da quantidade de palha produzida, que pode chegar a 60 toneladas por hectare (Santos *et al.*, 2018), o nabo-forrageiro não só desempenha um papel significativo na produção de biocombustíveis, mas também se destaca pela sua habilidade de se desenvolver em solos de baixa fertilidade (Carvalho *et al.*, 2006).

Essa espécie possui papel importante na recuperação de solos degradados, por possuir sistema radicular tuberoso. Além disso, a presença do nabo-forrageiro não apenas contribui para uma maior retenção de H₂O no solo, mas também favorece a reestruturação do solo, promovendo a formação de agregados maiores e mais estáveis, semelhantes aos observados no Cerrado nativo (Silva *et al.*, 2016; Reis *et al.*, 2022).

5.1.2 Guandu (*Cajanus cajan*)

O guandu (*Cajanus cajan*) pertence à família Fabaceae e é cultivado geralmente no Nordeste brasileiro, resistente à seca e possui características que o tornam adaptável às condições edafoclimáticas de diversas ecorregiões. Esta espécie exótica é uma das leguminosas mais conhecidas no mundo (Nan *et al.*, 2009). Com o ciclo de florescimento entre 70 a 90 dias (Cherubin *et al.*, 2024), desempenha um papel crucial na FBN, com taxa de fixação de N de 1,38 kg ha⁻¹ dia⁻¹ (Carvalho *et al.*, 2006), proporciona, proteção ao solo devido à rápida produção de biomassa e contribui para a restauração da fertilidade dos solos (Pratibha *et al.*, 2015).

O *Cajanus cajan* destaca-se como uma planta amplamente utilizada devido aos seus benefícios como adubação verde (Carvalho *et al.*, 2006). Seu sistema radicular profundo e com raiz pivotante, contribui para absorção eficiente de H₂O e nutrientes do perfil do solo, até as camadas mais profundas e possui a capacidade de se desenvolver em regiões áridas e semiáridas durante períodos de baixa ou nula precipitação pluviométrica (Abebe, 2022). Além disso, o *Cajanus cajan* demonstra uma notável habilidade em aumentar a população de fungos micorrízicos arbusculares no solo, que são importantes

para a manutenção da saúde e fertilidade do solo (Moura *et al.*, 2022; Carvalho *et al.*, 2024).

No cultivo consorciado entre *Cajanus cajan* e milho, Guimarães *et al.*, (2017, 2019) observaram que não há prejuízos na produtividade do milho, cultivado em Latossolo Vermelho Escuro. O *Cajanus cajan* possui densidade em média de 300 mil plantas por hectare que resulta em maior produtividade, cultivado em sucessão ao milho (Cherubin *et al.*, 2024). Além dos benefícios ao solo, o *Cajanus cajan* também se destaca por seu duplo propósito, sendo utilizado tanto na alimentação humana quanto na alimentação animal (Santos, *et al.*, 2023).

5.1.1 Crotalaria-juncea (*Crotalaria juncea*)

A crotalaria-juncea (*Crotalaria juncea* L.) pertence à família das leguminosas (Fabaceae) e é uma planta arbustiva anual (Rawat; Saini, 2023), de crescimento acelerado e resistente à escassez hídrica, com alto potencial de produção de biomassa (Berriel *et al.*, 2020) e é cultivada em diferentes sistemas, desde consórcios até monocultivos para recuperação de áreas degradadas como em canaviais (Carvalho *et al.*, 2006; Parenti *et al.*, 2021).

O uso dessa planta de cobertura previne o desenvolvimento de plantas invasoras e nematoides (Meagher *et al.*, 2019), diminui a necessidade de aplicações de herbicida (de Souza *et al.*, 2023) e nematicidas (Carvalho *et al.*, 2006). A crotalaria é umas das espécies de PC mais cultivada, notadamente devido à maior facilidade de aquisição de sementes no comércio, com o ciclo até o florescimento 90 a 100 dias, além de destacar-se pela incorporação de N no solo, com potencial de extração de aproximadamente 375 kg ha de N, 42 kg ha de P e 196 kg ha de K, destaca-se na reciclagem de nutrientes no solo (Cherubin *et al.*, 2024).

O máximo acúmulo de matéria seca é atingido aos 135 dias após a emergência (DAE). Entretanto, o manejo ideal para essa espécie é recomendado até os 90 DAE, momento em que já ocorreu a produção de sementes viáveis (Barbosa *et al.*, 2020).

Seu alto aporte de biomassa e elevada capacidade de FBN, contribuem para incrementar N no solo pela sua mineralização, devido principalmente à associação simbiótica com as bactérias fixadoras de N₂ (Sadhukhan; Sarkar, 2016). Além disso, a baixa razão C/N utilizada em adubação verde ou cobertura vegetal (De Souza; Guimarães,

2013), promove a rápida decomposição dos resíduos vegetais e a subsequente liberação eficiente de nutrientes, especialmente o N, o que pode resultar em aumentos significativos na produtividade da cultura em subsequência (Berriel *et al.*, 2020; Carvalho *et al.*, 2024).

5.2 Fornecimento de nitrogênio e estoques de carbono no solo

A retirada de florestas nativas, impulsionada pela expansão de terras agrícolas, torna-se um problema ambiental global com grandes implicações para o ciclo terrestre do C (Carvalho *et al.*, 2023; Oliveira *et al.*, 2023; Reichenbach *et al.*, 2023). O Brasil destaca-se por possuir a maior área de floresta tropical e estoque de C do mundo (FAO, 2015). Nessas áreas, encontram-se os maiores estoques de C sendo de 0,05 a >200 Mg ha⁻¹, tanto na biomassa acima quanto abaixo do solo, incluindo-se o C orgânico do solo (Alkimim; Clarke, 2018). Além de possuírem os maiores estoques de C, os solos armazenam aproximadamente três vezes mais C do que a atmosfera (Ferreira *et al.*, 2016; Sanderman *et al.*, 2017).

O sistema terrestre possui mecanismos naturais de captura e armazenamento de CO₂, essenciais para manter o equilíbrio da sua concentração na atmosfera. Esses mecanismos incluem a fotossíntese nas plantas, que absorve e armazena grandes quantidades de C nos solos (Nunes, 2023). Em sistemas agrícolas a depleção de C e emissões de GEE pode ser reduzidas conforme o manejo adotado como demonstrado na Figura 1, sendo importante para o desenvolvimento de uma agricultura regenerativa na região do Cerrado.

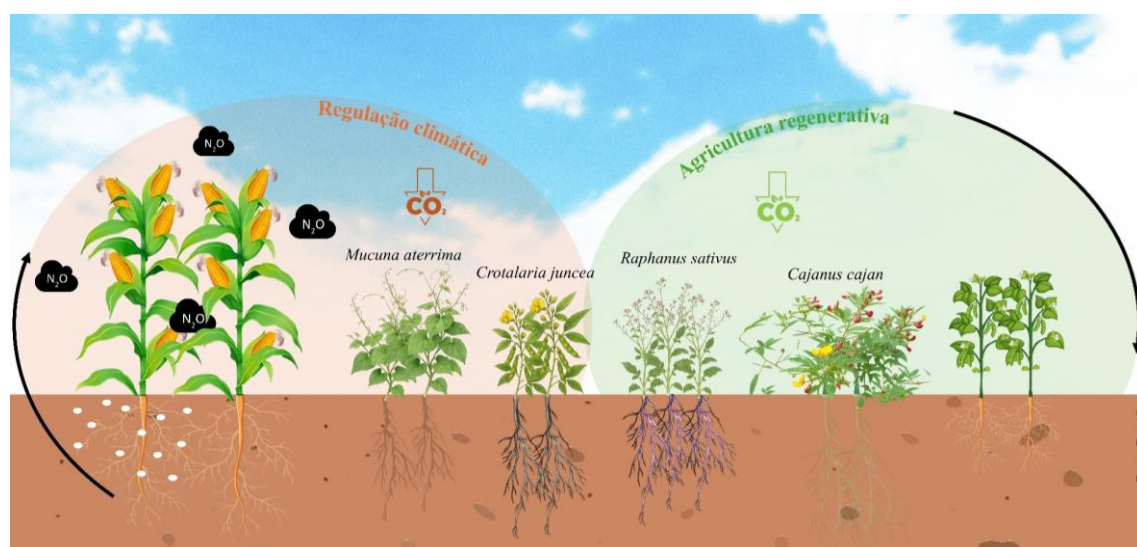


Figura 1. Ilustração de alternativas para aumentar o armazenamento de carbono no solo e reduzir as emissões de óxido nitroso para culturas de milho e soja através da diversificação dos sistemas agrícolas no Cerrado brasileiro.

Os solos são considerados como o maior reservatório terrestre de C (2500 PgC; 1 PgC = petagrama de C = 1 bilhão de toneladas métricas de C) em até 1 metro de profundidade (Eglington, *et al.*, 2021), no entanto, os estoques de C orgânico total (COT) são afetados pela temperatura e precipitação (LAL *et al.*, 2021). Pequenas mudanças no uso e manejo do solo promovem alterações nos estoques de C no solo (Six *et al.*, 2002; de Carvalho *et al.*, 2023; Oliveira *et al.*, 2023).

A matéria orgânica do solo (MOS) é composta por 58% de C e o acúmulo de C em formas mais estáveis está geralmente associado a uma maior estabilidade da MOS, sendo possível aumentar também a produtividade das culturas devido aos seus efeitos positivos na fertilidade e qualidade do solo (Plaza-Bonilla *et al.*, 2014). Os estoques de C no Cerrado apresentam ampla variação, influenciada por diferentes práticas e uso agrícolas (de Carvalho *et al.*, 2023).

Os valores de estoque de C podem variar de acordo com o tipo de uso, as formas de manejo e as variáveis edafoclimáticas. Por exemplo, em áreas de pastagens degradadas o valor pode ser de 72,3 Mg ha⁻¹ (Oliveira *et al.*, 2016); em 15 anos de cultivo sequencial de soja e algodão a 103,3 Mg ha⁻¹ (Briedis *et al.*, 2012); para sucessão de culturas com uso de milho, braquiária em integração-lavoura-pecuária-floresta (ILPF) a 119,64 Mg ha⁻¹ (de Abreu *et al.*, 2020). Além disso, em áreas sob cultivo de eucalipto os valores obtidos são de 325,31 Mg ha⁻¹ (Fialho *et al.*, 2019), e em áreas de sucessão de culturas e uso de PCs *Urochloa ruziziensis*, *Canavalia brasiliensis*, *Cajanus cajan* e *Sorghum bicolor*, os estoques de C variam entre 120 e 110 Mg ha⁻¹, já para as áreas de vegetação nativa em Cerrado (198,84 Mg C ha⁻¹), observou-se uma redução nos estoques de C do solo após o desmatamento e a conversão para área agrícola (de Carvalho *et al.*, 2021).

No entanto, as práticas agrícolas implementadas no Cerrado ainda podem ser aprimoradas para favorecer a recuperação do C e o aumento dos níveis de C armazenado. Porém, até o momento, os manejos aplicados não foram suficientes para restaurar completamente os estoques originais de C do Cerrado Nativo (de Carvalho *et al.*, 2021; de Carvalho *et al.*, 2023).

Contudo, o aumento dos teores de C no solo tem sido associado ao incremento da produtividade das culturas, devido à mineralização da MOS resultante da maior quantidade de biomassa aportada e da relação entre C/N dos resíduos vegetais (Sun *et al.*, 2020; de Carvalho *et al.*, 2021). Uma parte significativa da MOS é composta por substâncias húmicas (SHs) (até 85%), microrganismos (5%) e raízes de plantas (10%)

(Schnitzer, 1978; Allen-King *et al.*, 2002; Schnitzer, 2011; Guimarães *et al.*, 2013; Ukalska-Jaruga *et al.*, 2021).

Após decomposição da MOS, as SHs são classificadas, de acordo com sua solubilidade diferencial em: ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH) e humina (HUM). O fracionamento da MOS permite avaliar o potencial de armazenamento de C do solo, favorecendo a melhoria da sua fertilidade e qualidade física e bioquímica ao longo do período de cultivo (Ribeiro *et al.*, 2022).

O armazenamento de C no solo está diretamente relacionado com aporte de N, principalmente, do N incorporado biologicamente (Carvalho *et al.*, 2024). A relação C/N da soja é significativamente inferior à do milho. Enquanto a palha de soja pode apresentar uma relação C/N abaixo de 20, a palha de milho pode apresentar valores superiores a 40 (Dutta *et al.*, 2021). O N desempenha um papel crucial no crescimento vegetal e microbiano, sendo o nutriente mais limitante para a produção e rendimento das plantas em diversas regiões do mundo (Noor, 2017; dos Santos *et al.*, 2016; Sum, *et al.*, 2021). Amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-) são as formas de N predominantemente absorvidas pelas plantas (Dias, 2016).

A adição de N (via fertilização) nas culturas pode não alterar os estoques de C do solo e a composição da MOS (Ma *et al.*, 2020; Luo *et al.*, 2022). Como resultado, a adição de N via fertilizantes pode acelerar a decomposição da MOS, que causa declínios no armazenamento de C no solo (Chen *et al.*, 2020).

Por outro lado, estudos realizados em áreas de clima tropical indicam que a fertilização com N em um experimento de longa duração (70 anos) pode não afetar significativamente as concentrações de C orgânico, sugerindo um potencial de saturação desses solos (Zhang *et al.*, 2021). No entanto, outro estudo de longa duração (30 anos) sob SPD e fertilização com N em rotação milho-soja, mostrou que a adição de N aumentou o armazenamento e a distribuição de C orgânico e N total, nas camadas do solo (0-25 cm). A combinação do aporte de biomassa, da adição de N e do não revolvimento de solo pelo SPD promovem maior armazenamento de C no solo (St. Luce *et al.*, 2022).

5.3 Sistemas conservacionistas e emissão de gases de efeito estufa (GEE)

O aumento das emissões de GEE tem um impacto significativo no aumento da temperatura média da Terra e nas mudanças climáticas globais (Artaxo, 2020; Nagy *et al.*, 2016). Aproximadamente, um terço de todas as emissões GEE são causadas pelas

ações antrópicas (Crippa *et al.*, 2021; IPCC, 2021). O Brasil é o sexto maior emissor de GEE do mundo (MCTI, 2023). O N_2O é um GEE com potencial de aquecimento global 298 vezes superior ao CO_2 e um gás de longa vida que se mantém na atmosfera por um período de 100 anos (Stocker, 2014), que contribui para a destruição da camada de ozônio na estratosfera (Lazcano *et al.*, 2021).

A decomposição de resíduos das culturas pode estimular a atividade microbiana e agregação do solo, que influencia as emissões de N_2O para a atmosfera (Martinez-Feria *et al.*, 2018). Os impactos do SPD nas emissões de GEE, como a ausência da perturbação e não revolvimento do solo aumenta a biomassa microbiana e C, principalmente, nas camadas mais superficiais do solo (Taylor *et al.*, 2024), onde forma um ambiente ideal para atividade dos microrganismos do solo.

Os processos do ciclo do N que podem resultar em liberação N_2O como a mineralização do N orgânico (MNO_r) ocorrem em várias etapas. A amonificação do N orgânico (NO_r) ocorre quando as formas de NO_r são transformadas para formas minerais, sendo o primeiro composto gerado neste processo a NH_4^+ e em seguida o NO_3^- . No solo, a amônia reage rapidamente com a H_2O , que forma íons amônio. Entretanto, em condições de pH elevado, a amônia torna-se predominante e pode ser volatilizada para a atmosfera (Vieira, 2017). Esta transformação é feita por bactérias, fungos e actinomicetos.

Inicialmente o processo de nitrificação ocorre no momento em que o NH_4^+ é submetido a oxidação, sendo o produto final desse processo o NO_3^- (Moreira; Siqueira, 2006). Esse processo ocorre em duas etapas: inicialmente, a oxidação de NH_4^+ para nitrito (NO_2^-) e, posteriormente, a oxidação do NO_2^- para NO_3^- , realizada por bactérias oxidantes de NO_2^- (Dias, 2016). A nitrificação é um processo que exige grande demanda por oxigênio, o que restringe sua ocorrência às camadas mais superficiais do solo, sendo mais prevalente em solos com menor teor de argila. As condições ideais para a nitrificação incluem temperaturas entre 25 e 30°C e um pH entre 6,6 e 8,0, especialmente para as bactérias nitrificantes (Dias, 2016).

O processo de desnitrificação (Figura 2) ocorre no momento que o NO_3^- , NO_2^- , óxido nítrico (NO) e N_2O , sucessivamente, são utilizados por microrganismos, em condições de baixa aeração e/ou aneerobiose, como aceptores finais de elétrons durante o processo respiratório produzindo gás N_2 ou N_2O . Ocorre então o retorno do N para a atmosfera por meio desse processo (Davidson *et al.*, 2000; Dias, 2016).

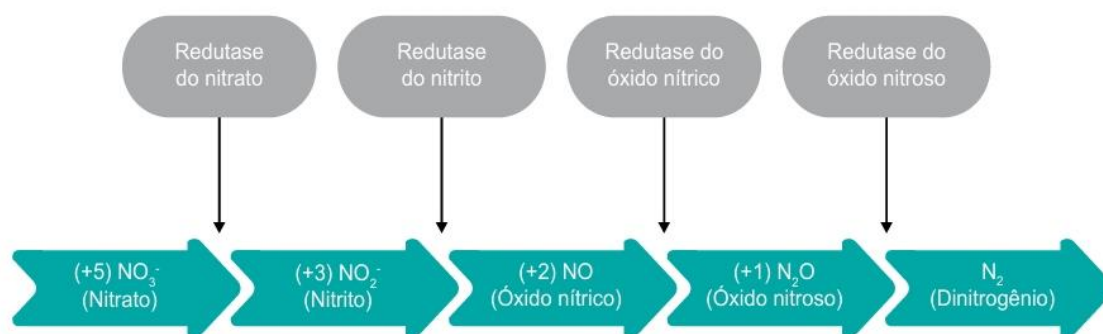


Figura 2. Resumo do processo de desnitrificação para gerar N_2O no solo. Fonte: Embrapa (2017).

Nos solos, alguns fatores denominados de covariáveis e variáveis edafoclimáticas, como: o elevado teor de H_2O , aeração expressa pelo espaço poroso preenchido por água (EPPA), temperatura do solo e acidez, resultam em pequenas taxas de nitrificação e até desnitrificação; uso de fertilizantes nitrogenados, que influencia na disponibilidade de N, preparo do solo, que interfere na aeração e excrementos animais, que são fontes de N e disponibilidade de C orgânico e favorecem a atividade microbiana influenciam significativamente as emissões de N_2O (Butterbach-Bahl *et al.*, 2013; de Oliveira *et al.*, 2023; da Silva *et al.*, 2024).

A atividade agrícola é a principal fonte de emissões antropogênicas de N_2O , liberado diretamente para a atmosfera em decorrência do excesso de N mineral nos solos (Beltran *et al.*, 2022) e condições edafoclimáticas favoráveis (de Oliveira *et al.*, 2023). Os fertilizantes sintéticos destacam-se como uma das principais fontes responsáveis por esse aumento nas emissões de N_2O nos sistemas agrícolas (Zhang *et al.*, 2023). Ademais, os picos de emissão de N_2O estão frequentemente relacionados a práticas de fertilização e irrigação (Lazcano *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2017; Campanha *et al.*, 2019; Carvalho *et al.*, 2021).

Estimativas indicam que, em 2018, os resíduos das culturas agrícolas foram responsáveis por aproximadamente 9,3% das emissões globais de N_2O provenientes da agricultura, que totaliza 0,71 Gt de N_2O (Fan *et al.*, 2021). A medição direta das emissões de N_2O do solo é um desafio devido à alta variabilidade espacial e temporal dos fluxos diários (Lazcano *et al.*, 2021), além de ser muito laboriosa. Ainda, o N, por ser um elemento altamente dinâmico, exige a coleta de dados adicionais como o teor de N-mineral (nitrato e amônio) para compreender plenamente os valores diários das emissões e outras co-variáveis, como temperatura do solo e do ar umidade e espaço de poros

preenchido pro água (EPPA) que é calculado com base na densidade (Ds) e umidade (de Carvalho *et al.*, 2022; de Oliveira *et al.*, 2023).

6. REFERÊNCIAS

ABDALLA, M. *et al.* A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 25, n. 8, p. 2530–2543, 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcb.14644>. Acesso em: 5 jul. 2024.

ABEBE, B. The Dietary Use of Pigeon Pea for Human and Animal Diets. **Scientific World Journal**, [s. l.], v. 2022, 2022. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2022/4873008>. Acesso em: 27 dez. 2023.

ADETUNJI, A.T. *et al.* Management impact and benefit of cover crops on soil quality: A review. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 204, p. 104717, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198720304992>. Acesso em: 12 nov. 2024.

ALLEN-KING, R.M.; GRATHWOHL, P.; BALL, W.P. New modeling paradigms for the sorption of hydrophobic organic chemicals to heterogeneous carbonaceous matter in soils, sediments, and rocks. **Advances in Water resources**, v. 25, n. 8-12, p. 985-1016, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0309170802000453> Acesso em: 27 dez. 2023.

ALKIMIM, A.; CLARKE, K.C. Land use change and the carbon debt for sugarcane ethanol production in Brazil. **Land Use Policy**, [s. l.], v. 72, p. 65–73, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264837716309607> Acesso em: 28 out. 2023.

ARTAXO, P. As três emergências que nossa sociedade enfrenta: saúde, biodiversidade e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, [s. l.], v. 34, n. 100, p. 53–66, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/TRsRMLDdZxRsz85QNYFQBHs/?format=html>. Acesso em: 23 nov. 2023.

BABU, S. *et al.* Soil carbon dynamics under organic farming: Impact of tillage and cropping diversity. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 147, p. 109940, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X23000821>. Acesso em: 15 jun. 2024.

BARBOSA, I.R. *et al.* Dry matter production and nitrogen, phosphorus and potassium uptake in *Crotalaria juncea* and *Crotalaria spectabilis*. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [s. l.], v. 50, p. e61011, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pat/a/gQXpxncTczT97SDnZSxsnwz/>. Acesso em: 26 dez. 2023.

BASCHE, A. D. *et al.* Do cover crops increase or decrease nitrous oxide emissions? A meta-analysis. **Journal of Soil and Water Conservation**, [s. l.], v. 69, n. 6, p. 471–482, 2014. Disponível em: <https://www.jswnonline.org/content/69/6/471>. Acesso em: 12 nov. 2024.

BERRIEL, V.; MONZA, J.; PERDOMO, C.H. Cover Crop Selection by Jointly Optimizing Biomass Productivity, Biological Nitrogen Fixation, and Transpiration Efficiency: Application to Two *Crotalaria* Species. **Agronomy**, 2020, Vol. 10, P. 1116, [s. l.], v. 10, n. 8, p. 1116, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/8/1116/htm>. Acesso em: 21 nov. 2023.

BONANOMI, J. *et al.* Protecting forests at the expense of native grasslands: Land-use policy encourages open-habitat loss in the Brazilian cerrado biome. **Perspectives in Ecology and Conservation**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 26–31, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2530064418301135>. Acesso em: 26 out. 2023.

BRASIL. **Brasil se compromete a reduzir emissões de carbono em 50%, até 2030 — Casa Civil**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/casacivil/pt-br/assuntos/noticias/2021/novembro/brasil-se-compromete-a-reduzir-emissoes-de-carbono-em-50-ate-2030>. Acesso em: 5 jun. 2024.

BRASIL. **Pretendida contribuição nacionalmente determinada para consecução do objetivo da convenção-quadro das nações unidas sobre mudança do clima**. Brasília: [s. n.], 2016. Disponível em: <http://educaclima.mma.gov.br/wp-content/uploads/2023/08/NDC-1.1-Brasil-21-set-2016-portugues.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2024.

BRIEDIS, C. *et al.* Soil organic matter pools and carbon-protection mechanisms in aggregate classes influenced by surface liming in a no-till system. **Geoderma**, [s. l.], v. 170, p. 80–88, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706111002965>. Acesso em: 14 jun. 2024.

BUTTERBACH-BAHL, K. *et al.* Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? *Philosophical Transactions of the Royal Society B. Biological Sciences*, [s. l.], v. 368, n. 1621, 2013. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2013.0122>. Acesso em: 22 jun. 2024.

CAMPANHA, M.M. *et al.* Effect of soil tillage and N fertilization on N₂O mitigation in maize in the Brazilian Cerrado. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 692, p. 1165–1174, 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896971933428X?casa_token=D_GOM7iRISO8AAAAA:IcoGWqEUh-ok56UfZZpMlrTtOtiSvu1s81L634fgl3L7UPmbQTDeiBCtyFFImrMRGKTmUxdgdm. Acesso em: 14 ago. 2024.

CANISARES, L.P. *et al.* Maize-Brachiaria intercropping: A strategy to supply recycled N to maize and reduce soil N₂O emissions?. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s. l.], v. 319, p. 107491, 2021. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016788092100195X> Acesso em: 7 dez. 2023.

CARVALHO, A.M. de *et al.* Cover Crops Affect Soil Mineral Nitrogen and N Fertilizer Use Efficiency of Maize No-Tillage System in the Brazilian Cerrado. **Land**, [s. l.], v. 13, n. 5, p. 693, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/13/5/693/htm>. Acesso em: 13 ago. 2024.

CARVALHO, A.M.; AMABILE, R.F. Cerrado: **Adubação verde**. Brasília, DF: Embrapa Cerrados, 2006. Disponível em: <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-infoteca-e-doc-569806/Description> Acesso em: 22 jun. 2024.

CERRI, C.C. *et al.* Challenges and Opportunities of Soil Carbon Challenges and Opportunities of SCS in Latin America Sequestration in Latin America. *In*: Carbon sequestration in soils of latin america. New York: **Haworth Press**, 2006. p. 41–47. Disponível em: https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers21-02/010041691.pdf. Acesso em: 16 nov. 2024.

CF, O.D.D.S. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. **United Nations: New york, NY, USA**, [s. l.], 2015. Disponível em: <http://www.cma-lifelonglearning.org/lll/wp-content/uploads/2015/001%20Transforming%20our%20world%20Agenda%20Sustainable%20Development%202030%20EngFreSpa%20AEL%20151004.doc>. Acesso em: 27 out. 2023.

CHEN, J. *et al.* Dynamics of microbial residues control the responses of mineral-associated soil organic carbon to N addition in two temperate forests. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 748, p. 141318, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720348476>. Acesso em: 8 jun. 2024.

CHENG, Y. *et al.* Application of enhanced-efficiency nitrogen fertilizers reduces mineral nitrogen usage and emissions of both N₂O and NH₃ while sustaining yields in a wheat-rice rotation system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [s. l.], v. 324, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/355484956_Application_of_enhanced-efficiency_nitrogen_fertilizers_reduces_mineral_nitrogen_usage_and_emissions_of_both_N2O_and_NH3_while_sustaining_yields_in_a_wheat-rice_rotation_system. Acesso em: 8 dez. 2024.

CHERUBIN, M. *et al.* **Guia prático de plantas de cobertura: espécies, manejo e impacto na saúde do solo**. ESALQ/SOHMA ed. Piracicaba, SP: Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2024. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/003207534>. Acesso em: 14 nov. 2024.

CLARK, M. *et al.* The Role of Healthy Diets in Environmentally Sustainable Food Systems. **Food and Nutrition Bulletin**, [s. l.], v. 41, n. 2_suppl, p. 31S-58S, 2020. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0379572120953734>. Acesso em: 27 out. 2023.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira: Grãos safra 2024/25 10º levantamento. Brasília, 2023: Perspec. agropec, 2023-. ISSN 2318-6852. v. 12. n. 10. Disponível em: https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/10o-levantamento-safra-2024-25/e-book_boletim-de-safras-10o-levantamento-2025.pdf. Acesso em: 27 nov. 2023.

CRIPPA, M. *et al.* Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. **Nature Food**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 198–209, 2021. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s43016-021-00225-9>. Acesso em: 27 nov. 2023.

DAVIDSON, E.A. *et al.* Testing a conceptual model of soil emissions of nitrous and nitric oxides: using two functions based on soil nitrogen availability and soil water content, the hole-in-the-pipe model characterizes a large fraction of the observed variation of nitric oxide and nitrous oxide emissions from soils. *Bioscience*, v. 50, n. 8, p. 667-680, 2000. Disponível em: <https://academic.oup.com/bioscience/article-abstract/50/8/667/243260?redirectedFrom=fulltext> Acesso em: 06 jun. 2025.

DE ABREU, L.H.G. *et al.* Variation in soil carbon, nitrogen and microbial attributes within a silvopastoral system in the Brazilian Cerrado. **Agroforestry Systems**, [s. l.], v. 94, n. 6, p. 2343–2353, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10457-020-00554-x>. Acesso em: 27 dez. 2024.

DE ALBUQUERQUE, A.W. *et al.* Plantas de cobertura e adubação nitrogenada na produção de milho em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 17, n. 7, p. 721–726, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/jLVVbjmZSmywzC6W5gv9kv/>. Acesso em: 25 ago. 2023.

DE CARVALHO, A.M. *et al.* Chemical composition of cover crops and soil organic matter pools in no-tillage systems in the Cerrado. **Soil Use and Management**, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 940–952, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/sum.12746>. Acesso em: 23 nov. 2023.

DE CARVALHO, A.M. *et al.* Nitrous oxide emissions from a long-term integrated crop–livestock system with two levels of P and K fertilization. **Land**, v. 11, n. 9, p. 1535, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/11/9/1535> Acesso em: 23 nov. 2024.

DE CARVALHO, A.M. *et al.* N₂O emissions from sugarcane fields under contrasting watering regimes in the Brazilian Savannah. **Environmental Technology & Innovation**, v. 22, p. 101470, 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186421001188?casa_token=zH5VY9ATgv0AAAAA:yzXBGGubd_1N-heQDc77CLuDj12Tt0bAkXvI5buTY3eP0Y_dQRYV2XpNlfluVzGNEtvSRdrAhA Acesso em: 23 nov. 2024.

DE CARVALHO, A.M. *et al.* Soil Carbon Stocks and Greenhouse Gas Mitigation of Agriculture in the Brazilian Cerrado—A Review. **Plants**, 2023, Vol. 12, Page 2449, [s.

l.], v. 12, n. 13, p. 2449, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/12/13/2449/htm>. Acesso em: 28 out. 2023.

DE CARVALHO, A.M. *et al.* Understanding the Relations between Soil Biochemical Properties and N₂O Emissions in a Long-Term Integrated Crop–Livestock System. **Plants**, 2024, Vol. 13, Page 365, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 365, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/13/3/365/htm>. Acesso em: 22 jun. 2024.

DE OLIVEIRA, A.D. *et al.* “Effects of soil management, rotation and sequence of crops on soil nitrous oxide emissions in the Cerrado: A multi-factor assessment”. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 348, p. 119295, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479723020832>. Acesso em: 28 ago. 2024.

DE OLIVEIRA, J.D.; DA SILVA, J.B.; A., C.Z. Tratamentos para incrementar, acelerar e sincronizar a emergência de plântulas de mucuna-preta. **Revista Ciência Agronômica**, [s. l.], v. 48, n. 3, p. 531–539, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rca/a/3tmFw4k3HVhfHMHJH8CbytGc/>. Acesso em: 28 dez. 2023.

DE MORAES SÁ, J.C. *et al.* No-till systems restore soil organic carbon stock in Brazilian biomes and contribute to the climate solution. **Science of The Total Environment**, v. 977, p. 179370, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972501006X> Acesso em: 08 jan. 2025.

DA SILVA, F.A.M. *et al.* Effects of agricultural management and of climate change on N₂O emissions in an area of the Brazilian Cerrado: Measurements and simulations using the STICS soil-crop model. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, [s. l.], v. 363, p. 108842, 2024. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/ngeo608> Acesso em: 14 ago. 2024.

DE SOUZA, J.L.; GUIMARÃES, G.P. Alterações químicas promovidas pelo pré-cultivo de *crotalaria juncea*, associada à adubação com compostos orgânicos de diferentes níveis de nitrogênio. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, 2013. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/rbas/article/view/2802> Acesso em: 01 ago. 2025.

DE SOUZA, A.J. *et al.* *Crotalaria juncea* L. enhances the bioremediation of sulfentrazone-contaminated soil and promotes changes in the soil bacterial community. **Brazilian Journal of Microbiology**, [s. l.], v. 54, n. 3, p. 2319–2331, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42770-023-01064-5>. Acesso em: 26 dez. 2023.

DIAS, M.A.M. **Fixação Biológica de Nitrogênio: características moleculares e simbióticas de bactérias nativas do Semiárido Brasileiro**. Editora Dialética ed. Belo Horizonte: [s. n.], 2020. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=ejsDEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT2&dq=fixa%C3%A7%C3%A3o+biologica+de+nitrogenio+marcos+a.+moura+dias&ots=_I_uWIA9ZC&sig=5otjNiCgcIIQuDlChuYJfF6V4Lo#v=onepage&q=fixa%C3%A7%C3%A3o%20biologica%20de%20nitrogenio%20marcos%20a.%20moura%20dias&f=false. Acesso em: 8 dez. 2024.

DIAS, A.C.F. TRANSFORMAÇÕES DO NITROGÊNIO NO SOLO. In: MICROBIOLOGIA DO SOLO. 2. ed. Piracicaba: **ESALQ**, 2016. p. 101–111. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Daniel-Bini/publication/311788702_Metabolismo_Microbiano/links/585a809908ae64cb3d4ac507/Metabolismo-Microbiano.pdf#page=101 Acesso em: 26 dez. 2023.

DONAGEMMA, G.K. *et al.* Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 51, n. 9, p. 1003–1020, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/HQcWhPqMBK43vSgQdgctnBc/?lang=pt>. Acesso em: 25 ago. 2023.

DUTTA, D.; REZA, S.K.; CHOUDHURY, S.G. Variability of soil properties under different land uses in sub-humid tropical region of West Bengal, India. **Journal of the Indian Society of Soil Science**, v. 69, n. 3, p. 225-232, 2021. Disponível em: <https://www.indianjournals.com/article/jisss-69-3-001> Acesso em: 01 ago. 2025.

EGLINTON, T.I. *et al.* Climate control on terrestrial biospheric carbon turnover. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 118, n. 8, p. e2011585118, 2021. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.2011585118> Acesso em: 25 ago. 2023.

FAN, C. *et al.* Residual effects of four-year amendments of organic material on N₂O production driven by ammonia-oxidizing archaea and bacteria in a tropical vegetable soil. **The Science of the total environment**, [s. l.], v. 781, 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33798878/>. Acesso em: 28 ago. 2024.

FAO, Food and Agriculture Organization. **Global Forest Resources Assessment 2015: Desk Reference**. Roma: [s. n.], 2015. Disponível em: <https://www.fao.org/3/i4808e/i4808e.pdf>. Acesso em: 28 out. 2023.

FERREIRA, E.A.B. *et al.* Carbon stocks in compartments of soil organic matter 31 years after substitution of native Cerrado vegetation by agroecosystems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, n. 00, p. e0150059, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/NmLcSzG4tM7jtCwLPFx6DBt/?lang=en> Acesso em: 05 jun. 2025.

FIALHO, R.C. *et al.* Fertilization and Irrigation Affect Soil Carbon under Eucalyptus Plantation in the Cerrado. **Floresta e Ambiente**, [s. l.], v. 26, n. 4, p. e20170679, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/loram/a/kPrjdNTyvNBcRQhxVXvY6tn/?lang=en&format=html> l. Acesso em: 27 dez. 2024.

FONTANÉTTI, A. *et al.* Adubação verde na produção orgânica de alface americana e repolho. **Horticultura Brasileira**, [s. l.], v. 24, n. 2, p. 146–150, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hb/a/xRgNw4jk5N8dp5Qx7LxGmxc/?lang=pt>. Acesso em: 26 dez. 2023.

GAWĘDA, D.; HALINIARZ, M. Grain Yield and Quality of Winter Wheat Depending on Previous Crop and Tillage System. **Agriculture 2021, Vol. 11, Page 133**, [s. l.], v. 11,

n. 2, p. 133, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/11/2/133/htm>. Acesso em: 15 jun. 2024.

GEORGE, J. *et al.* Controle de fungos e qualidade fisiológica de sementes de soja (*Glycine max* L.) submetidas ao calor húmido. **Revista de Ciências Agrárias**, [s. l.], v. 42, n. 2, p. 464–471, 2019. Disponível em: <https://revistas.rcaap.pt/rca/article/view/17182>. Acesso em: 27 out. 2023.

GUIMARÃES, D.V. *et al.* Soil organic matter pools and carbon fractions in soil under different land uses. **Soil and Tillage Research**, 126, 177–182. 2013.

GUIMARÃES, F.S. *et al.* Consórcio guandu-milho-braquiária para integração lavoura-pecuária. **Revista de agricultura neotropical**, [s. l.], v. 4, n. 5, p. 22–27, 2017. Disponível em: <https://periodicosonline.uems.br/index.php/agrineo/article/view/2218>. Acesso em: 27 dez. 2023.

GUIMARÃES, I.C. Nogueira *et al.* Influência dos cultivos de milho e guandu para produção de silagem na resistência do solo à penetração. **Archivos de Zootecnia**, [s. l.], v. 68, n. 264, p. 546–550, 2019. Disponível em: <https://www.uco.es/servicios/ucopress/az/index.php/az/article/view/4994>. Acesso em: 27 dez. 2023.

HOROWITZ, C.A. Paris Agreement. **International Legal Materials**, [s. l.], v. 55, n. 4, p. 740–755, 2016. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/international-legal-materials/article/abs/paris-agreement/1EC0C66C41C86DE533D3BD777B997B16>. Acesso em: 27 out. 2023.

HOWARD, J.B. *et al.* Multiple Amino Acid Sequence Alignment Nitrogenase Component 1: Insights into Phylogenetics and Structure-Function Relationships. **PLOS ONE**, [s. l.], v. 8, n. 9, p. e72751, 2013. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0072751>. Acesso em: 8 dez. 2024.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R.J.; MENDES, I. de C. Fixação biológica do nitrogênio na cultura da soja. 2001. Disponível em: <https://real-estate-brazil.com/wp-content/uploads/2017/05/Hungria-1.pdf> Acesso em: 8 dez. 2024.

HUNTER, David B.; SALZMAN, J.E.; ZAEELKE, D. Glasgow Climate Summit: Cop26. **SSRN Electronic Journal**, [s. l.], 2021. Disponível em: <https://papers.ssrn.com/abstract=4005648>. Acesso em: 5 jun. 2024.

LAL, Rattan *et al.* The role of soil in regulation of climate. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 376, n. 1834, p. 20210084, 2021. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rstb.2021.0084> Acesso em: 5 jun. 2024.

LAZCANO, C.; ZHU-BARKER, X.; DECOCK, C. Effects of Organic Fertilizers on the Soil Microorganisms Responsible for N₂O Emissions: A Review. **Microorganisms**, 2021, Vol. 9, Page 983, [s. l.], v. 9, n. 5, p. 983, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-2607/9/5/983/htm>. Acesso em: 6 jul. 2024.

LENNAN, M.; MORGERA, E. The Glasgow Climate Conference (COP26). **The International Journal of Marine and Coastal Law**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 137–151, 2022. Disponível em: https://brill.com/view/journals/estu/37/1/article-p137_6.xml. Acesso em: 5 jun. 2024.

LIMA, R.; LAJÚS, C. Potencial alelopático do extrato da parte aérea do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.) sobre o crescimento inicial do milho (*zea mays* L.) em casa de vegetação. **ENCICLOPEDIA BIOSFERA**, [s. l.], v. 18, n. 37, 2021. Disponível em: <https://www.conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/5335>. Acesso em: 2 jan. 2024.

LIMA, M.G.B.; PERSSON, U.M. Commodity-Centric Landscape Governance as a Double-Edged Sword: The Case of Soy and the Cerrado Working Group in Brazil. **Frontiers in Forests and Global Change**, [s. l.], v. 3, p. 485067, 2020. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/forests-and-global-change/articles/10.3389/ffgc.2020.00027/full>. Acesso em: 28 out. 2023.

LUO, L. *et al.* Nitrogen addition may promote soil organic carbon storage and CO₂ emission but reduce dissolved organic carbon in Zoige peatland. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 324, p. 116376, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479722019491>. Acesso em: 7 jun. 2024.

MA, S. *et al.* Effects of seven-year nitrogen and phosphorus additions on soil microbial community structures and residues in a tropical forest in Hainan Island, China. **Geoderma**, [s. l.], v. 361, p. 114034, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706119313552>. Acesso em: 8 jun. 2024.

MARTINEZ-FERIA, R.A. *et al.* Linking crop- and soil-based approaches to evaluate system nitrogen-use efficiency and tradeoffs. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s. l.], v. 256, p. 131–143, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880918300021>. Acesso em: 27 jun. 2024.

MEAGHER, R.L. *et al.* Documenting Potential Sunn Hemp (*Crotalaria juncea* L.) (Fabaceae) Pollinators in Florida. <https://doi.org/10.1093/ee/nvy190>, [s. l.], v. 48, n. 2, p. 343–350, 2019. Disponível em: <https://bioone.org/journals/environmental-entomology/volume-48/issue-2/nvy190/Documenting-Potential-Sunn-Hemp-Crotalaria-juncea-L-Fabaceae-Pollinators-in/10.1093/ee/nvy190.full>. Acesso em: 26 dez. 2023.

MENDONÇA, A.M. das C. *et al.* High aluminum concentration and initial establishment of *Handroanthus impetiginosus*: clues about an Al non-resistant species in Brazilian Cerrado. **Journal of Forestry Research**, [s. l.], v. 31, n. 6, p. 2075–2082, 2020. Disponível em: [https://link.springer-com.ez54.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s11676-019-01033-5](https://link.springer.com.ez54.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s11676-019-01033-5). Acesso em: 28 out. 2023.

BELTRAN, A.M. *et al.* Mapping direct N₂O emissions from peri-urban agriculture: The case of the Metropolitan Area of Barcelona. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 822, p. 153514, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722006064>. Acesso em: 27 dez. 2024.

MOTTIN, M.C. *et al.* Frações químicas do carbono orgânico do solo em função do cultivo de milho consorciado com plantas de cobertura do solo. **Conjecturas**, [s. l.], v. 22, n. 16, p. 326–339, 2022. Disponível em: <https://www.conjecturas.org/index.php/edicoes/article/view/2042>. Acesso em: 26 out. 2023.

MOURA, J.B. de *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi in the soil using cover crops with and without nitrogen addition. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 13, p. 1054484, 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2022.1054484/full>. Acesso em: 26 out. 2023.

NAGY, L.; ARTAXO, P.; FORSBERG, B.R. Interactions Between Biosphere, Atmosphere, and Human Land Use in the Amazon Basin: An Introduction. [s. l.], p. 3–15, 2016. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-49902-3_1. Acesso em: 23 nov. 2023.

NAN, Wu *et al.* Antioxidant Activities of Extracts and Main Components of Pigeonpea [*Cajanus cajan* (L.) Millsp.] Leaves. **Molecules**, 2009, Vol. 14, Pages 1032–1043, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 1032–1043, 2009. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/14/3/1032/htm>. Acesso em: 27 dez. 2023.

NÓBREGA, R. L.B. *et al.* Impacts of land-use and land-cover change on stream hydrochemistry in the Cerrado and Amazon biomes. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 635, p. 259–274, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718311161>. Acesso em: 26 out. 2023.

NOOR, M.A. Nitrogen management and regulation for optimum NUE in maize – A mini review. **Cogent Food & Agriculture**, [s. l.], v. 3, n. 1, 2017. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/23311932.2017.1348214>. Acesso em: 26 jun. 2024.

NUNES, L.J.R. The Rising Threat of Atmospheric CO₂: A Review on the Causes, Impacts, and Mitigation Strategies. **Environments**, 2023, Vol. 10, Page 66, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 66, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3298/10/4/66/htm>. Acesso em: 26 jun. 2024.

PACHECO, L.P. *et al.* Biomass yield in production systems of soybean sown in succession to annual crops and cover crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 52, n. 8, p. 582–591, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/ZH7hNyFFstNgXBzMnJkbtCQ/?lang=en>. Acesso em: 26 out. 2023.

PALMER, J. *et al.* Nitrogen cycling from increased soil organic carbon contributes both positively and negatively to ecosystem services in wheat agro-ecosystems. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 8, p. 248311, 2017. Disponível em: www.frontiersin.org. Acesso em: 7 jun. 2024.

PARENTI, A. *et al.* SunnGro: A new crop model for the simulation of sunn hemp (*Crotalaria juncea* L.) grown under alternative management practices. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], v. 146, p. 105975, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096195342100012X>. Acesso em: 21 nov. 2023.

PASSOS, A.M.A. dos; ALVARENGA, R.C.; SANTOS, F.C. dos. Sistema de plantio direto. Brasília, DF: **Embrapa**, 2018. cap. 3, p., [s. l.], p. 61–104, 2018. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1101765>. Acesso em: 25 ago. 2023.

PLAZA-BONILLA, D.; ÁLVARO-FUENTES, J.; CANTERO-MARTÍNEZ, C. Identifying soil organic carbon fractions sensitive to agricultural management practices. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 139, p. 19–22, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198714000129>. Acesso em: 14 jun. 2024.

PRATIBHA, G. *et al.* Impact of conservation agriculture practices on energy use efficiency and global warming potential in rainfed pigeonpea–castor systems. **European Journal of Agronomy**, [s. l.], v. 66, p. 30–40, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1161030115000143>. Acesso em: 27 dez. 2023.

R CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 21 de Mar. 2025.

RAMOS, M.L.G. *et al.* Carbon fractions in soil under no-tillage corn and cover crops in the Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 55, p. e01743, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/7ppJ74XdLL4pKzWBYdNpR9b/?lang=en&format=html>. Acesso em: 26 out. 2023.

RAMBO, K.L. *et al.* A rotação de culturas na conservação do solo. **Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 28, 2021. Disponível em: <https://editoraime.com.br/revistas/index.php/rema/article/view/1617>. Acesso em: 2 jan. 2024.

RAWAT, R.; SAINI, C.S. High-Intensity Ultrasound (HIUS) Treatment of Sunnhemp Protein Isolate (*Crotalaria juncea* L.): Modification of Functional, Structural, and Microstructural Properties. **Food and Bioprocess Technology**, [s. l.], v. 16, n. 7, p. 1464–1477, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-023-03011-6>. Acesso em: 21 nov. 2023.

REICHENBACH, M. *et al.* Soil carbon stocks in stable tropical landforms are dominated by geochemical controls and not by land use. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 29, n. 9, p. 2591–2607, 2023. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcb.16622>. Acesso em: 28 out. 2023.

REIS, L.S. *et al.* Soil Compaction: An Agronomic and Environmental view. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 11, n. 5, p. e40011528487–e40011528487, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/28487>. Acesso em: 2 jan. 2024.

OLIVEIRA, D.M. da. *et al.* Soil carbon changes in areas undergoing expansion of sugarcane into pastures in south-central Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s. l.], v. 228, p. 38–48, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880916302511> Acesso em: 27 dez. 2024.

RIGON, J.P.G. *et al.* Using cover crops to offset greenhouse gas emissions from a tropical soil under no-till. **Experimental Agriculture**, [s. l.], v. 57, n. 4, p. 217–231, 2021. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/experimental-agriculture/article/abs/using-cover-crops-to-offset-greenhouse-gas-emissions-from-a-tropical-soil-under-notill/8C119B57B430B8FA4EA7381BAF10DEDB>. Acesso em: 5 jun. 2024.

ROOHI, M. *et al.* Role of fertilization regime on soil carbon sequestration and crop yield in a maize-cowpea intercropping system on low fertility soils. **Geoderma**, [s. l.], v. 428, p. 116152, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706122004591> Acesso em: 7 jun. 2024.

SABÓIA, A. de S. *et al.* Poliuretano expansível como recipiente para estudos de solo compactado e cultivado com nabo forrageiro. **Conjecturas**, [s. l.], v. 22, n. 11, p. 925–947, 2022. Disponível em: <https://conjecturas.org/index.php/edicoes/article/view/1453>. Acesso em: 2 jan. 2024.

SADHUKHAN, S.; SARKAR, U. Production of Biodiesel from *Crotalaria juncea* (Sunn-Hemp) Oil Using Catalytic Trans-Esterification: Process Optimisation Using a Factorial and Box–Behnken Design. **Waste and Biomass Valorization**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 343–355, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-015-9454-4>. Acesso em: 21 nov. 2023.

SANDERMAN, J.; HENGL, T.; FISKE, G.J. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, [s. l.], v. 114, n. 36, p. 9575–9580, 2017. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1706103114>. Acesso em: 7 jun. 2024.

SANTOS, F. *et al.* Aproveitamento integral do nabo forrageiro (*Raphanus Sativus* L.) em processos de biorrefinaria Integral utilization of *Raphanus Sativus* L. in biorefinary processes. **ENGEVISTA**, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 374–393, 2018.

SANTOS, S.B. da C. *et al.* Effect of sodium chloride on germination and vigor of *Cajanus cajan* (L.) millspaugh seeds. **Revista Engenharia na Agricultura - REVENG**, [s. l.], v. 31, n. Contínua, p. 106–113, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/reveng/article/view/14959>. Acesso em: 27 dez. 2023.

SARI, V.; POLETO, C.; CASTRO, N.M. dos R. Caracterização dos processos hidrossedimentológicos em bacias rurais e urbanas. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA**, [s. l.], v. 9, p. 569–624, 2013. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/248977>. Acesso em: 26 out. 2023.

SATO, J.H. *et al.* Understanding the relations between soil organic matter fractions and N₂O emissions in a long-term integrated crop–livestock system. **European Journal of Soil Science**, [s. l.], v. 70, n. 6, p. 1183–1196, 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ejss.12819>. Acesso em: 14 jun. 2024.

SCHNITZER, M. Humic substances: chemistry and reactions. In: **Developments in soil science**. Elsevier, 1978. p. 1-64. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166248108700163> Acesso em: 27 dez. 2023.

SCHNITZER, M.; MONREAL, C.M. Quo vadis soil organic matter research? A biological link to the chemistry of humification. **Advances in agronomy**, v. 113, p. 143-217, 2011 DOI: B978-0-12-386473-4.00003-8, 2011.

SILVA, A. do N. *et al.* Effects of cover crops on the physical protection of organic matter and soil aggregation. **AJCS**, [s. l.], v. 10, n. 12, p. 1835–2707, 2016. Disponível em: https://www.cropj.com/silva_10_12_2016_1623_1629.pdf Acesso em: 26 fev. 2025.

SILVA, M.A. *et al.* Isolated and mixed cover crops to improve soil quality and commercial crops in the Cerrado. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 10, n. 12, p. e11101220008–e11101220008, 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/20008>. Acesso em: 26 out. 2023.

SIX, J. *et al.* Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. **Agronomie**, [s. l.], v. 22, n. 7–8, p. 755–775, 2002. Disponível em: <https://hal.science/hal-00885974>. Acesso em: 16 nov. 2024.

ST. LUCE, M. *et al.* Long-term effects of tillage and nitrogen fertilization on soil C and N fractions in a corn–soybean rotation. **Canadian Journal of Soil Science**, [s. l.], v. 102, n. 2, p. 277–292, 2022. Disponível em: <https://cdnscepub.com/doi/10.1139/cjss-2021-0129>. Acesso em: 27 jun. 2024.

STOCKER, T. **Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate**. 2014. Disponível em: https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=o4gaBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&ots=WikC7OCsPh&sig=BgDSO2pVLJGd1CzJfWA_2QQevjU. Acesso em: 22 jun. 2024.

SUM, W.; SHAHRAJABIAN, M.H; CHENG, Q. Archaea, bacteria and termite, nitrogen fixation and sustainable plants production. **Not Bot Horti Agrobi**, [s. l.], v. 49, n. 2, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/351346653_Archaea_Bacteria_and_Termite_Nitrogen_Fixation_and_Sustainable_Plants_Production. Acesso em: 1 jan. 2024.

SUN, W. *et al.* Climate drives global soil carbon sequestration and crop yield changes under conservation agriculture. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 26, n. 6, p. 3325–3335, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcb.15001>. Acesso em: 7 jun. 2024.

OLIVEIRA, D.M. da S. *et al.* Climate-smart agriculture and soil C sequestration in Brazilian Cerrado: A systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, n. spe, p. e0220055, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220055> Acesso em: 7 jun. 2025.

TAYLOR, K.M. *et al.* No-till annual wheat increases plant productivity, soil microbial biomass, and soil carbon stabilization relative to intermediate wheatgrass in a Mediterranean climate. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 235, p. 105874, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198723002416> Acesso em: 6 jul. 2024.

TEIXEIRA, R. da S.; FONSECA, V.M. da. A expansão da fronteira agrícola nos biomas brasileiros: O cerrado como laboratório para os pacotes tecnológicos da “revolução verde” / The expansion of the agricultural frontier in brazilian biomes: The cerrado as a laboratory for the technological packages of the “green revolution”. **Brazilian Journal of Development**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 6416–6435, 2022. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/43175>. Acesso em: 26 out. 2023.

TRIVELIN, P.C.O. *et al.* Perdas do nitrogênio da uréia no sistema solo-planta em dois ciclos de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 37, n. 2, p. 193–201, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/x7BJqvSbpWX9k6TgfRhmjGn/?lang=pt>. Acesso em: 8 dez. 2024.

UKALSKA-JARUGA, A. *et al.* Characterization of Soil Organic Matter Individual Fractions (Fulvic Acids, Humic Acids, and Humins) by Spectroscopic and Electrochemical Techniques in Agricultural Soils. **Agronomy** 2021, Vol. 11, Page 1067, [s. l.], v. 11, n. 6, p. 1067, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/6/1067/htm>. Acesso em: 28 dez. 2024.

VIEIRA, R.F. **Ciclo do Nitrogênio em Sistemas Agrícolas**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1090589/1/2017LV04.pdf>. Acesso em: 27 dez. 2024.

VIEIRA, K.C. *et al.* Potential for environmental contamination of herbicides used in corn, soy and sugar cane cultures. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 9, n. 9, p.

e417997442–e417997442, 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/7442>. Acesso em: 27 out. 2023.

WANG, W. *et al.* Continuous application of conservation tillage affects in situ N₂O emissions and nitrogen cycling gene abundances following nitrogen fertilization. **Soil Biology and Biochemistry**, [s. l.], v. 157, p. 108239, 2021. Disponível em: Acesso em: 26 jun. 2024.

WOLSCHICK, N.H. *et al.* Cobertura do solo, produção de biomassa e acúmulo de nutrientes por plantas de cobertura. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 134–143, 2016. Disponível em: <https://revistas.udesc.br/index.php/agroveterinaria/article/view/223811711522016134>. Acesso em: 25 ago. 2023.

WUTKE, Elaine Bahia *et al.* Bancos comunitários de sementes de adubos verdes: cartilha para agricultores. [s. l.], 2007. Disponível em: <http://192.168.3.118:8080/jspui/handle/1/294>. Acesso em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071721001115> 28 dez. 2023.

ZHANG, C. *et al.* Long-term warming and nitrogen fertilization affect C-, N- and P-acquiring hydrolase and oxidase activities in winter wheat monocropping soil. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 18542, 2021. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-97231-5> Acesso em: 27 jun. 2024.

ZHANG, Y.; WANG, W.; YAO, H. Urea-based nitrogen fertilization in agriculture: a key source of N₂O emissions and recent development in mitigating strategies. **Archives of Agronomy and Soil Science**, [s. l.], v. 69, n. 5, p. 663–678, 2023. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03650340.2022.2025588>. Acesso em: 28 ago. 2024.

ZHU-BARKER, X.; DOANE, T.A.; HORWATH, W.R. Role of green waste compost in the production of N₂O from agricultural soils. **Soil Biology and Biochemistry**, [s. l.], v. 83, p. 57–65, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071715000206> Acesso em: 27 dez. 2024.

CAPÍTULO 1

FLUXOS DE N_2O NO SOLO EM SUCESSÃO MILHO-PLANTAS EM RESPOSTA A MANEJO DE FERTILIZANTES NIROGENADOS NO CERRADO



Fotos: autor.

RESUMO

A concentração de N_2O atmosférico aumentou nos últimos anos e o setor agrícola é o principal responsável pelas emissões deste gás, que é um gás de efeito estufa (GEE) com potencial de aquecimento global 298 vezes superior ao dióxido de C (C_2O). No setor agrícola, as emissões de N_2O no solo são intensificadas pelo uso de fertilizantes nitrogenados, tem contribuído significativamente com as mudanças climáticas. O uso de plantas de cobertura (PCs), incluindo leguminosas, é uma estratégia para aumentar o teor de nitrogênio (N) no solo e reduzir a necessidade da aplicação de N-fertilizante na cultura do milho, devido à fixação biológica de N (FBN) feita pelas leguminosas. O objetivo é investigar diferentes PCs em sucessão ao milho, com e sem aplicação de N em cobertura que visa reduzir as emissões de N_2O do solo para atmosfera. O experimento foi realizado na região de Cerrado, com parcelas constituídas por diferentes PCs (*Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea*, *Raphanus sativus* e *Mucuna aterrima*) e as subparcelas com e sem adição de N em cobertura na cultura do milho. O delineamento experimental é em blocos casualizados com parcelas subdivididas e três repetições. As emissões de N_2O no solo foram medidas utilizando-se o método de câmaras estáticas em um intervalo de novembro de 2015 a outubro de 2016, e a determinação da concentração de N_2O feita por cromatografia gasosa. As emissões acumuladas de N_2O foram calculadas plotando-se os valores diários dos fluxos de N_2O e a escala de tempo utilizando-se o software SigmaPlot®. As amostras de solo foram coletadas em profundidade de 0-10 cm, para a determinação do N mineral (NO_3^- e NH_4^+) por análise de fluxo de injeção (FIA), além da umidade gravimétrica. Os fluxos acumulados de N_2O durante o período de avaliação ano agrícola, como entressafra com cobertura viva (PCs) e morta (pousio) foram $\leq 2,95$ kg ha^{-1} . Foi observada uma correlação entre os fluxos de N_2O e as seguintes co-variáveis: temperatura do solo, espaço poroso preenchido por água (EPPA) e N-mineral. No geral, as parcelas de milho fertilizado e não fertilizado com N apresentaram emissões de N_2O em escala de rendimento se diferiu apenas entre doses para a *Mucuna aterrima* com aplicação de N-fertilizante sendo superior. Os fluxos diários de N_2O foram superiores em 38% com a aplicação de N em cobertura no milho. De acordo com este estudo houve efeito das doses ($p < 0,05$) e das PCs ($p < 0,05$) quanto às emissões de N_2O . Os fluxos acumulados de N_2O durante o período de avaliação foram ≤ 2.95 kg ha^{-1} . Foi observada uma correlação entre os fluxos de N_2O e a temperatura do solo, espaço poroso preenchido por água (EPPA) e N-mineral. A maior eficiência do uso do fertilizante nitrogenado foi para o tratamento milho-*Crotalaria juncea* em relação à milho-*Mucuna aterrima* e milho-*Raphanus sativus*. O fator de emissão de N_2O com os valores obtidos em nosso estudo estão de acordo com as estimativas globais estipulados pelo IPCC ($<1\%$).

Palavras chaves: mudanças climáticas, gases de efeito estufa, sucessão de culturas, sistema plantio direto, *Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea*.

SOIL N₂O FLUXES IN MAIZE–PLANT SUCCESSION IN RESPONSE TO NITROGEN FERTILIZER MANAGEMENT IN THE CERRADO

ABSTRACT

The concentration of atmospheric N₂O has increased in recent years, and the agricultural sector is the main contributor to emissions of this gas, which is a greenhouse gas (GHG) with a global warming potential 298 times greater than carbon dioxide (CO₂). In the agricultural sector, N₂O emissions from the soil are intensified by the use of nitrogen fertilizers, which has contributed significantly to climate change. The use of cover crops (CCs), including legumes, is a strategy to increase the nitrogen (N) content in the soil and reduce the need for N-fertilizer application in the maize crop, due to the biological nitrogen fixation (BNF) carried out by legumes. The aim is to investigate different CCs in succession to maize, with and without the application of N as a top dressing, in order to reduce N₂O emissions from the soil into the atmosphere. The experiment was carried out in the Cerrado region, with plots consisting of different CCs (*Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea*, *Raphanus sativus*, and *Mucuna aterrima*) and subplots with and without the addition of N as a top dressing to the maize crop. The experimental design was randomized blocks with split plots and three replications. Soil N₂O emissions were measured using the static chamber method from November 2015 to October 2016, and N₂O concentration was determined using gas chromatography. Cumulative N₂O emissions were calculated by plotting the daily values of N₂O fluxes against time using SigmaPlot® software. Soil samples were collected at a depth of 0–10 cm to determine mineral N (NO₃⁻ and NH₄⁺) by flow injection analysis (FIA), as well as gravimetric moisture. The accumulated N₂O fluxes during the evaluation period of the agricultural year, under off-season conditions with live cover (CCs) and dead cover (fallow), were ≤ 2.95 kg ha⁻¹. A correlation was observed between N₂O fluxes and the following covariates: soil temperature, pore space filled with water (PSFW), and mineral N. Overall, the N-fertilized and non-fertilized maize plots showed N₂O emissions on a yield scale that differed only between doses for *Mucuna aterrima*, with higher emissions observed when N fertilizer was applied. Daily N₂O fluxes were 38% higher when N was applied to maize. According to this study, there was an effect of N doses ($p < 0.05$) and CCs ($p < 0.05$) on N₂O emissions. The accumulated N₂O fluxes during the evaluation period were ≤ 2.95 kg ha⁻¹. A correlation was observed between N₂O fluxes and soil temperature, pore space filled with water (PSFW), and mineral N. The highest nitrogen fertilizer use efficiency was observed in the maize–*Crotalaria juncea* treatment compared to maize–*Mucuna aterrima* and maize–*Raphanus sativus*. The N₂O emission factor values obtained in our study are in line with the global estimates stipulated by the IPCC (<1%).

Keywords: climate change, greenhouse gases, crop succession, no-till, *Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea*.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais representam uma pauta importante relacionada ao aumento das emissões antropogênicas de óxido nitroso (N_2O) em solos agrícolas (Tian *et al.*, 2020). A concentração de N_2O atmosférico aumentou mais de 23%, de 270 ppb, entre 1850 para 332 ppb em 2019, especialmente nas últimas décadas (IPCC, 2023). O setor agrícola é o principal responsável pelas emissões de N_2O devido às mudanças de uso dos solos e a alta demanda por alimentos associadas diretamente ao crescimento populacional e de insumos, principalmente, os fertilizantes nitrogenados (Clark *et al.*, 2020; Crippa *et al.*, 2021).

Atualmente, o setor agrícola depende de altas doses de fertilizantes à base de nitrogênio (N) para atingir rendimentos mais altos e essa fertilização exerce uma influência direta sobre as emissões de N_2O para a atmosfera (Tian *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2023). No Brasil, as emissões líquidas em 2022 totalizaram 1,69 GtCO₂e (gigatoneladas de CO₂ equivalente), que representa 36,5% das emissões totais de GEE, principalmente, devido à atividade agropecuária, observado com sexto maior emissor de GEE do mundo (MCTI, 2023).

A aplicação de N promove aumento das emissões de N_2O do solo em um curto espaço de tempo e o excedente de N tornou-se um fator importante envolvido na elevação das emissões de N_2O (Fan *et al.*, 2021). O aumento da temperatura e da precipitação também podem induzir significativamente as emissões desse gás no solo em um curto período de tempo após a aplicação de N (Faye *et al.*, 2023).

O solo é uma importante fonte de N_2O e sua produção é amplamente regulada por processos biológicos (Butterbach-Bahl *et al.*, 2013). As estimativas dessas emissões de N_2O do solo são bastante incertas, principalmente, devido à alta variabilidade das taxas de emissão, que dependem de fatores edafoclimáticos (Chang *et al.*, 2022). As interações complexas entre esses fatores e as variáveis ambientais (nitrato e amônio, aeração, temperatura, disponibilidade de água (H_2O) e nutrientes nos solos), que impulsionam o N_2O , gerado a partir dos processos de ciclagem de N do solo (por exemplo, mineralização, nitrificação e desnitrificação) (Zhang *et al.*, 2023).

O conceito de emissão de N_2O em escala de rendimento foi proposto para equilibrar a produção agrícola com as emissões de N_2O (Wang *et al.*, 2022). Essa abordagem tem sido utilizada para avaliar o impacto de diferentes manejos de solo, gestão de nutrientes e corretivos. Os resultados indicam que a redução das emissões de N_2O por

unidade de rendimento é fundamental para desenvolver estratégias que conciliem a segurança alimentar com a mitigação de emissões, sendo que a aplicação de N via fertilizante resulta em menores emissões em escala de rendimento (Kim *et al.*, 2023).

Para a produção de milho, em escala global estima-se que a cultura requer 28 Tg (teragramas) de N reativo, com cerca de 46% de N. O milho absorve menos de 50% do N aplicado como fertilizante, em solos tropicais (Rocha *et al.*, 2019; Canisares *et al.*, 2021). Há necessidade de estimativas mais precisas sobre as frações de N-fertilizante emitida como N₂O para regiões tropicais do globo (Wang *et al.*, 2022). Essas estimativas da emissão total de N₂O pela aplicação de N fertilizante é baseada no fator de emissão, uma percentagem de N₂O emitida como proporção do N aplicado (Li *et al.*, 2024). Uma quantidade significativa desse N pode ser perdida por meio de lixiviação e volatilização de amônia (NH₃) (Islam *et al.*, 2024). Apesar de ocorrerem em pequenas quantidades, essas perdas têm importância significativa por contribuírem para as emissões de N₂O (Li *et al.*, 2024). Uma gestão otimizada da fertilização tem o potencial de melhorar o rendimento das culturas, aumentar a EA do uso de N e, conseqüentemente, reduzir as emissões GEE (Yu *et al.*, 2021).

Plantas de cobertura (PCs) podem capturar o excedente de N que a cultura comercial não consegue usar, com o aumento da EA do uso de N e reduzindo as emissões de N₂O (Martinez-Feria *et al.*, 2018). Sistemas agrícolas com rotação de culturas e a prática do uso de PCs promovem o aumento da matéria orgânica e dos teores de N do solo (Barbosa *et al.*, 2022). Devido ao não revolvimento do solo em uso ao SPD (Salomão *et al.*, 2020), também atuam na conservação dos solos (Melo *et al.*, 2023) e ciclagem nutrientes, que resulta em incrementos nos estoques de carbono (C), melhoria da fertilidade do solo e aumento de produtividade das culturas (Carvalho *et al.*, 2021; Salama & Geyer, 2023).

Dessa forma, a hipótese levantada neste trabalho é de que o milho em sucessão às PCs (*Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea*, *Mucuna aterrima* e *Raphanus sativus*) em SPD contribui para mitigar as emissões de N₂O devido à maior eficiência de uso de N neste sistema agrícola. Nesse contexto, os objetivos do trabalho foram: avaliar as emissões diárias de N₂O e sua correlação com as variáveis edafoclimáticas; avaliar as emissões de N₂O acumuladas no período de safra (milho), safrinha (plantas de cobertura), entressafra (resíduos das plantas) e total; estimar a produtividade e escala de emissão de N₂O por rendimento, sem e com aplicação de N na cobertura do milho e determinar a eficiência de N e o fator de emissão de N₂O na região do Cerrado Brasileiro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição da área experimental

O experimento de longa duração (2004 – até o momento), está localizado na Embrapa Cerrados (CPAC) em Planaltina-DF. Suas coordenadas geográficas são 15°35'34.31" S, 47°44'11.56" W e altitude em torno de 1000 m (Figura 3). O delineamento do experimento é em blocos ao acaso com parcelas subdivididas e três repetições. As parcelas são representadas pelas PCs e as subparcelas pela aplicação ou não de N em cobertura no milho. As parcelas possuem as dimensões de 12 m x 8 m e as subparcelas de 6 m x 8 m (Figura 3).

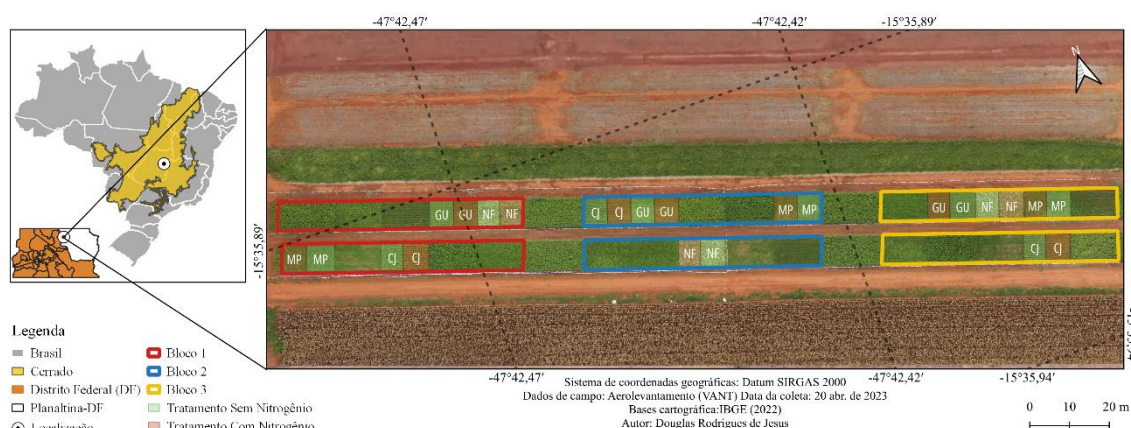


Figura 3. Mapa de localização da área experimental na Embrapa Cerrados, em Planaltina, DF, Brasil.

O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico, horizonte A moderado, caulínítico, em Cerrado subcaducifólio, relevo suave-ondulado (Santos *et al.*, 2018). A classificação do clima é semiúmida de Clima Zonal, sendo classificada como Aw e Cwa, com média do mês mais frio entre 18 °C e 22,5 °C (Novais, 2023). A Figura 4 mostra período de novembro 2015 a novembro de 2016.

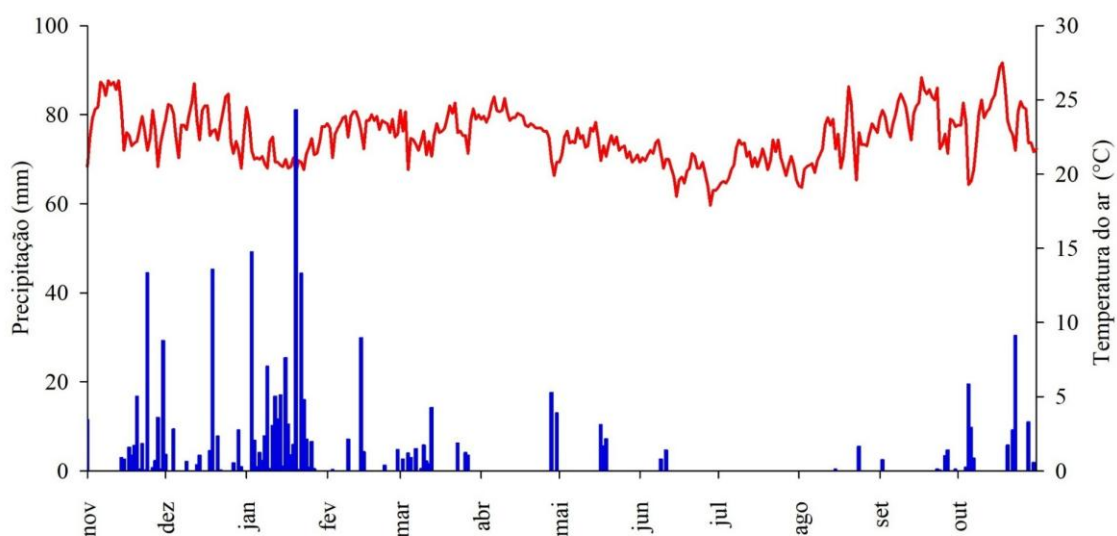


Figura 4. Precipitação (mm) e temperatura média do ar (°C) de novembro de 2015 a novembro de 2016, Planaltina, Distrito Federal, Brasil.

Os atributos químicos da camada superficial (0-20 cm) do solo da área experimental são: pH (em H₂O) = 6,0; MO = 21,7 g kg⁻¹; PMehlich1 = 0,9 mg kg⁻¹; Al³⁺ = 0,1 cmolC kg⁻¹; Ca²⁺Mg²⁺ = 2,9 cmolc kg⁻¹; K⁺ = 0,1 cmolc kg⁻¹. A composição mineralógica do horizonte diagnóstico do solo é a seguinte: caulinita (320 g kg⁻¹), gibsitita (496 g kg⁻¹), hematita (142 g kg⁻¹) e goetita (42 g kg⁻¹).

2.2 Histórico, delineamento e manejo do experimento

Entre 1995 e 2005, a área encontrava-se em pousio. Em 2005, o experimento com PCs em sucessão ao milho (*Zea mays* L.) foi instalado para avaliar os efeitos do corte (manejo) na floração e na maturação das PCs (de Carvalho *et al.*, 2011; 2015; Carvalho *et al.*, 2013). Em 2010/2011, as parcelas com PCs em sucessão ao milho foram subdivididas com e sem aplicação de N em cobertura no milho cultivado na safra (Carvalho *et al.*, 2021). O milho é semeado no início do período chuvoso (em novembro) em sistema plantio direto (diretamente sobre os restos culturais das PCs).

Na semeadura do milho foram aplicados 500 kg ha⁻¹ de N-P-K 4-30-16, 2 kg ha⁻¹ de Zn (ZnSO₄ 7H₂O) e 10 kg ha⁻¹ de FTE BR 12 em todas as parcelas e subparcelas. Na adubação de plantio, o N foi aplicado na forma de fosfato monoamônio na dose de 20 kg ha⁻¹ de N. Na adubação de cobertura, realizada em subparcelas com aplicação de fertilizante, a dose foi de 130 kg ha⁻¹ de N na forma de

ureia, dividida em duas aplicações de 65 kg ha⁻¹ nos estádios fenológicos V4 e V8, que ambos totalizam 130 kg ha⁻¹.

No fim do período chuvoso (março), após a colheita do milho, as PCs eram semeadas diretamente sobre os restos culturais das PCs. As espécies utilizadas no experimento foram: três leguminosas; crotalária-juncea (*Crotalaria juncea*), feijão-guandu (*Cajanus cajan*) e mucuna-preta (*Mucuna aterrima*); e uma crucífera: nabo-forrageiro (*Raphanus sativus*). A densidade de plantio das PCs foi de 20 plantas m⁻¹ para *Cajanus cajan* e *Crotalaria juncea*, 40 plantas m⁻¹ para *Raphanus sativus*; e 10 plantas m⁻¹ para *Mucuna aterrima*. O espaçamento entre linhas foi de 0,5 m para todas as PCs.

2.3 Amostragem e análises dos fluxos de N₂O no solo

As coletas dos fluxos de N₂O foram realizadas pelo método de câmaras estáticas e em cada tratamento foram colocadas duas câmaras estáticas, totalizando 48 câmaras, enquanto outras 3 foram instaladas no cerrado nativo, uma área adjacente à área experimental, utilizada como referência para esse estudo. As câmaras estáticas foram constituídas por uma base metálica retangular de dimensões 38 x 68 cm, inseridas no solo a uma profundidade entre 8 e 9 cm, permanecendo durante todo o período de avaliação (de 14/12/2015 a 05/01/2016). Essa base possuía uma canaleta onde era inserida uma borracha esponjosa para assegurar vedação total. A tampa retangular (bandeja), protegida por uma espuma com 2 cm de espessura e uma manta metalizada era acoplada à base durante o período de amostragem.

Os frascos tipo vials de 20 mL lacrados com tampa/lacre de alumínio, tipo crimp, septo em PTFE / borracha clorobutil (Pharmafix), 20 mm, orifício de 10 mm eram submetidos a um vácuo de -3,0 mBar. Imediatamente após o fechamento das câmaras, aproximadamente 30 mL de gás foram coletados com o auxílio de seringas de polipropileno de 60 mL, sendo posteriormente transferidos para os vials hermeticamente fechados ou vedados (figura 5).

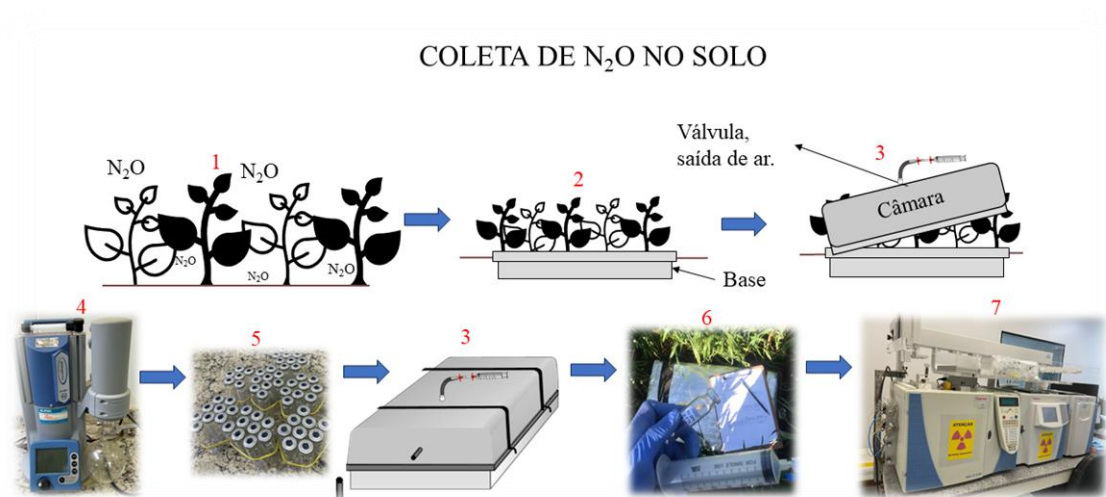


Figura 5. Modelo de câmaras estáticas e sequência utilizada para realização das coletas de N₂O do solo: (1) tratamento; (2) bases inseridas no campo; (3) câmaras estáticas; (4) bomba de vácuo; (5) vials; (6) coleta do N₂O e (7) Leitura no Cromatógrafo Gasoso.

As amostras foram coletadas nos tempos 0, 15 e 30 minutos após o fechamento das câmaras para cada tratamento, entre 8 e 10 horas da manhã (Alves *et al.*, 2012). Isso incluía a determinação de N₂O do ar atmosférico fora das câmaras como referência. As coletas eram realizadas após eventos de chuva, semeadura do milho e duas aplicações de fertilizantes em cobertura, ocorrendo durante dois a três dias após cada um desses eventos. Além disso, após episódios de chuva e irrigação, eram efetuadas de 2 a 3 coletas. As coletas de N₂O foram realizadas no intervalo de novembro de 2015 a outubro de 2016.

Essas amostras foram armazenadas em bandejas contendo H₂O destilada, mantidas em ambiente refrigerado para preservação antes das análises no cromatógrafo.

Durante as amostragens de N₂O no campo, as temperaturas do solo e das câmaras eram medidas para o subsequente cálculo dos fluxos de N₂O. A determinação da concentração de N₂O foi feita no Laboratório de Cromatografia Gasosa (Thermo Scientific Model Trace 1310) por um equipado com uma coluna Porapak Q e um detector de elétron (ECD) na Embrapa Cerrados.

O valor final dos fluxos ($\mu\text{g de N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ((microgramas/metro quadrado/por hora)) foi obtido integrando-se a área de um gráfico, com variações, conforme a concentração de N₂O. Previamente a cada conjunto de análises, amostras contendo concentração conhecida de N₂O foram inseridas com o propósito de servir como padrões na elaboração da curva de calibração. As concentrações dos padrões abrangeram 200 ppb, 600 ppb, 1000 ppb e 1500 ppb.

A fórmula para o cálculo dos fluxos finais de N₂O (Steudler *et al.*, 1989), pode ser expressa como:

$$F_{N_2O} = \frac{\delta C}{\delta t} \times \frac{V}{A} \times \frac{(1 - e/P)}{V_m}$$

O F_{N_2O} representa o fluxo de N sob a forma de N₂O ($\mu\text{g de N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), $\frac{\delta C}{\delta t}$ é a mudança na concentração de N₂O na câmara em relação ao tempo ($\text{mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$), V e A denotam, respectivamente, o volume (m^3) e a área da câmara (m^2), $\frac{e}{P}$ representa a relação entre a pressão da H₂O e a pressão atmosférica na câmara (kPa kPa^{-1}), e V_m é o volume molar da câmara ($\text{m}^3 \text{ mol}^{-1}$).

As emissões acumuladas foram realizadas pela integração da área sob a curva a partir dos fluxos diários de emissão do N₂O, através de representação gráfica em relação à escala de tempo, com a utilização do software Sigmaplot versão 15.0. As emissões de N₂O em escala de rendimento foram obtidas pela divisão das emissões acumuladas de N₂O pela produtividade do milho.

2.4 N-Mineral (NO₃⁻ e NH₄⁺) e espaço poroso preenchido por água (EPPA)

As amostras de solo foram coletadas na profundidade de 0-10 cm, sendo obtidas 3 subamostras em cada subparcela para formar uma amostra composta (Figura 6) em cada tratamento e em locais próximos às câmaras estáticas. As subamostras foram homogeneizadas para constituir uma amostra composta por dia de coleta, em cada tratamento ou subparcela, utilizadas para determinar a umidade gravimétrica do solo e a concentração de N-mineral no solo (NO₃⁻ e NH₄⁺). As amostras de solo foram acondicionadas em sacos plásticos e transportadas para o laboratório em uma caixa térmica hermeticamente fechada (cooler) com gelo, a fim de prevenir perdas de umidade e N mineral.

Para a determinação da umidade do solo (método gravimétrico), cerca de 40g de solo foram colocadas em latas metálicas correspondente a cada tratamento, pesadas em uma balança (Marte Modelo UX4200H $\epsilon = 0,1\text{g}$) e o valor gerado corresponde ao solo úmido, em seguida levadas para a estufa e mantidas a 105° C por 72 horas, até serem

pesadas novamente (solo seco) para a determinação da umidade gravimétrica. Em seguida, o espaço poroso preenchido por água (EPPA) foi calculado pela fórmula:

$$EPPA (\%) = \frac{(\text{umidade gravimétrica } (\%) \times \text{densidade do solo})}{\text{porosidade total do solo}} \times 100$$

A extração para determinação de nitrato e amônio no solo foi feita por meio de cloreto de potássio, em frascos de vidro com tampas (snapcaps), com adição de 50 ml de cloreto de potássio (KCl), cujo peso foi registrado (Figura 6). De cada amostra de solo, foram retirados 15g e colocados nos frascos contendo KCl, sendo novamente pesados (KCl + solo). Essas operações foram realizadas em duplicata. Os frascos contendo KCl + solo foram mantidos por 24 horas, sendo retirada uma alíquota filtrada no dia subsequente (Silva *et al.*, 2010). Foi utilizado papel de filtro (Filtro Quanty, JP42, Permeabilidade ao ar: 31s m⁻²) para a análise colorimétrica na determinação do N-mineral no solo (NO₃⁻ e NH₄⁺) no Lachat Quik Chem FIA QC8500.



Figura 6. Etapas para realização das coletas e extração do sobrenadante do solo. (1) amostragem de solo com o trado holandês; (2) homogeneização e transporte; (3) pesagem solo úmido e seco pós estufa, para o espaço poroso preenchido por água; (4) SNAP CAPS com 50 ml de solução a base de cloreto de potássio (KCL); (5) solução de KCL mais 15g de solo; (6) análise final no Analisador de Fluxo de Injeção (FIA).

2.5 Determinação da produtividade/rendimento do milho e eficiência do uso de N para essa cultura

Durante a fase de maturação da cultura, foram colhidas quatro linhas de 4 m de comprimento em cada subparcela. As amostras colhidas foram pesadas, e a umidade foi determinada para cada subparcela, a fim de quantificar a produtividade de grãos de milho, corrigindo a umidade dos grãos para 13%.

$$PM = \frac{P}{A} \times 10.000$$

Onde:

- PM é a produtividade de grãos de milho (kg/ha),
- P é o peso total dos grãos de milho colhidos (kg),
- A é a área da subparcela (m²).

A eficiência agrônômica (EA) do N aplicado foi determinada pelo acréscimo na produtividade de grãos nas parcelas adubadas em comparação com a testemunha sem adubação de cobertura no milho, com a equação proposta por Dobermann, (2007):

$$EA = \frac{RGt - RGc}{N_f}$$

Onde: RGt representa a produtividade de grãos observada para o tratamento fertilizado, RGc é a produtividade de grãos observada para o respectivo tratamento sem a aplicação de N, e N_f é a quantidade de fertilizante N adicionado, medida em kg por hectare.

Assim, a EA é expressa como a quantidade de aumento na produtividade de grãos por cada quilo de fertilizante N aplicado.

2.6 Emissões de N₂O em escala do rendimento e fator de emissão

A emissão de N₂O em escala de rendimento (mg N₂O kg⁻¹ de grão) foi calculada dividindo a emissão acumulada de N₂O pelo rendimento de grãos.

$$\text{Emissões (mg N}_2\text{O kg}^{-1} \text{ de grãos)} = \frac{\text{Emissão acumulada de N}_2\text{O}}{\text{Rendimento do grão}}.$$

O fator de emissão (FE) foi calculado pela equação segundo Rezaei Rashti *et al.*, (2015):

$$FE(\%) = \left[\frac{F N_2O_{CN} - F N_2O_{SN}}{N \text{ aplicado}} \right] \times 100$$

- $F N_2O_{CN}$: Emissão acumulada de N_2O em sistemas com N ($\text{kg } N_2O\text{-N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$).
- $F N_2O_{SN}$: Emissão acumulada de N_2O em sistemas sem N ($\text{kg } N_2O\text{-N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$).
- $N \text{ aplicado}$: Quantidade total de N-fertilizante aplicada anualmente ao sistema em (kg N ha^{-1}).

2.7 Análise estatística

A ANOVA foi realizada para comparação dos tratamentos (PCs e fertilizante nitrogenado em cobertura). As variáveis analisadas foram os fluxos diários e acumulados de N_2O , produtividade do milho, eficiência de uso do fertilizante N (EUFN), fator de emissão (FE) e emissões de N_2O em escala de produtividade.

As emissões diárias de N_2O foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) e as demais variáveis pelo teste LSD ($p \leq 0,05$). Essas etapas foram realizadas com o software R (versão 3.4.0, R Core Team).

As emissões diárias de N_2O e as variáveis NO_3^- , NH_4^+ , EPPA e temperatura do solo foram submetidas à análise multivariada (análise de componentes principais - ACP). A correlação de Pearson foi testada para medir a correlação linear entre os dados com o auxílio do pacote FactoMineR do software R (2025) versão 3.4.0, R Core Team.

3. RESULTADOS

3.1 Fluxos diários e emissão acumulada de N_2O

Os fluxos diários de N_2O do solo sob milho em sucessão com as PCs com N e sem N estão apresentados na Figura 7. A parte sombreada em amarelo representa o período do cultivo do milho, a parte em cinza representa o período com as PCs e sem sombra representa a entressafra com resíduos vegetais. Durante o período de avaliação (01/11/2015 a 31/10/2016), os fluxos médios diários e os respectivos desvios padrões de N_2O foram de $9,84 \pm 24$, $15,91 \pm 37$, $20,04 \pm 29$ e $10,54 \pm 21 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ sem N em cobertura

no milho (Figura 7a) e com N em cobertura no milho de $25,84 \pm 29$, $26,97 \pm 34$, $27,90 \pm 35$ e $32,76 \pm 43 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (Figura 7b) para *Mucuna aterrima*, *Raphanus satives*, *Cajanus cajan* e *Crotalaria juncea*, respectivamente.

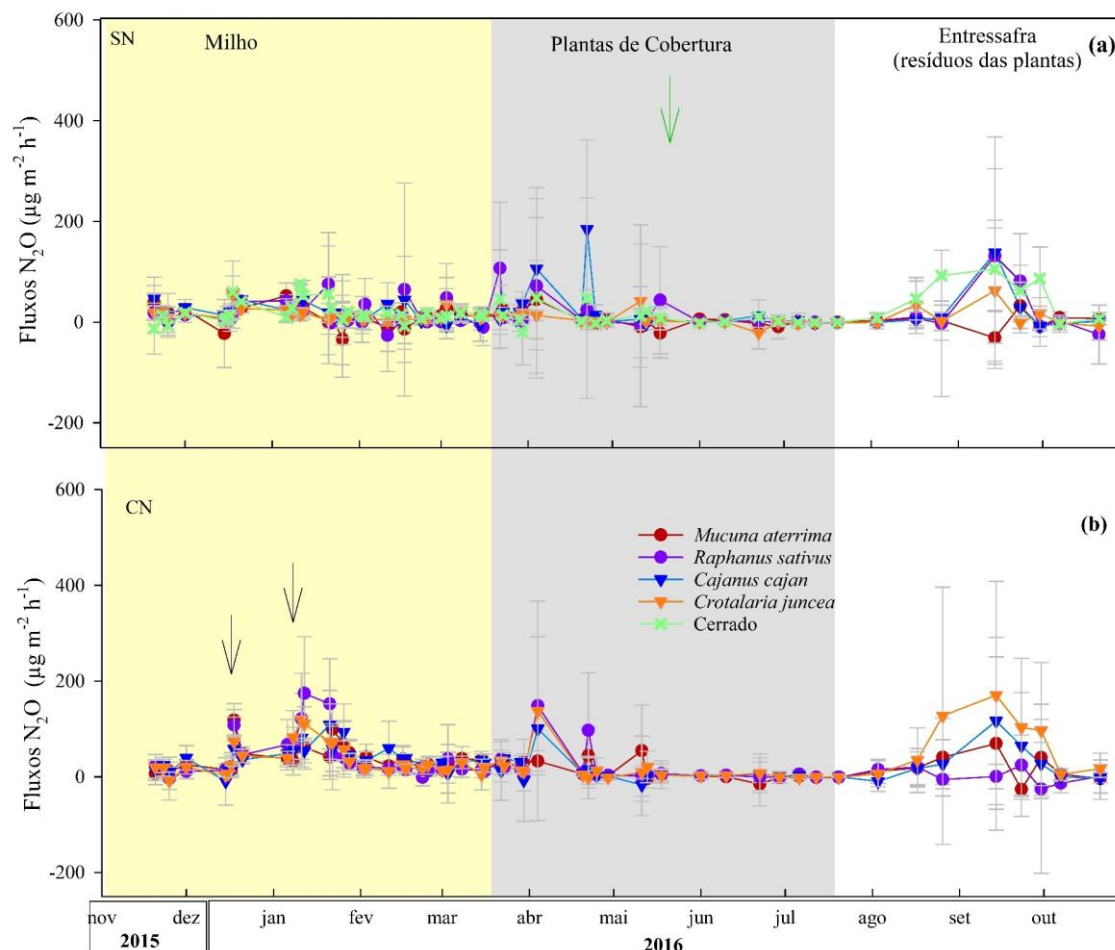


Figura 7. Fluxos de N_2O em cultivo de milho em sucessão a plantas de coberturas, sem aplicação de N em cobertura no milho (a) com aplicação de N em cobertura no milho (b). As setas pretas indicam aplicação de N em cobertura no solo via fertilizantes nas datas: 14/12/2015, 05/01/2016. A seta verde indica o corte da *Raphanus sativus*.

Os fluxos diários de N_2O foram superiores nas parcelas com aplicação de N em cobertura no milho. As emissões diárias de N_2O diferiram ($p < 0,05$) entre os tratamentos. Por exemplo, as emissões de N_2O foram maiores ($p < 0,05$) da sequência milho-*Mucuna aterrima* do que do milho-*Cajanus cajan* nas subparcelas CN (18 de dezembro de 2015), enquanto as emissões de N_2O foram maiores ($p < 0,05$) do milho-*Cajanus cajan* do que do milho-*Mucuna aterrima* e do milho-*Crotalaria juncea* nas subparcelas CN (22 de abril de 2016).

Da mesma forma, as emissões de N_2O foram maiores ($p < 0,05$) do milho-*Raphanus sativus* do que do milho-*Mucuna aterrima* e do milho-*Cajanus cajan* (12 de

janeiro de 2016), enquanto o milho-*Raphanus sativus* produziu menos emissões do que outros tratamentos nas subparcelas CN (16 de março de 2016).

Os valores de emissão acumulada de N₂O, nos diferentes tratamentos e doses estão apresentados na Tabela 1. Nas parcelas com aplicação de N-fertilizante a *Crotalaria juncea* foi o tratamento que obteve maior emissão total acumulada ($p < 0,05$) e a *Cajanus cajan* menor emissão (Tabela 1).

Tabela 1. Média e desvio padrão ($\pm$) de N₂O acumulado em kg ha⁻¹ do milho (safra), cultivado após as plantas de cobertura (safrinha) e Entressafra (resíduos das plantas) com e sem aplicação de N-fertilizante em sistema plantio direto no Cerrado.

	<i>Mucuna aterrima</i>	<i>Raphanus sativus</i>	<i>Cajanus cajan</i>	<i>Crotalaria juncea</i>	Cerrado
	SN kg ha ⁻¹				
Milho	0,40 ($\pm$ 0,05) aB	0,58 ($\pm$ 0,25) aB	0,58 ($\pm$ 0,03) aA	0,42 ($\pm$ 0,09) aB	0,18 ($\pm$ 0,04)
PCs	-0,04 ($\pm$ 0,16) aA	0,11 ($\pm$ 0,14) aA	0,14 ($\pm$ 0,05) aA	0,03 ($\pm$ 0,16) aA	0,06 ($\pm$ 0,41)
Entressafra	0,36 ($\pm$ 0,17) aA	0,80 ($\pm$ 1,09) aA	0,95 ($\pm$ 0,56) aA	0,38 ($\pm$ 0,29) aB	1,24 ($\pm$ 0,96)
Total	0.55 ($\pm$ 0.23) aA	1.47($\pm$ 0.74) aA	0.54 ($\pm$ 3.20) aA	0.83 ($\pm$ 0.41) aA	0.81 ($\pm$ 1.06)
	CN kg ha ⁻¹				
Milho	1,04 ($\pm$ 0,03) abA	1,16 ($\pm$ 0,18) aA	0,75 ($\pm$ 0,48) bA	0,96 ($\pm$ 0,02) abA	-
PCs	0,11 ($\pm$ 0,16) aA	0,13 ($\pm$ 0,08) aA	-0,03 ($\pm$ 0,05) aA	0,08 ($\pm$ 0,04) aA	-
Entressafra	0,93 ($\pm$ 0,12) bA	0,54 ($\pm$ 0,07) cA	0,97 ($\pm$ 0,11) bA	1,93 ($\pm$ 0,17) aA	-
Total	1.79 ($\pm$ 0.66) bA	1.76 ($\pm$ 0.44) bA	0.12 ($\pm$ 0.50) cA	2.95 ($\pm$ 0.87) aA	

Letras minúsculas nas linhas apresentam diferença estatísticas entre tratamentos, letras maiúsculas representam diferença estatísticas entre as doses (SN e CN) ao nível de 5% pelo teste de LSD.

As emissões acumuladas de N₂O na fase milho, as parcelas sem aplicação de N-fertilizante, não apresentaram diferenças entre os tratamentos. Nas parcelas com aplicação de N em cobertura no milho, *Raphanus sativus* apresentou maiores valores de N₂O acumulado ($p < 0,05$) que *Cajanus cajan*.

Na comparação entre com e sem aplicação de N em cobertura, as médias N₂O acumulado na fase milho foram maiores ($p < 0,05$) para as parcelas com aplicação N para todos os tratamentos com exceção da *Cajanus cajan*. Com aplicação de N os tratamentos tiveram valores superiores para todos as culturas com exceção do *Cajanus cajan* ($p < 0,05$). As emissões acumuladas de N₂O para o período das PCs não diferem estatisticamente entre tratamentos, com e sem a adição de N em cobertura no milho.

No tratamento com a aplicação de N em cobertura no milho, os maiores valores de N₂O acumulado ($p < 0,05$) na entressafra foram observados sob *Crotalaria juncea* em relação aos demais tratamentos. A *Crotalaria juncea* resultou nas maiores emissões de N₂O para a parcela com aplicação de N comparada com e sem N, tanto na entressafra quanto total (anual).

3.2 Variáveis edafoclimáticas e interação com emissão de N₂O

Em relação às demais variáveis edafoclimáticas ou co-variáveis, o N mineral nas formas NO₃⁻ e NH₄⁺ com e sem aplicação de N em cobertura no milho estão apresentados na Figura 8. As médias dos teores de NO₃⁻ do solo sem N em cobertura no milho foram de 10,10, 7,30, 8,57 e 9,21 mg kg⁻¹, respectivamente. Com N em cobertura no milho de 11,80, 13,12, 9,46 e 10,83 mg kg⁻¹ no solo sob *Mucuna aterrima*, *Raphanus sativus*, *Cajanus cajan* e *Crotalaria juncea* (Figura 8, a e b), respectivamente. Os teores de NH₄⁺ sem N em cobertura no milho foram de 6,95, 6,83, 6,68 e 6,82 mg kg⁻¹, respectivamente. Com aplicação de N em cobertura no milho de 8,88, 8,81, 8,57 e 10,77 mg kg⁻¹ para no solo sob *Mucuna aterrima*, *Raphanus sativus*, *Cajanus cajan* e *Crotalaria juncea*, respectivamente. Sem aplicação de N em cobertura no milho 4,95, 3,49, 4,62 e 4,02 mg kg⁻¹ e com N em cobertura no milho de 13,21, 10,76, 10,25 e 10,28 mg kg⁻¹ (Figura 8, c e d), respectivamente.

Os maiores picos de emissões de N₂O nos tratamentos avaliados foram de 51,91, 131,43, 184,72 e 62,38 µg m⁻² h⁻¹ sem N em cobertura no milho e 118,49, 174,12, 116,59 e 170,43 µg m⁻² h⁻¹ com N em cobertura no milho para *Mucuna aterrima*, *Raphanus sativus*, *Cajanus cajan* e *Crotalaria juncea*, respectivamente (Figura 8). Esses maiores picos ocorreram com valores de NO₃⁻ entre 4,29 e 10,03 mg kg⁻¹ sem N e com N em cobertura no milho entre 3,87 e 34,97 mg kg⁻¹ e teores de NH₄⁺ entre 5,54 e 9,01 mg kg⁻¹ sem N e com N em cobertura no milho entre 5,26 e 12,44 mg kg⁻¹ (Figura 8).

A temperatura do solo nos tratamentos estudados esteve entre 18,26 °C e 33,40 °C, com amplitudes menores na estação seca.

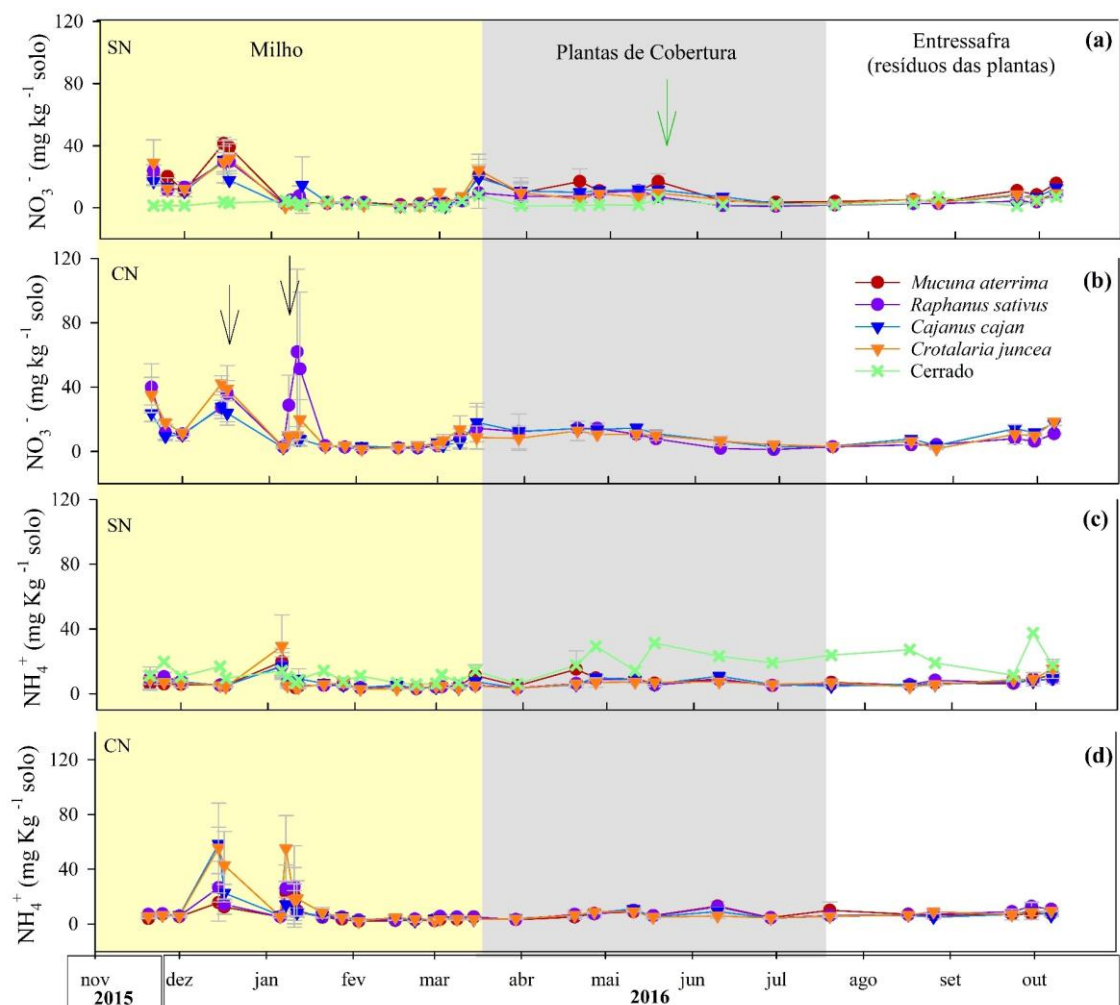


Figura 8. Concentrações de nitrato (NO_3^-) sem aplicação de N em cobertura no milho (a) com aplicação de N em cobertura no milho (b); e amônio (NH_4^+) sem aplicação de N em cobertura no milho (c) com aplicação de N em cobertura no milho (d). As setas pretas indicam aplicação de N em cobertura no solo via fertilizantes nas datas: 14/12/2015, 05/01/2016. A seta verde indica o corte da *Raphanus sativus*.

A maior emissão de N_2O no tratamento *Cajanus cajan* 184,72 mg kg^{-1} N_2O (22/04/2016) sem N em cobertura no milho foi detectada com temperatura do solo de 24,82 °C, enquanto nas demais parcelas com N em cobertura no milho; esses picos ocorreram em temperaturas do solo de 27,51°C e 28,50 °C (Figuras 9. c e d).

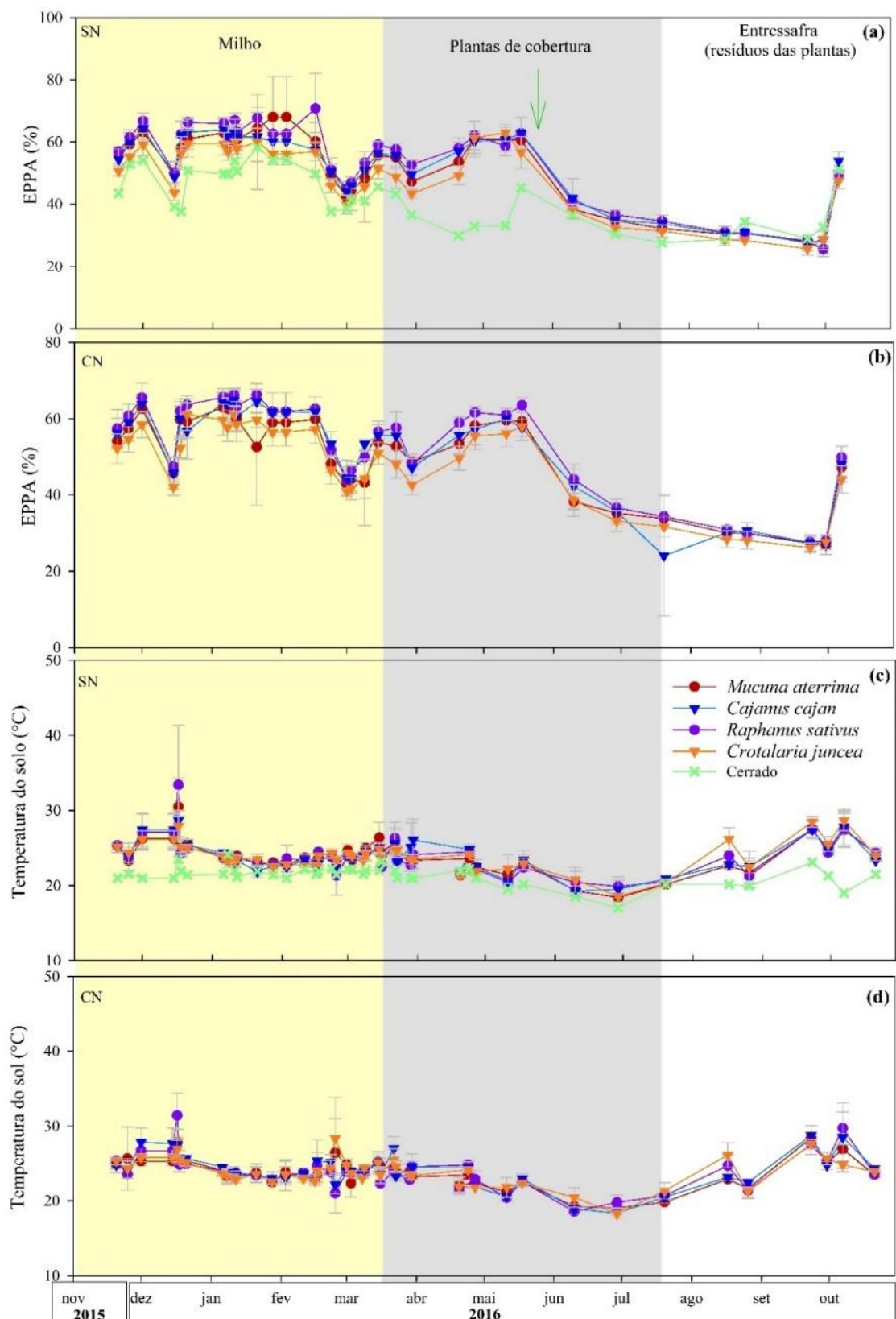


Figura 9. Espaço poroso preenchido por água (EPPA) sem aplicação de N (a) com aplicação de N (b); temperatura média do solo sem aplicação de N (c) com aplicação de N (d); em cultivo de milho em sucessão à plantas de cobertura e cerrado nativo. A seta verde indica o corte da *Raphanus sativus*.

De acordo com a Figura 10, com os dados de N_2O e as variáveis ambientais a soma da ACP1 e ACP2 explicaram a variação sem N em cobertura no milho de 95,7% e com N em cobertura no milho de 88,5%. A leitura espacial mostra que a variável N_2O se correlacionou com todas as variáveis, independente do manejo. No tratamento sem N em cobertura no milho a *Raphanus sativus* se distanciou das demais espécies e com N em cobertura no milho não houve agrupamento das PCs.

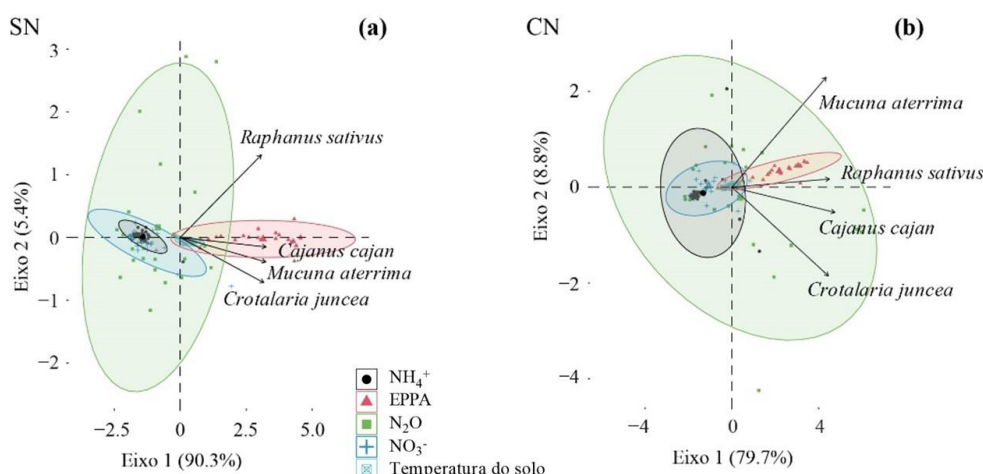


Figura 10. Análise de componentes principais relacionadas das variáveis ambientais relacionadas ao N_2O , sem N em cobertura no milho (a) e com N em cobertura no milho (b) em sucessão às plantas de cobertura e cerrado, Planaltina, DF, Brasil.

3.3 Produtividade do milho, emissões de N_2O em escala do rendimento, eficiência do uso de fertilizantes nitrogenado (EUFN) e fator de emissões (FE).

A produtividade do milho não apresentou variações entre os tratamentos com aplicação de N em cobertura no milho (Tabela 2). No tratamento sem aplicação de N em cobertura no milho, sob *Mucuna aterrima* obteve maior produtividade que o milho sob *Raphanus sativus*. Em geral, as maiores produtividade de milho ($p < 0,05$) foram obtidas nas parcelas com aplicação de N em cobertura no milho.

As emissões acumuladas de N_2O em escala de rendimento não apresentaram diferenças entre os tratamentos do milho em sucessão às PCs, sem e com aplicação de N em cobertura no milho. Em relação as parcelas com aplicação de N em cobertura no milho, *Mucuna aterrima* teve média mais que dobro que as parcelas sem aplicação de N, que mostram as maiores emissões de N_2O em escala de rendimento.

Tabela 2. Média e desvio padrão ($\pm$) da produtividade do milho, índice de emissão N₂O por produtividade em diferentes tratamentos.

Plantas de Cobertura	Produtividade		Emissões de N ₂ O em escala de rendimento	
	S/N	C/N	S/N	C/N
	kg ha ⁻¹		mg N ₂ O kg ⁻¹ grãos	
<i>Mucuna aterrima</i>	9021 ($\pm$ 348) aA	10202 ($\pm$ 780) aA	45 ($\pm$ 8) aB	103 ($\pm$ 10) aA
<i>Raphanus sativus</i>	7607 ($\pm$ 183) bB	10199 ($\pm$ 116) aA	75 ($\pm$ 31) aA	113 ($\pm$ 17) aA
<i>Cajanus cajan</i>	8773 ($\pm$ 656) abA	10036 ($\pm$ 53) aA	66 ($\pm$ 2) aA	75 ($\pm$ 48) aA
<i>Crotalaria juncea</i>	8856 ($\pm$ 944) abB	10349 ($\pm$ 876) aA	48 ($\pm$ 14) aA	94 ($\pm$ 7) aA

Letras minúsculas nas colunas apresenta diferença estatísticas entre tratamentos, letras maiúsculas nas linhas entre representam diferença estatísticas entre as doses (SN e CN) a nível de 5% pelo teste de LSD.

A *Crotalaria juncea* destacou-se com a maior eficiência de N (EUFN) em relação a *Mucuna aterrima* e a *Raphanus sativus* ($p < 0,05$) (Tabela 3). Quanto ao FE de N₂O, não houve diferença entre os tratamentos, com variações entre 0,13 à 0,49%.

Tabela 3. Média e desvio padrão ($\pm$) da eficiência do uso de fertilizantes nitrogenados e do fator de emissão de N₂O em diferentes tratamentos.

Plantas de Cobertura	Eficiência de uso do fertilizante nitrogenado (EUFN)	Fator de Emissão (FE)
	kg grão kg N Aplicado ⁻¹	(%)
<i>Mucuna aterrima</i>	13 ($\pm$ 2) b	0,49 ($\pm$ 0,08) a
<i>Raphanus sativus</i>	11 ($\pm$ 3) b	0,44 ($\pm$ 0,36) a
<i>Cajanus cajan</i>	15 ($\pm$ 2) ab	0,13 ($\pm$ 0,15) a
<i>Crotalaria juncea</i>	20 ($\pm$ 2) a	0,42 ($\pm$ 0,21) a

Letras minúsculas nas colunas apresentam diferença estatísticas entre tratamentos, a nível de 5% pelo teste de LSD.

4. DISCUSSÃO

4.1 Efeito das plantas de cobertura e adubação nitrogenada em cobertura no milho nas emissões de N₂O

As emissões de N₂O na região do Cerrado são resultantes das interações envolvendo o manejo do solo, rotação e uso de PCs no SPD, além de fertilização nitrogenada e variáveis edafoclimáticas (Campanha *et al.*, 2019; de Oliveira *et al.*, 2023). O uso de PCs e rotação de culturas, além de melhorar os atributos bioquímicos e físicos do solo e aproveitar diferentes períodos de crescimento e colheita das plantas protegendo o solo de agentes de degradação também é capaz de mitigar as emissões de N₂O nas condições edafoclimáticas do Cerrado (de Carvalho *et al.*, 2016; de Figueiredo *et al.*, 2018; de Oliveira *et al.*, 2023).

Vários estudos sobre emissões de GEE na região do Cerrado estão disponíveis, principalmente focados na comparação de sistemas convencionais com e sem aplicação

de N-fertilizante em SPD com sucessão as PCs, como usado em nosso estudo (dos Santos *et al.*, 2016), para comprovar a hipótese de que o sistema resiliente de conservação é mais eficiente na redução das emissões de N₂O (de Carvalho *et al.*, 2016; de Figueiredo *et al.*, 2018; de Oliveira *et al.*, 2023; da Silva *et al.*, 2024).

No entanto, estudos que testam o efeito de diferentes PCs em SPD para mitigar as emissões de N₂O nas condições edafoclimáticas do Cerrado ainda são escassos (de Carvalho *et al.*, 2016; de Oliveira *et al.*, 2023). As PCs após o milho podem mitigar as emissões de N₂O em SPD com melhorias na ciclagem de N por meio da entrada contínua de resíduos vegetais, com o mínimo de perturbação do solo (Carvalho *et al.*, 2024). A variação média das emissões de N₂O (-34 a 198 $\mu\text{g m}^{-2}\text{h}^{-1}$) (Figura 8) calculada neste experimento foi menor do que os valores encontrados para o milho em um sistema de plantio convencional sem PCs na região do Cerrado (21 a 622,77 $\mu\text{g m}^{-2}\text{h}^{-1}$) (Campanha *et al.*, 2019; Filho *et al.*, 2020).

A mineralização de N do solo (Figura 9 a, b) indica uma maior taxa de nitrificação devido ao EPPA estar próximo a 60% (Amadori *et al.*, 2022) e aos maiores fluxos de N₂O observados após os eventos de fertilização nitrogenada com aplicação de ureia (Huang *et al.*, 2019; Campanha *et al.* 2019). As relações entre as formas inorgânicas (NO₃⁻ e NH₄⁺) e suas interações com as emissões de N₂O foi relatada em outros estudos na região do Cerrado (Campanha *et al.*, 2019; de Oliveira *et al.*, 2023; de Carvalho *et al.*, 2024).

Somado a esse fator, a precipitação expressa em EPPA % (Amadori *et al.*, 2022; de Oliveira *et al.*, 2023) e a temperatura do ar também resultam em efeitos combinados quanto às emissões de N₂O (da Silva *et al.*, 2024). No ano de amostragem, as chuvas foram mais irregulares com maiores concentrações em período mais curto de tempo (Figura 4). Em cultivos de sequeiro, os períodos de irregularidade pluviométrica (períodos de seca) associados com a fertilização nitrogenada, também podem promover perdas de N para atmosfera na forma de N₂O (Omonode *et al.*, 2017) devido ao umedecimento e secagem do solo denominado de "efeito Birch".

As emissões de N₂O na entressafra que coincidem com o período de seca do Cerrado sendo explicado pelo "efeito Birch", que durante a estação seca ocorre a dormência ou inatividade dos microrganismos e com o retorno de precipitação pluviométrica no início do período chuvoso, o reumedecimento do solo promove ativação dos microrganismos que se encontravam inertes (Birch, 1958) Esse fenômeno afeta a dinâmica do N, e nas condições de veranico, como as que ocorrem no Cerrado

(veranicos), que são intervalos de seca no período chuvoso, no retorno da precipitação pluviométrica ocorrem picos de emissão de N₂O (da Silva *et al.*, 2024).

As variações na temperatura também desempenham um papel significativo nesse processo (Borken & Matzner, 2009; Butterbach-Bahl *et al.*, 2013). O “efeito Birch” nas emissões diárias de N₂O do presente trabalho coincidiram com o aumento em média do EPPA de 29% para 48% e temperatura do solo de 21°C para 27°C. Durante a estação de estresse hídrico ou seca na região do Cerrado, os restos culturais na entressafra podem alterar com precipitação ou irrigação esse comportamento “efeito Birch”, pode ocorrer entre os meses de setembro e outubro a depender de reumedecimento.

Em síntese, as emissões de N₂O resultaram da interação de fatores (PCs, N e variáveis edafoclimáticas), com destaque para o N adicionado via fertilizante na cultura do milho (Coombs *et al.*, 2017; Campanha *et al.*, 2019; de Carvalho *et al.*, 2024). Os valores obtidos no presente trabalho estão abaixo das emissões de N₂O para cultura de milho; em outros estudos como de Campanha *et al.* (2019) obtiveram em SPD com aplicação de N valores de aproximadamente 400 µg m⁻² h⁻¹, que pode ser devido ao EPPA alto de 60% (Davidson *et al.*, 2009), que contribuiu para taxas mais elevadas de nitrificação nessas condições adequadas de aeração que são predominante em latossolos (de Carvalho *et al.*, 2016; Shafreen *et al.*, 2021; Carvalho *et al.*, 2024).

4.2. Emissões acumuladas de N₂O

Os resultados das emissões acumuladas de N₂O obtidos foram inferiores a 2,0 kg ha⁻¹, independente da fase (milho, PCs e entressafra), em conformidade com os padrões estabelecidos para as emissões de N₂O para sistemas de cultivos de milho no Cerrado, onde as emissões de N₂O são em geral são inferiores a 5 kg ha⁻¹ (Meurer *et al.*, 2016; Figueiredo *et al.*, 2018; Campanha *et al.*, 2019; de Sousa *et al.*, 2021).

A maior emissão de N₂O acumulado no período do milho foi para o *Raphanus sativus* em relação ao *Cajanus cajan*, ambos com a adição de N-fertilizante em cobertura do milho (Tabela 1). Esse resultado pode ser explicado pelas concentrações mais baixas de lignina e lignina:N de *Raphanus sativus* (46 g kg⁻¹) com rápida decomposição em relação ao *Cajanus cajan* (85 g kg⁻¹) (de Carvalho *et al.*, 2024), que resulta em decomposição mais lenta e, conseqüentemente, em menores emissões de N₂O.

A variação nas emissões acumuladas de N₂O é atribuída, na safra, à aplicação em cobertura de fertilização nitrogenada na cultura do milho e, na entressafra, à

mineralização dos resíduos vegetais das PCs. Na safra, os maiores teores de nitrato durante a estação chuvosa (de Carvalho *et al.*, 2024) em períodos de temperaturas mais altas (da Silva *et al.*, 2024). Nessas condições, a umidade e temperatura do solo favorecem a atividade decompositora, que acelera a ciclagem de nutrientes, reduzindo os níveis de C orgânico e NH_4^+ no solo e libera mais NO_3^- (de Oliveira *et al.*, 2023). Esse aumento na atividade de microrganismos nitrificantes em solos da região de clima tropical contribui significativamente para o incremento das emissões de N_2O (Barth *et al.*, 2019; Amadori *et al.*, 2022), resultados que também foram mostrados na presença de N de cobertura, neste trabalho.

4.3. Emissões de N_2O em escala de rendimento, eficiência de N e fator de emissão de N_2O

Embora a aplicação de N em cobertura no milho tenha incrementado significativamente sua produtividade, o uso de PCs em sucessão em SPD também se mostrou uma estratégia eficaz para a sustentabilidade desse agroecossistema (Chahal; Van Eerd, 2023; de Oliveira *et al.*, 2023), ao representar uma alternativa para mitigar as emissões de N_2O . As emissões em escala de rendimento, sem aplicação N em cobertura no milho estão inferiores aos valores observados em outros trabalhos (Figueiredo *et al.*, 2018; Campanha *et al.*, 2019; de Oliveira *et al.*, 2023), como em sistema de rotação de milho com *Cajanus cajan* (78,32 a 254,88 por kg^{-1} de grão).

Apenas nas parcelas com milho em sucessão à *Mucuna aterrima* foram obtidas as maiores emissões de N_2O em escala de rendimento com aplicação de N. Com isso, para produzir a mesma quantidade de grãos, o sistema com N em cobertura no milho emitiu 129% a mais que o sem aplicação de N em cobertura. A apresentação dos dados de emissões de N_2O em escala de rendimento permite analisar o quanto do aumento nas emissões foi compensado por maiores rendimentos de grãos (Canisares *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2023).

Os efeitos observados no presente trabalho referentes ao aumento da EUNF e da produtividade de grãos podem ser atribuídos, principalmente, ao aumento de N mineral para a cultura do milho, em razão da melhor ciclagem desse nutriente com uso de PCs (Coombs *et al.*, 2017; De Carvalho, *et al.*, 2024). Para o milho cultivado em sucessão à *Crotalaria juncea*, a maior disponibilidade de N se deve razão C:N dos resíduos vegetais

dessa PC (Carvalho, *et al.*, 2012), que favorece a mineralização de N, consequentemente, favorece sua produtividade.

No geral, o fator emissão de N₂O relacionado a fertilizante está de acordo com as estimativas globais de 0,45 % para milho (Wang *et al.*, 2022) (Figura 11), porém, a sucessão de milho à *Mucuna aterrima*, resultou em fator de emissão acima desse valor (Tabela 3). De acordo IPCC, o EF padrão para aplicação de N de fertilizantes minerais é de 1% para emissões diretas de N₂O com uma faixa de incerteza de 0,30–3,00% (IPCC, 2007). Há necessidade de estimativas mais precisas da fração de N-fertilizante emitida como N₂O para regiões tropicais (Figura 11), já que esse é um parâmetro básico para a elaboração de inventários nacionais de emissões de GEEs, respaldando ainda mais estudos nessa temática.

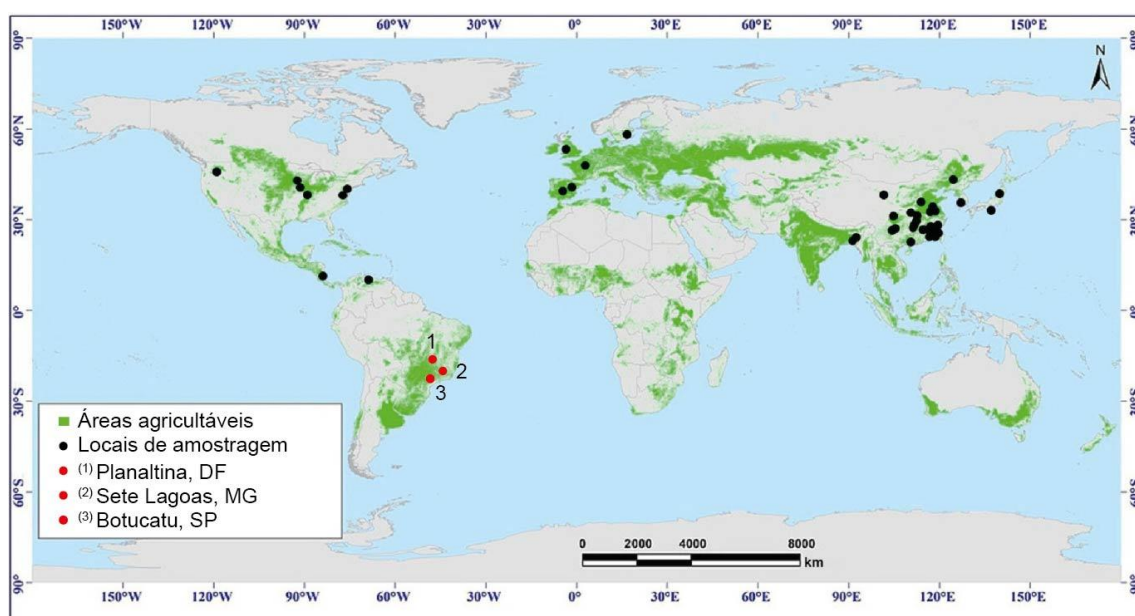


Figura 11. Síntese das emissões de óxido nitroso em terras agrícolas fertilizadas globais a partir de fatores de emissão específicos da cultura (Wang *et al.*, 2022). Adaptação com alguns estudos para o Brasil (1) = presente estudo; (2) (Campanha *et al.*, 2019; (3) Canisares *et al.*, 2021).

Na região do Cerrado em plantio de milho solteiro Campanha *et al.* (2019), mostraram fator de emissão de 0,79% e Martins *et al.*, (2015) de 0,20%; enquanto Canisares *et al.*, (2021) obtiveram 0,18 a 0,23 % com milho solteiro e consorciado com *B. brizantha* e *B. humidicola* na região da Mata Atlântica (Figura 11). Canisares *et al.* (2021) justificam que esses baixos valores de fator de emissão podem ser atribuídos, pelo menos parcialmente, ao baixo pH do solo e outra razão pode ser a rápida absorção do fertilizante N, aplicado no milho que estava em um estágio de crescimento ativo.

A baixa quantidade de informações para fornecer fatores de emissão específicos do país (emissões diretas e indiretas de N₂O) é uma das principais incertezas no desenvolvimento de inventários de GEE para países de clima tropical, como no Brasil. Uma das limitações para se determinar o fator de emissão de N₂O é que se torna necessário avaliar as emissões de N₂O em condições com e sem aplicação de fertilizantes nitrogenados (Campanha *et al.*, 2019). A obtenção desses dados é um passo essencial para o Brasil em direção ao uso de equações do IPCC Nível 2 com EF específicos do país em vez de equações do Nível 1 com EF padrão; esse estudo vem de encontro com essa necessidade, no sentido de melhorar a precisão das emissões de N₂O em seu inventário nacional.

5. CONCLUSÃO

As emissões de N₂O nas condições tropicais do Cerrado, provenientes para o período milho em sucessão às PCs em SPD foram maiores com a adição N em cobertura no milho do que sem N em cobertura, sem diferenças para o ano agrícola. Fatores como fertilização com N, N-mineral do solo (nitrato e amônio), temperatura do solo, umidade do solo (Precipitação/EPPA) influenciam as emissões diárias e totais, além do processo de decomposição dos resíduos vegetais que exercem forte influência nas emissões de N₂O do solo. No geral, as emissões cumulativas de N₂O foram inferiores a 3 kg ha⁻¹ nos períodos de avaliação e as parcelas de milho fertilizado e não fertilizado apresentaram emissões de N₂O em escala de rendimento semelhantes. De acordo com este estudo, a maior eficiência do uso do fertilizante nitrogenado foi para o tratamento milho-*Crotalaria juncea* em relação à milho-*Mucuna aterrima* e milho-*Raphanus sativus*. O fator de emissão de N₂O com os valores obtidos em nosso estudo estão de acordo com as estimativas globais estipulados pelo IPCC (<1%).

6. REFERÊNCIAS

ALVES, B.J.R. *et al.* Selection of the most suitable sampling time for static chambers for the estimation of daily mean N₂O flux from soils. **Soil Biology and Biochemistry**, [s. l.], v. 46, p. 129–135, 2012. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071711004147?casa_token=8PcI52yTydsAAAAA:HNcC0nmaFpAo89WR05LLT-v-mw5SV1cPaX8IILtlrzTJFmg2Vp4QdtPt7iZ89QsYu1RnLh-eXMg Acesso em: 7 dez. 2023.

AMADORI, C. *et al.* Nitrous oxide and methane emissions from soil under integrated farming systems in southern Brazil. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 828, p. 154555, 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722016485?casa_token=ErVrjEz6icgAAAAA:jQvIZvajmqqU0DDWik8gydRaAnFJVr2JqSh2c3hC453SMpF9jIQaUa7z1QJ9lmvdw9lUNtBcubk Acesso em: 12 nov. 2024.

BARBOSA, L.R. *et al.* Organic matter compartments in an Ultisol under integrated agricultural and livestock production systems in the Cerrado. **Ciência Rural**, [s. l.], v. 52, n. 10, p. 20200845, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/mVdDrYDmXS8TwbLtmPfwzSF/?lang=en>. Acesso em: 26 out. 2023.

BARTH, G. *et al.* Conversion of ammonium to nitrate and abundance of ammonium-oxidizing-microorganism in Tropical soils with nitrification inhibitor. **Scientia Agricola**, [s. l.], v. 77, n. 4, p. e20180370, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sa/a/stQtpnjrT3K5KxbrbZHCR4t/?lang=en>. Acesso em: 28 ago. 2024.

BIRCH, H.F. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. **Plant and Soil**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 9–31, 1958. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01343734>. Acesso em: 3 set. 2024.

BORKEN, W.; MATZNER, E. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 15, n. 4, p. 808–824, 2009. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1365-2486.2008.01681.x>. Acesso em: 3 set. 2024.

BUTTERBACH-BAHL, K. *et al.* Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? *Philosophical Transactions of the Royal Society B. Biological Sciences*, [s. l.], v. 368, n. 1621, 2013. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2013.0122>. Acesso em: 22 jun. 2024.

CAMPANHA, M.M. *et al.* Effect of soil tillage and N fertilization on N₂O mitigation in maize in the Brazilian Cerrado. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 692, p. 1165–1174, 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896971933428X?casa_token=DGOM7iRISO8AAAAA:IcoGWqEUh-ok56UfZZpMlrTtOtiSvu1s81L634fgl3L7UPmbQTDeiBCtyFFImrMRGKTmUxdgdm Acesso em: 14 ago. 2024.

CANISARES, L.P. *et al.* Maize-Brachiaria intercropping: A strategy to supply recycled N to maize and reduce soil N₂O emissions? **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s. l.], v. 319, p. 107491, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016788092100195X> Acesso em: 7 dez. 2023.

CARVALHO, A.M. De *et al.* Chemical composition of cover plants and its effect on maize yield in no-tillage systems in the Brazilian savanna. **Crop and Pasture Science**,

[s. l.], v. 63, n. 12, p. 1075–1081, 2013. Disponível em: <https://www.publish.csiro.au/cp/CP12272>. Acesso em: 12 nov. 2024.

DE CARVALHO, A.M. *et al.* N₂O emissions from sugarcane fields under contrasting watering regimes in the Brazilian Savannah. *Environmental Technology & Innovation*, v. 22, p. 101470, 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186421001188?casa_token=zH5VY9ATgv0AAAAA:yzXBGGubd_1N-heQDc77CLuDjl2Tt0bAkXvI5buTY3eP0Y_dQRYV2XpNlfluVzGNEtvSRdrAhA. Acesso em: 23 nov. 2024.

CARVALHO, A.M. de *et al.* Cover Crops Affect Soil Mineral Nitrogen and N Fertilizer Use Efficiency of Maize No-Tillage System in the Brazilian Cerrado. **Land**, [s. l.], v. 13, n. 5, p. 693, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/13/5/693/htm>. Acesso em: 13 ago. 2024.

CHAHAL, I.t; VAN EERD, L.L. Do Cover Crops Increase Subsequent Crop Yield in Temperate Climates? A Meta-Analysis. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 15, n. 8, p. 6517, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/8/6517/htm>. Acesso em: 28 ago. 2024.

CHANG, B. *et al.* Quantifying biological processes producing nitrous oxide in soil using a mechanistic model. **Biogeochemistry**, [s. l.], v. 159, n. 1, p. 1–14, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10533-022-00912-0>. Acesso em: 26 jun. 2024.

CLARK, M. *et al.* The Role of Healthy Diets in Environmentally Sustainable Food Systems. **Food and Nutrition Bulletin**, [s. l.], v. 41, n. 2_suppl, p. 31S-58S, 2020. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0379572120953734>. Acesso em: 27 out. 2023.

COOMBS, C. *et al.* Legume cover crop management on nitrogen dynamics and yield in grain corn systems. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 201, p. 75–85, 2017. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s43016-021-00225-9>. Acesso em: 12 nov. 2024.

CRIPPA, M. *et al.* Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. **Nature food**, v. 2, n. 3, p. 198–209, 2021. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s43016-021-00225-9>. Acesso em: 27 nov. 2023.

DA SILVA, F.A.M. *et al.* Effects of agricultural management and of climate change on N₂O emissions in an area of the Brazilian Cerrado: Measurements and simulations using the STICS soil-crop model. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s. l.], v. 363, p. 108842, 2024. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/ngeo608>. Acesso em: 14 ago. 2024.

DAVIDSON, E.A. The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860. **Nature Geoscience**, [s. l.], v. 2, n. 9, p. 659–662, 2009. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/ngeo608>. Acesso em: 26 jan. 2024.

DE CARVALHO, A.M. *et al.* Nitrogen oxides and CO₂ from an Oxisol cultivated with corn in succession to cover crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 51, n. 9, p. 1213–1222, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/hMkpjXwQVdqW3QTNTHQwXBp/?lang=en>. Acesso em: 12 nov. 2024.

DE CARVALHO, A.M. *et al.* Cover plants with potential use for crop-livestock integrated systems in the Cerrado region. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 46, n. 10, p. 1200–1205, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/jSmKyXpSpTb3vcyndgsjkbH/?lang=en>. Acesso em: 6 jun. 2025.

DE CARVALHO, A.M. *et al.* Manejo de plantas de cobertura na floração e na maturação fisiológica e seu efeito na produtividade do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 50, n. 7, p. 551–561, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/PPHQc7qRRGNmNnWPPhfBcdy/>. Acesso em: 27 out. 2023.

DE CARVALHO, A.M. *et al.* Understanding the Relations between Soil Biochemical Properties and N₂O Emissions in a Long-Term Integrated Crop–Livestock System. **Plants**, 2024, Vol. 13, Page 365, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 365, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/13/3/365/htm>. Acesso em: 22 jun. 2024.

DE FIGUEIREDO, C.C. *et al.* Relationships between soil organic matter pools and nitrous oxide emissions of agroecosystems in the Brazilian Cerrado. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 618, p. 1572–1582, 2018. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717326864?casa_token=cfx-6Eq8C10AAAAA:m6ipGkBCnRAjGnw4ylLCtvMKHEy6n587kaA4XtseH4CmL0LSOhr4deW7P1bxL7MeskZrExgRglM Acesso em: 14 ago. 2024.

DE OLIVEIRA, A.D. *et al.* “Effects of soil management, rotation and sequence of crops on soil nitrous oxide emissions in the Cerrado: A multi-factor assessment”. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 348, p. 119295, 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479723020832?casa_token=U5y-3Lm9y6IAAAAA:FdxILRmx4cP4wkWSNvzo9aYlK75TGbaLSDAKAXCsGFpG08725rHeeaqlXlZ89hOqlrApeSGMDzY Acesso em: 28 ago. 2024.

DE SOUSA, T.R. *et al.* N₂O emissions from soils under different uses in the Brazilian Cerrado - A review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 45, p. e0210093, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/xFpQg73pfx64yDM96qqjXC/>. Acesso em: 7 dez. 2023.

DOBERMANN, A. Nutrient use efficiency - measurement and management. In: IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices, Part 1. General principles of Fertilizer Best Management Practices. IFA - Intl. **Fertilizer Industry**, [s. l.], p. 1–30, 2007. Disponível em: <https://digitalcommons.unl.edu/agronomyfacpub/1442/> Acesso em: 12 nov. 2024.

DOS SANTOS, I.L. *et al.* Soil N₂O emissions from long-term agroecosystems: Interactive effects of rainfall seasonality and crop rotation in the Brazilian Cerrado. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s. l.], v. 233, p. 111–120, 2016. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880916304303?casa_token=0eOoevEDUIQAAAAA:-p-4L270Uw0faCMTb3UfvY55DCMYgKyq1Ls-VUTqbe3h0dC3kdF9T2Ot8muLX48bOcU_IITDv8 Acesso em: 12 nov. 2024.

FAN, C. *et al.* Residual effects of four-year amendments of organic material on N₂O production driven by ammonia-oxidizing archaea and bacteria in a tropical vegetable soil. **The Science of the total environment**, [s. l.], v. 781, 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33798878/>. Acesso em: 28 ago. 2024.

FILHO, E.G. de O. *et al.* Nitrous oxide (N₂O) emissions in Savanah agrosystems. *Australian Journal of Crop Science*, v. 14, n. 12, p. 1970-1976, 2020. Disponível em: <https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/informit.801199149292133> Acesso em: 28 ago. 2024.

FAYE, B. *et al.* Climate change impacts on European arable crop yields: Sensitivity to assumptions about rotations and residue management. **European Journal of Agronomy**, [s. l.], v. 142, p. 126670, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030122002180> Acesso em: 28 ago. 2024.

HUANG, R. *et al.* Variation in N₂O emission and N₂O related microbial functional genes in straw- and biochar-amended and non-amended soils. **Applied Soil Ecology**, [s. l.], v. 137, p. 57–68, 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0929139318310163?casa_token=rL19xf9CvHkAAAAA:po6WDQ6N-IH3d7ot2Bdsb8eWWHFP6ZzeAul4vF1341KNhfFuaGBJw-3WSKxvTanyx_MCATf_DtY Acesso em: 1 out. 2024.

IPCC, INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Fourth Assessment Report (AR4), Working Group I**. Geneva, Switzerland.: [s. n.], 2007.

IPCC. Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima Mudança do Clima 2023 **Relatório Síntese Um Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima**. [s. l.], 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf. Acesso em: 28 ago. 2024.

ISLAM, M. *et al.* Leaching and volatilization of nitrogen in paddy rice under different nitrogen management. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, [s. l.], p. 1–19, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10705-024-10361-w>. Acesso em: 27 jun. 2024.

KIM, D.G.; GILTRAP, D.; SAPKOT., T.B. Understanding response of yield-scaled N₂O emissions to nitrogen input: Data synthesis and introducing new concepts of background yield-scaled N₂O emissions and N₂O emission-yield curve. **Field Crops Research**, [s.

[.], v. 290, p. 108737, 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429022003082?casa_token=KijAA15Hrr8AAAAA:vERHu4wzBn8j1XLhYtk0RwsNS2gQ7y7j7tPINBCAGvJ3wlwVe vi9PwSIRAVwI7YvlzSuWAAcqzk Acesso em: 28 ago. 2024.

LI, Y. *et al.* Increased nitrous oxide emissions from global lakes and reservoirs since the pre-industrial era. **Nature Communications**, 2024, 15:1, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 1–11, 2024. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-024-45061-0>. Acesso em: 27 jun. 2024.

LI, Y.; JU, X.; WU, D. Transient nitrite accumulation explains the variation of N₂O emissions to N fertilization in upland agricultural soils. **Soil Biology and Biochemistry**, [s. l.], v. 177, p. 108917, 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071722003741?casa_token=qsOSemdYfw8AAAAA:F8a5B14wdPz2ERH7lqVz-cpw0vnm0AP73Ph-dm6TflTcHWXmW9V02FXIUMzC2hGBnfCQniJOaag Acesso em: 28 ago. 2024.

MARTINEZ-FERIA, R.A. *et al.* Linking crop- and soil-based approaches to evaluate system nitrogen-use efficiency and tradeoffs. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s. l.], v. 256, p. 131–143, 2018. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880918300021?casa_token=Zw wqcpzV1N0AAAAA:7nvqTvpCuMo3iTvFbVtPE1MaNyF9V8fO1U-8PqP33sqCQr4d28DbYjdwYtsXWr2HsTdP3QHPkDg Acesso em: 27 jun. 2024.

MARTINS, M.R. *et al.* Nitrous oxide and ammonia emissions from N fertilization of maize crop under no-till in a Cerrado soil. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 151, p. 75–81, 2015. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198715000616?casa_token=oE Ug3PTE_20AAAAA:A6RkCh_CYJTkmYWGqwnorE0i8WkGIIQ6dlqck09NqLB1JLiki edjcEJaHSd-AfxpPS1X3nkij2UA Acesso em: 12 nov. 2024.

MCTI, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Sistema de estimativa de emissões de emissões e remoções de gases do efeito estufa (SEEG). Emissões Totais. **Observatório do Clima** 2024. [s. l.], 2023. Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission. Acesso em: 5 jun. 2024.

MELO, T.R. de *et al.* Perception and level of soil and water conservation practices adoption by farmers in a watershed. **Revista Ciência Agronômica**, [s. l.], v. 54, n. 1, p. e20218307, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rca/a/KxGthcV4XQ87HjHb99BMHcH/?lang=en>. Acesso em: 26 out. 2023.

MEURER, K.H.E. *et al.* Direct nitrous oxide (N₂O) fluxes from soils under different land use in Brazil—a critical review. **Environmental Research Letters**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 023001, 2016. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/2/023001>. Acesso em: 28 ago. 2024.

NOVAIS, G.T. **Climas do Brasil: classificação climática e aplicações**. 1. ed. Porto Alegre, RS: Totalbooks, 2023. Disponível em:

https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/51/o/Livro_dos_Climas_do_Brasil_-_final.pdf
Acesso em: 28 ago. 2024.

OMONODE, R.A. *et al.* Achieving lower nitrogen balance and higher nitrogen recovery efficiency reduces nitrous oxide emissions in North America's maize cropping systems. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 8, p. 250532, 2017. Disponível em: www.frontiersin.org. Acesso em: 1 out. 2024.

REZAEI RASHTI, M. *et al.* Fertiliser-induced nitrous oxide emissions from vegetable production in the world and the regulating factors: A review. **Atmospheric Environment**, [s. l.], v. 112, p. 225–233, 2015. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135223101530039X?casa_token=yT0ZWESgPUMAAAAA:45qHs95-UiteQY-oRRjoPhc9pzkyNl9c46WanKsCxG4hodZ3lcJ94zS4ZvkQLVGhF54_Z-K9zDU Acesso em: 12 nov. 2024.

ROCHA, K.F. *et al.* Fate of 15N fertilizer applied to maize in rotation with tropical forage grasses. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 238, p. 35–44, 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429019301893?casa_token=h85YwqJkKAcAAAAA:5LnP9TbKbTHpozUVCr2ffSoS9lxHbVYyrBlyX3zNAUjzA6RCQV2ghvpbE6zgq5KA07N4fd0t2xk Acesso em: 27 jun. 2024.

SALAMA, K.; GEYER, M. Plastic Mulch Films in Agriculture: Their Use, Environmental Problems, Recycling and Alternatives. **Environments**, 2023, Vol. 10, Page 179, [s. l.], v. 10, n. 10, p. 179, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3298/10/10/179/htm>. Acesso em: 26 out. 2023.

SALOMÃO, P.E.A. *et al.* The Importance of Straw No-Tillage System for Soil Restructuring and Organic Matter Restoration. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. e154911870–e154911870, 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/1870>. Acesso em: 26 out. 2023.

SANTOS, H.G. dos *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. [S. l.]: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.agroapi.cnptia.embrapa.br/portal/assets/docs/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf> Acesso em: 27 out. 2023.

SHAFREEN, M. *et al.* Physiology and Distribution of Nitrogen in Soils. [s. l.], p. 3–31, 2021. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-71206-8_1. Acesso em: 1 out. 2024.

SILVA, D. de F. *et al.* Análise de nitrato e amônio em solo e água. - **Portal Embrapa**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. ISSN 1518-4277. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/881730/analise-de-nitrato-e-amonio-em-solo-e-agua>. Acesso em: 9 dez. 2023.

STEUDLER, P.A. *et al.* Influence of nitrogen fertilization on methane uptake in temperate forest soils. **Nature**, 1989 341:6240, [s. l.], v. 341, n. 6240, p. 314–316, 1989. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/341314a0>. Acesso em: 9 dez. 2023.

TIAN, H. *et al.* A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. **Nature**, 2020, 586:7828, [s. l.], v. 586, n. 7828, p. 248–256, 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41586-020-2780-0>. Acesso em: 28 ago. 2024.

VENTEREA, R. T.; MAHARJAN, B.; DOLAN, M.S. Fertilizer Source and Tillage Effects on Yield-Scaled Nitrous Oxide Emissions in a Corn Cropping System. **Journal of Environmental Quality**, [s. l.], v. 40, n. 5, p. 1521–1531, 2011. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2134/jeq2011.0039>. Acesso em: 27 ago. 2024.

WANG, Y. *et al.* A synthesis of nitric oxide emissions across global fertilized croplands from crop-specific emission factors. **Global change biology**, [s. l.], v. 28, n. 14, p. 4395–4408, 2022. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35403777/>. Acesso em: 1 out. 2024.

CAPÍTULO 2

ESTOQUES DE CARBONO E FRAÇÕES DA MATERIA ORGÂNICA DO SOLO EM SISTEMA MILHO/SOJA EM SUCESSÃO ÀS PLANTAS DE COBERTURA COM MANEJO DE N-FERTILIZANTE



Mucuna-preta (*Mucuna aterrima*)



Nabo-forrageiro (*Raphanus sativus*)



Guandu (*Cajanus cajan*)



Crotalária-juncea (*Crotalaria juncea*)

Fotos: autor.

RESUMO

O uso de plantas de cobertura (PCs) é uma estratégia eficaz para fornecer nutrientes e armazenar C no solo. Com a hipótese que o uso de PCs em um sistema de transição de milho/soja em SPD, altera os estoques de C do solo, e reduz as emissões de N₂O sob cultivo do milho em SPD. Dessa forma, o objetivo desse estudo foi avaliar os estoques e frações de C no solo cultivado numa transição de milho e soja com PCs em sucessão durante dez anos. O experimento está localizado na Embrapa Cerrados, em delineamento de blocos casualizados e parcelas subdivididas, representadas por diferentes PCs (*Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea*, *Raphanus sativus* e *Mucuna aterrima*) e as subparcelas com e sem N-fertilizante na cultura do milho. As amostragens foram realizadas em 2013 nos tratamentos de PCs e no Cerrado nativo, em 2018 e 2024 apenas no solo sob os tratamentos com plantas de cobertura. Além de analisar as frações químicas da matéria orgânica do solo (MOS) em 2024, foram avaliadas a produtividade de milho (2013 e 2018) e soja (2024), além da biomassa das PCs. As amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm. O C do solo foi determinado por combustão a seco, que utiliza um analisador elementar (CHNS). As frações químicas da MOS foram analisadas nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm somente em 2024. Em relação aos tratamentos, não houve diferença entre os estoques de C do solo nos três anos estudados. Os teores das frações da MOS ácidos fúlvicos (AF), húmicos (AH) e humina (HUM) foram influenciados pelo efeito do N aplicado em cobertura no milho, conforme as profundidades. De maneira geral, a *Mucuna aterrima* e a mais indicada para acumular ΔC . A produção de matéria seca da *Crotalaria juncea* foi menor ($p < 0,05$) em relação às demais PCs. A produtividade soja não se diferiu entre os tratamentos. O aumento do estoque de C no solo na sucessão milho/PCs, quando comparado a sucessão soja/PCs, pode ser explicado em partes devido ao aporte de resíduos durante a fase de milho (2013-2018), caracterizado por uma alta relação C/N. Em sistemas com soja-PC, a introdução de PCs com alta C/N é essencial para evitar a depleção dos estoques de C. Em sucessão ao milho, as leguminosas são mais favoráveis aos estoques de C, o que demonstra a importância desse aporte de N para o C do solo. O AF foi superior nas parcelas sem N nas profundidades de 0-10 e 20-40, enquanto AH foi superior nas subparcelas com N nas camadas 10-20 e 20-40 cm. O efeito da fertilização nitrogenada do milho não afetou a produtividade da soja. Portanto, é essencial avaliar o manejo de N no sistema agrícola, com consequente impacto na mitigação de GEE.

Palavras chaves: *Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea*, *Mucuna aterrima* e *Raphanus sativus*, mudanças climáticas, sistema plantio direto.

CARBON STOCKS AND FRACTIONS OF SOIL ORGANIC MATTER IN A MAIZE/SOYBEAN SYSTEM IN SUCCESSION TO COVER CROPS WITH NITROGEN FERTILIZER MANAGEMENT

ABSTRACT

The use of cover crops (CCs) is an effective strategy for supplying nutrients and storing C in the soil. The hypothesis is that the use of CCs in a maize/soybean transition system under NTS alters soil C stocks and reduces N₂O emissions. Therefore, the objective of this study was to evaluate soil C stocks and fractions cultivated in a maize–soybean transition system with CCs in succession over ten years. The experiment is located at Embrapa Cerrados, in a randomized block design with split plots, represented by different CCs (*Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea*, *Raphanus sativus*, and *Mucuna aterrima*) and subplots with and without N fertilizer in the maize crop. Sampling was carried out in 2013 in the CC treatments and in the native Cerrado, and in 2018 and 2024 only in the soil under the cover crop treatments. In addition to analyzing the chemical fractions of soil organic matter (SOM) in 2024, maize (2013 and 2018) and soybean (2024) productivity, as well as CC biomass, were evaluated. Soil samples were collected at depths of 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80, and 80-100 cm. Soil C was determined by dry combustion using an elemental analyzer (CHNS). The chemical fractions of SOM were analyzed in the 0–10, 10–20, and 20–40 cm layers only in 2024. Regarding the treatments, there was no difference between soil C stocks in the three years studied. The levels of the SOM fractions fulvic acid (FA), humic acid (HA), and humin (HUM) were influenced by the effect of topdressing N on maize, depending on the depth. In general, *Mucuna aterrima* is the most suitable for accumulating ΔC. The dry matter production of *Crotalaria juncea* was lower ($p < 0.05$) compared to the other CCs. Soybean yield did not differ between treatments. The increase in soil C stocks in the maize/CC succession, when compared to the soybean/CC succession, can be partially explained by the input of residues during the maize phase (2013-2018), characterized by a high C:N ratio. In soybean–CC systems, the introduction of CCs with high C:N is essential to avoid depletion of C stocks. In succession to maize, legumes are more favorable to C stocks, which demonstrates the importance of this N input to soil C. FA was higher in plots without N at depths of 0-10 and 20-40 cm, while HA was higher in subplots with N at depths of 10–20 and 20-40 cm. The effect of maize nitrogen fertilization did not affect soybean yield. Therefore, it is essential to evaluate N management in the agricultural system, with its consequent impact on GHG mitigation

Keywords: *Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea*, *Mucuna aterrima* e *Raphanus sativus*, climate change, no-till.

1. INTRODUÇÃO

A fertilização, principalmente a nitrogenada, adotada para atingir o máximo potencial produtivo das culturas resulta em aporte de biomassa e pode incrementar estoques de carbono (C) no solo (Farias *et al.*, 2020; Ogino *et al.*, 2020). Segundo a literatura, a cultura do milho apresenta baixa eficiência no uso de N, especialmente em solos tropicais, com uma absorção de apenas 50% do N aplicado como fertilizante (Rocha *et al.*, 2019; Canisares *et al.*, 2021; de Carvalho *et al.*, 2024).

As culturas de soja (*Glycine max* L.) e milho (*Zea mays* L.) são de grande relevância para o Brasil, que ocupa a posição de segundo maior exportador de alimentos do mundo (George *et al.*, 2019; Vieira *et al.*, 2020; Bigolin; Talamini, 2024;). Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), o país é o maior produtor mundial de soja e a previsão para áreas cultivadas de soja e milho em 2024/25 são de 47.356,5 e 21.011,2 milhões de hectares, respectivamente (CONAB, 2024).

A rotação de culturas e uso das plantas de cobertura (PCs) pode melhorar a qualidade do solo, aumentar a produtividade dessas culturas milho/soja (Hertel; Baldos, 2016) e evitar a degradação dos solos e expansão da fronteira agrícola no Cerrado (Babu *et al.*, 2023). O uso de PCs associado ao sistema plantio direto (SPD) contribui para estimular atividade de organismos (fungos, bactérias e macrofauna) (Kelly *et al.*, 2021; Locatelli *et al.*, 2025) e aumentar os estoques de C no solo associados ao incremento de produção e produtividade dos sistemas agrícolas (Ramos *et al.*, 2020; de Carvalho *et al.*, 2021, 2023; Carvalho *et al.*, 2024).

As PCs contribuem com acúmulo de C no perfil do solo, principalmente por meio das suas raízes que em geral se desenvolvem até as camadas mais profundas do solo (Pisarčík *et al.*, 2024; Locatelli *et al.*, 2025). As PCs, como *Crotalaria juncea*, *Mucuna aterrima* e *Cajanus cajan*, e *Raphanus sativus*, possuem capacidade de rebrota, raízes pivotantes, e tolerância à seca (de Carvalho *et al.*, 2023; Cherubin *et al.*, 2024). Além disso, proporcionam cobertura do solo, prevenindo contra erosão do solo e liberação prolongada de nutrientes, consequentemente, com sedimentação nos recursos hídricos (Passos *et al.*, 2018; Abdalla *et al.*, 2019).

O uso das PCs visa aumentar o fornecimento de N para as culturas subsequentes (Lizarazo *et al.*, 2020; Tei *et al.*, 2020), por meio do processo de fixação biológica de N (FBN) e da decomposição dos resíduos vegetais (Carvalho *et al.*, 2013; de Carvalho *et al.*, 2023), que contribuem com o aumento das frações químicas da matéria orgânica do

solo (MOS), como os ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH) e humina (HUM) (Souza *et al.*, 2024). A HUM é a fração insolúvel das substâncias húmicas (SHs), o AH dissolve-se em condições alcalinas, enquanto o ácido fúlvico (AF) é solúvel em condições ácidas e alcalinas (Abbas *et al.*, 2020). As MOS estão entre os principais indicadores da qualidade do solo, principalmente, em Latossolos altamente intemperizados. Além disso, assumem relevância para as mudanças climáticas, já que os solos representam o maior reservatório de C na superfície terrestre, consequentemente, com potencial para reduzir emissões de GEE (Ramos *et al.*, 2020).

As mudanças no uso e a cobertura do solo impactam no ciclo do C (Chang *et al.*, 2022; Carvalho *et al.*, 2024), e consequentemente nas emissões de GEE (Artaxo, 2020). Estima-se que os solos contenham aproximadamente 24.000 Gt de C orgânico, que representa mais de 99% da biomassa terrestre (Blakemore, 2024), enquanto os estoques de biomassa acima e abaixo do solo contêm cerca de 2.400 Gt de C. Portanto, os estoques de C orgânico do solo são importantes, pois armazenam mais C do que o presente na atmosfera e na vegetação combinadas (Li *et al.*, 2024; Sarlaki *et al.*, 2024). Pequenas mudanças nesses reservatórios podem impactar significativamente no equilíbrio global e regional do C e provocar

Dessa forma, a partir da hipótese de que a transição milho/soja em SPD com uso de PCs promove uma maior eficiência no fornecimento de N e incrementa a produção de biomassa do sistema agrícola, consequentemente, aumenta os estoques de C do solo. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar os teores e os estoques de C, nos anos de 2013, 2018 e 2024, avaliar o delta (ΔC) e a produtividade do milho e da soja e a produção de biomassa/matéria seca das PCs nos mesmos anos. Além de avaliar as frações húmicas da MOS solo avaliadas em 2024 em experimento de longa duração, nos tratamentos com e sem N-fertilizante aplicado em cobertura para a cultura do milho.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Localização e características da área experimental

A área experimental está localizada na Embrapa Cerrados (CPAC), em Planaltina-DF, com coordenadas geográficas são 15°35'50.12" S, 47°42'26.97" W e altitude de 973 m. O delineamento experimental é em blocos ao acaso com parcelas subdivididas e três repetições. As parcelas possuem as dimensões de 12 m x 8 m, enquanto as subparcelas de 6 m x 8 m (Figura 12). As parcelas são representadas

pelas PCs C3: *Cajanus Cagan* (L.) Millsp (Fabaceae), *Crotalaria juncea* L. (Fabaceae), *Raphanus sativus* Piper e Tracy (Fabaceae) e *Mucuna aterrima* L. (Brassicaceae) e as subparcelas pela aplicação ou não de N em cobertura no milho (CN e SN).

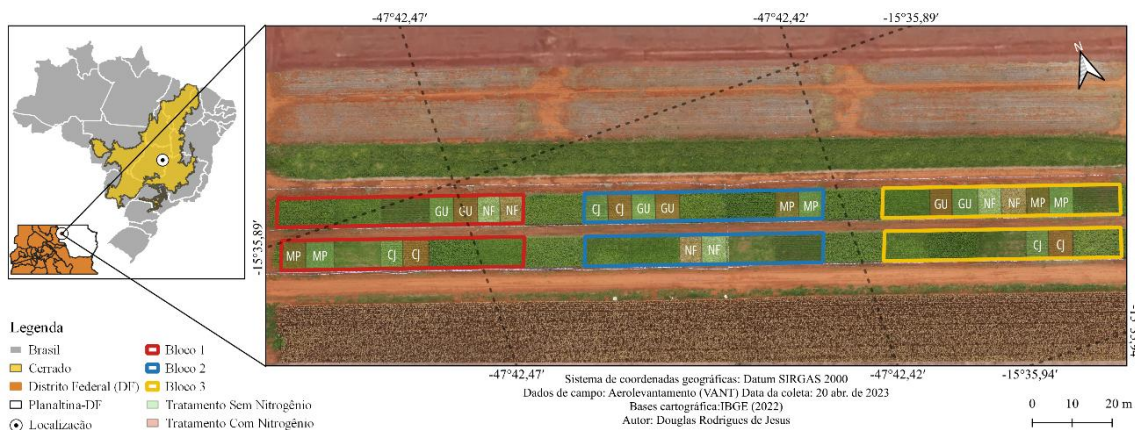


Figura 12. Mapa de Localização da área experimental na Embrapa Cerrados, em Planaltina, DF, Brasil.

Os dados meteorológicos obtidos em 2013 foram: temperatura máxima em média de 28,17 °C e a mínima de 16,45 °C, com uma precipitação anual média de 1.318,10 mm. Em 2018, a temperatura máxima média foi de 28,63 °C e a mínima foi de 15,89 °C, com precipitação anual de 1.349,40 mm. Em 2024, a temperatura máxima média foi de 29,46 °C e a mínima foi de 16,37 °C, enquanto a precipitação anual totalizou 1.278,20 mm.

As análises químicas e físicas da camada superficial do solo (0-10 cm) da área experimental amostrados em 2024 estão descritas na tabela 5.

Tabela 4. Atributos químicos do solo da área experimental dos diferentes sistemas com o uso de Plantas de cobertura em sucessão ao milho/soja.

Atributos		<i>Mucuna aterrima</i>	<i>Cajanus cajan</i>	<i>Crotalaria juncea</i>	<i>Raphanus sativus</i>
		----- 0-10 cm -----			
MO	dag kg ⁻¹	2,75	3,10	2,91	2,82
pH	(H ₂ O)	5,46	5,50	5,54	5,53
H+Al	mg dm ⁻³	6,88	6,68	6,35	5,78
Al	mg dm ⁻³	0,10	0,06	0,06	0,02
Ca	mg dm ⁻³	2,82	2,97	2,72	3,26
Mg	mg dm ⁻³	1,47	1,51	1,43	1,46
SB	mg dm ⁻³	4,90	5,26	5,01	5,66
CTC-T	mg dm ⁻³	11,78	11,94	11,37	11,44
V	%	41,35	43,90	43,60	49,43
Zn	mg L ⁻¹	4,83	4,80	4,65	5,66

S/N: sem aplicação de N-fertilizante; C/N: com aplicação de N-fertilizante; Matéria orgânica (MO); potencial hidrogeniônico (pH); Acidez potencial (H+Al); Alumínio trocável (Al); Cálcio trocável (Ca); Magnésio trocável (Mg); Soma de bases (SB); Capacidade de troca de cátions total (CTC-T); Saturação por bases (V); Zinco disponível (Zn).

2.2. Histórico, delineamento e práticas de manejo do experimento

Entre 1995 e 2005, a área encontrava-se em pousio. Em 2005, o experimento com PCs em sucessão ao milho (*Zea mays* L.) foi instalado com objetivo de avaliar os efeitos do corte (manejo) na floração e na maturação das PCs (de Carvalho *et al.*, 2011; Carvalho *et al.*, 2013). Em 2010/2011, as parcelas com PCs em sucessão ao milho foram subdivididas em com e sem aplicação de N em cobertura na cultura do milho. O milho híbrido 30F53VYHR foi semeado em novembro e colhido em março em SPD (diretamente sobre os resíduos das PCs). 5 sementes por m⁻¹ espaçadas em 0,5 metro, espaçadas a 0,75 m, com uma população de cerca de 65.000 plantas ha⁻¹. No momento do plantio, todas as parcelas e subparcelas receberam 500 kg ha⁻¹ de NPK 4-30-16, 2 kg ha⁻¹ de Zn (ZnSO₄ 7H₂O) e 10 kg ha⁻¹ de FTE BR 12 como fonte de micronutrientes (3,2% S, 1,8% B, 0,8% Cu, 2,0% Mn, 0,1% Mo e 9,0% Zn). Na adubação em cobertura do milho, nas subparcelas, foram aplicados 130 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia, dividida em duas doses de 65 kg ha⁻¹ nos estádios fenológicos V4 e V8 de desenvolvimento do milho.

Tabela 5. Descrição da sequência de cultivos na área experimental conforme os anos agrícolas.

Ano agrícola	Cultura de inverno	Cultura Principal
2005/2021	Plantas de cobertura	Milho (<i>Zea mays</i> L.)
2021/2024	Plantas de cobertura	Soja (<i>Glycine max</i> L.)

2.3 Amostragem e análises de solo

A amostragem de solo para cálculo do estoque de C foi realizada nos anos de 2013 para os tratamentos e no Cerrado nativo. Em 2018 e 2024, as amostras foram coletadas no solo sob as PCs após a colheita do milho e da soja, respectivamente. O solo foi coletado nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm. Em cada subparcela, foram coletadas 8 subamostras para compor uma amostra composta até 20 cm e, a partir daí, foram utilizadas 5 subamostras. Após a colheita da soja, em 2024 foram coletadas as amostras de solo para determinação das frações MOS as SHs nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm com oito subamostras para formar uma amostra composta para cada profundidade.

Para a determinação da densidade do solo foram coletadas amostras de solo indeformadas em trincheiras com 120 cm de profundidade no Cerrado Nativo. As amostras foram retiradas das camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm do solo em uma área de Cerrado nativo localizada a aproximadamente 50 metros da área experimental (de Carvalho *et al.*, 2021). As amostras foram coletadas em duplicata em cada profundidade, com a utilização lados opostos da trincheira e anéis de aço inoxidável. As amostras foram secas em estufa a 105 °C, e a densidade do solo foi calculada com base no volume interno dos cilindros.

2.4 Determinação do carbono total e cálculo do estoque de carbono

Para a avaliação do teor de C total, foram passadas em malha de 2 mm, trituradas em um pilão de almofariz e o solo foi peneirado com peneira de malha de 150 µm (Cambardella; Elliott, 1992; Snyder; Trofymow, 1984).

Para a determinação do C total do solo as amostras foram pesadas em balança analítica (~39 a 41 mg) e, posteriormente, foram colocadas sobre folhas de estanho, de 35 x 35 mm. Em seguida, foram encapsuladas para serem acondicionadas no carretel do equipamento e posteriormente foi feita a montagem das colunas de combustão e redução, com o uso do CHNS (Analisador Elementar da Macro Vario Cube-Elementar) modelo 2400 Series II CHNS/O por meio de combustão a seco, onde o método fundamenta-se na oxidação das amostras em elevadas temperaturas (1000°C).

Após a combustão, o gás passou por uma coluna de redução aquecida a cerca de 625 °C, contendo cobre, que remove o oxigênio residual não consumido. A detecção do CO₂ e N₂ é realizada por condutividade térmica, com os gases separados em uma coluna de cromatografia gasosa. Este processo ocorre em um tubo de quartzo de combustão, com o gás O₂ com pureza de 99,998% como agente transportador. Após a combustão, toda a matéria orgânica foi transformada em CO₂, sendo a quantidade de CO₂ gerada durante a combustão automaticamente é correlacionada com a quantidade de C elementar presente na amostra, por meio da detecção feita por um sensor infravermelho. O armazenamento de C foi calculado por meio da camada equivalente (Sisti *et al.*, 2004), seguindo a equação:

$$\text{Estoque de C} = \left(\frac{CT \times DS \times h}{10} \right),$$

Onde:

- Estoque de C: Expresso em Mg ha^{-1} ,
- CT (Carbono total): Expresso em g kg^{-1} ,
- DS (Densidade do solo): Expresso em g cm^{-3} ,
- h (Profundidade da camada de solo): Expresso em cm,

Após a avaliação dos estoques de C nos três períodos 2013, 2018 e 2024, o delta (ΔC) foi calculado pelas diferenças entre os estoques de: 2013 - 2018; 2013 - 2024; e, 2018 - 2024.

2.5 Fracionamento químico da matéria orgânica (Substâncias húmicas)

As amostras de solo foram secas ao ar e peneiradas em malha de 2 mm. Para a análise do fracionamento químico da MOS, a determinação das frações húmicas foi realizada de acordo com (Swift, 2018) pelo procedimento de solubilidade diferencial.

Para a solução de hidróxido de sódio (NaOH) foram pesados 4 g que foram dissolvidos em 600 mL de água destilada e ajustado para o volume de 1 L $0,1 \text{ mol L}^{-1}$. As soluções de dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) foram preparadas nas concentrações de ($0,1667 \text{ mol L}^{-1}$) para a HUM e ($0,042 \text{ mol L}^{-1}$) para as frações AH e AF.

O sulfato ferroso amoniacal ($0,25 \text{ mol L}^{-1}$) para a HUM e ($0,03 \text{ mol L}^{-1}$) para as frações AH e AF foi preparado dissolvendo-se sulfato ferroso amoniacal (sal de Mohr) em 600 mL de água destilada com 10 mL de ácido sulfúrico concentrado, ajustando o volume para 1 L.

Uma alíquota de 1 g de solo foi transferida para um tubo Falcon com 20 mL de NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$. A solução foi agitada por 4 horas a 80 rpm, repousou por 12 horas e foi centrifugada a 3.800 rpm por 30 min. O sobrenadante foi transferido para um recipiente, e 20 mL de NaOH foram adicionados ao material retido, que foi submetido a nova agitação por 2h30min. e centrifugado por mais 30 min a 3.800 rpm. Os sobrenadantes combinados formaram o extrato alcalino contendo AH e AF. O precipitado restante, identificado como HUM, foi seco em estufa a $50\text{-}60^\circ\text{C}$.

O pH do extrato alcalino foi ajustado para 1,0-1,5 com ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado. Após centrifugação por 20 minutos a 3.800 rpm, o sobrenadante (AF) foi separado do precipitado (AH). O AH foi tratado com 20 mL de NaOH $0,5 \text{ mol L}^{-1}$,

homogeneizado e o volume ajustado para 50 mL com água (H₂O) destilada. Os teores de C nas frações AH, AF pelo método de Yeomans & Bremner (1988).

As amostras foram aquecidas a 140°C em bloco digestor, com o uso de dicromato de potássio (0,042 mol L⁻¹ para AF e AH; 0,167 mol L⁻¹ para HUM) seguido de titulação com sulfato ferroso amoniacal. As SHs foram calculadas com a seguinte fórmula:

$$C_{org} \text{ (g kg}^{-1}\text{)} = \frac{(V_B - V_A) \times N \times 3 \times \left(\frac{50}{I}\right)}{m}$$

em que:

- V_B : volume de solução de ferro amoniacal (SFA) consumido na titulação do branco aquecido (mL),
- V_A : volume de SFA consumido na titulação da amostra (mL),
- N : normalidade da solução de SFA (0,25 N para a HUM e 0,033 para o AF e AH),
- 3: conversão da fórmula química do íon dicromato (Cr₂O₇²⁻) para C,
- I : volume da alíquota utilizada na titulação (ml),
- m : peso do solo (g).

A equação expressa o teor de C orgânico oxidável em g kg⁻¹ de solo seco. O método consiste em aquecimento para promover a maior recuperação do C.

2.6 Produtividade do milho e soja

Para o milho, os dados apresentados são das amostragens que ocorreram em março de 2013 e 2018, enquanto para a soja, foi da colheita realizada em fevereiro de 2024. Em cada subparcela, foram feitas duas repetições com quatro linhas de 4 metros de comprimento para o milho e 3 linhas de 4 metros para a soja. A produtividade de grãos, foi calculada com os valores de umidade corrigidos para 13%. A produtividade da soja/milho (PS) foi calculada com a seguinte fórmula:

$$PS = \frac{P}{A} \times 10.000$$

Onde:

- PS é a produtividade de grãos de soja/milho (kg ha^{-1}),
- P é o peso total dos grãos de soja/milho colhidos (kg),
- A é a área da subparcela (m^2).

2.7 Biomassa das plantas de cobertura

Amostras da parte aérea das PCs para a avaliação de biomassa no presente trabalho foram coletadas em 2012, 2017 e 2023 durante a floração plena, com um amostrador de haste de ferro com dimensão de 1 m^2 , que foi colocado na superfície do solo de forma aleatória, sendo coletadas duas amostras por subparcela. Posteriormente, as amostras foram secas em estufa a 65°C até atingirem peso constante. Em sequência foram pesadas para determinar a massa seca, que foi convertida para quilogramas por hectare. A matéria seca foi calculada pela diferença entre o peso da amostra antes e depois da secagem. A obtenção da matéria seca (MS) foi realizada conforme a seguinte fórmula:

$$MS = P_f - P_i$$

Onde:

- MS é a massa seca (kg ha^{-1}),
- P_f é o peso da amostra após a secagem (kg),
- P_i é o peso da amostra antes da secagem (kg).

2.8 Análises estatísticas

Os dados referentes ao teor e estoque de C, às frações da matéria orgânica, à produtividade e à biomassa foram analisados por meio de modelos lineares mistos, com o objetivo de avaliar os efeitos fixos dos tratamentos (PCs), do manejo da adubação nitrogenada em cobertura do milho com e sem N (subparcelas) e dos anos (subsubparcelas). A adequação dos modelos foi verificada por meio de inspeção gráfica dos resíduos (resíduos versus valores ajustados, gráficos Q-Q) e de testes formais para avaliar a normalidade (Shapiro-Wilk), a homogeneidade das variâncias (teste de Breusch-Pagan), a linearidade e a independência dos erros. As médias marginais estimadas ajustadas (emmeans) foram obtidas pelo método de Kenward-Roger para o cálculo dos

graus de liberdade, com maior precisão nas inferências, especialmente em amostras pequenas (Kenward & Roger, 1997).

As comparações múltiplas entre tratamentos, doses (com e sem N em cobertura) e anos foram realizadas com ajuste de Tukey (Tukey, 1953), com o controle da taxa de erro familiar a um nível de significância de $\alpha = 0,05$. Quando aplicável, as médias ajustadas pelo método de Sidak (1967). A análise de variância (ANOVA) conduzida com forme o método de Kenward-Roger, com comparações de médias realizadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), em análises multivariadas.

A análise de componentes principais (ACP) foi realizada para um conjunto de dados do ano de 2024: Estoque de C, frações da matéria orgânica do C AF; AH e HUM na profundidade 0-40 cm, biomassa das PCs e produtividade. A ACP foi organizada de acordo com a disposição dos parâmetros, as correlações entre a variáveis, tratamentos e doses.

Todas as análises foram realizadas no software R (R Core Team, 2025; versão 4.3.3), com o uso dos pacotes: lme4 (Bates *et al.*, 2015) para ajuste dos modelos lineares mistos; emmeans (Lenth, 2024) para cálculo de médias ajustadas e comparações múltiplas; e multcomp (Hothorn *et al.*, 2008) para testes simultâneos e agrupamentos; para a execução da ACP, utilizou-se o pacote FactoMineR.

3. RESULTADOS

3.1 Densidade do solo, teores de C estoques de carbono total e frações da matéria orgânica do solo

A densidade do solo e o teor de C total obtidos nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm no solo sob cerrado nativo estão apresentados na Figura 13. A densidade do solo variou de 0,81 g cm⁻³ na superfície (0-5 cm) a 0,97 g cm⁻³ na camada de 20-40 cm, que se estabiliza em torno de 0,90 g cm⁻³ nas demais camadas (40-100 cm). Já o teor de C total no solo apresentou valores entre 17,82 g kg⁻¹ na camada de 0-5 cm e 46,14 g kg⁻¹ na camada de 20-40 cm, reduzindo-se progressivamente nas camadas mais profundas do solo.

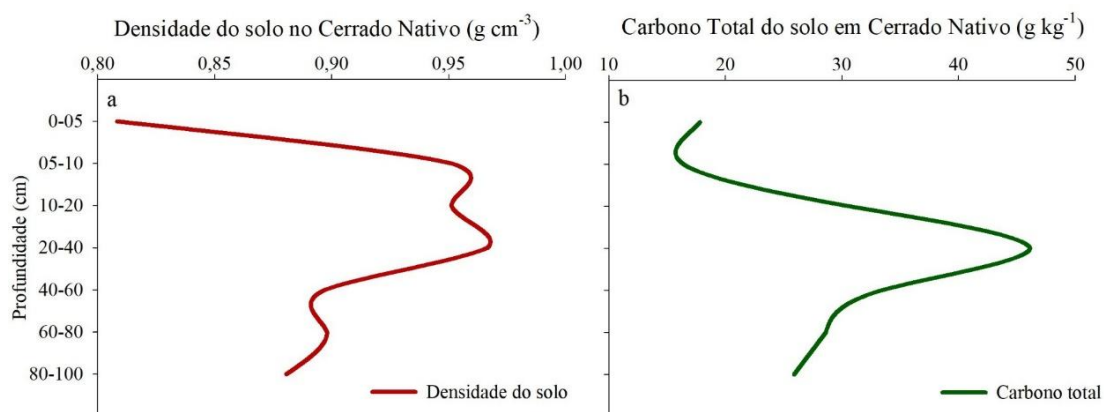


Figura 13. Densidade do solo em g cm^{-3} (a) e Carbono total do solo g kg^{-1} (b) coletados em Cerrado Nativo.

Os valores dos teores do C do solo em g kg^{-1} sob uso das PCs estão apresentados na Figura 14. Os tratamentos milho-*Raphanus sativus* e milho-*Mucuna aterrima* em 2013 e 2018 e soja-*Raphanus sativus* e soja-*Mucuna aterrima* em 2024 não apresentaram diferenças estatísticas entre os anos e as doses ($p > 0,05$) (Figura 14 a e b).

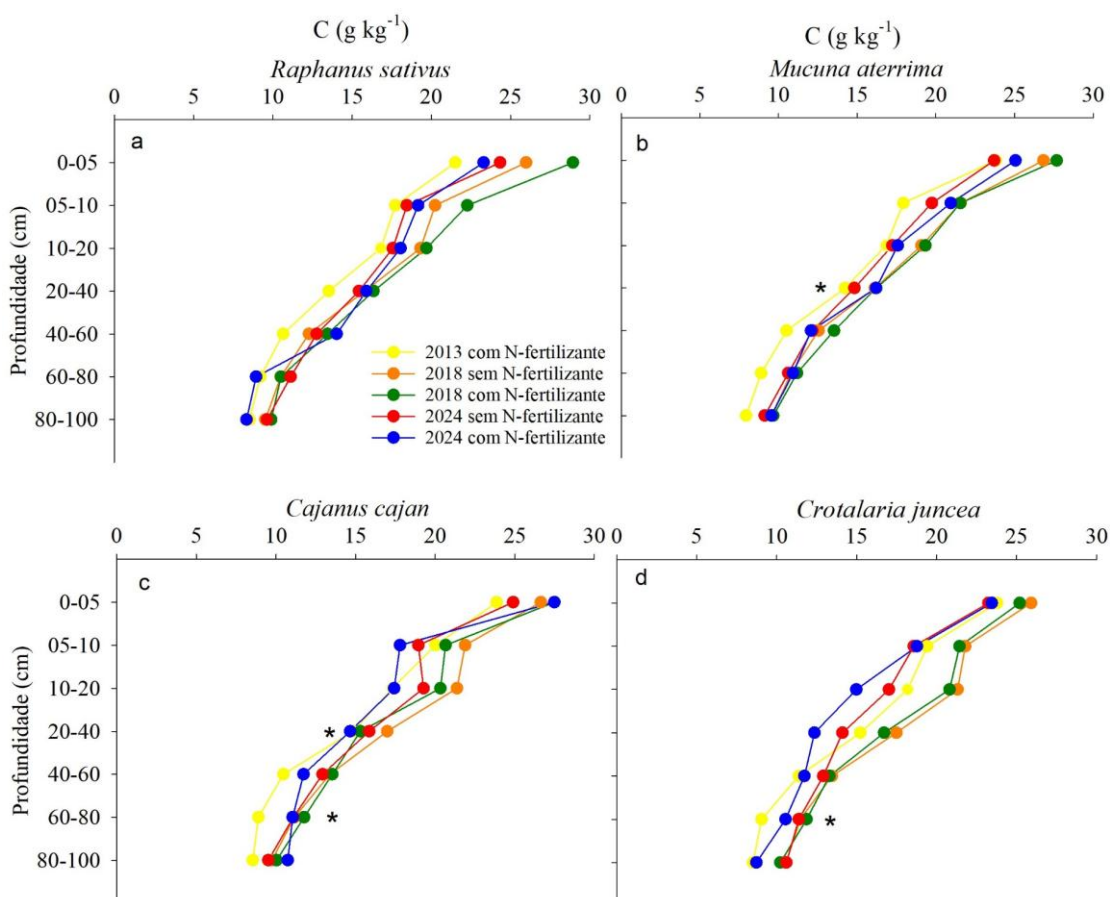


Figura 14. Teores de carbono solo (g kg^{-1}) em áreas de Plantas de Cobertura em sucessão a milho-soja, no Cerrado. Os asteriscos (*) indicam diferenças estatísticas ao nível de 5% pelo teste de Tukey.

A sucessão de milho-*Cajanus cajan* e milho-*Crotalaria juncea* em 2018 apresentou diferença entre doses ($p > 0,05$), com os maiores teores para os tratamentos com aplicação de N na profundidade 60-80 cm (Figura 14 c e d). Nos anos de 2013 e 2018 não foram observadas diferenças entre os tratamentos. No entanto, em 2024 o tratamento soja-*Mucuna aterrima* obteve maior teor de C na profundidade 20-40 cm nas parcelas com N-fertilizante em relação ao *Cajanus cajan* ($p > 0,05$) (Figura 14 b e c).

Os estoques de C no solo em Mg ha^{-1} até 100 cm para os diferentes PCs, doses e anos apresentados na Tabela 7. Em 2013, os tratamentos com adubação nitrogenada em cobertura no milho apresentaram estoques de C com variações entre 109,97 a 117,35 Mg ha^{-1} valores aproximadamente 70% abaixo dos estoques do solo sob a vegetação de cerrado nativo (198,92 Mg ha^{-1}). Não houve diferença significativa nos estoques do solo sob as PCs independentemente da presença ou não do N em cobertura no milho e do ano.

Tabela 6. Média e desvio padrão ($\pm$) dos estoques de carbono no solo (Mg ha^{-1}) em 0-100 cm

Plantas de cobertura	Estoque de Carbono no solo (Mg ha^{-1})	
	2013	
	S/N	C/N
<i>Mucuna aterrima</i>	ND	110,54 ($\pm 3,18$) a ^c
<i>Raphanus sativus</i>	ND	109,97 ($\pm 5,68$) a ^c
<i>Cajanus cajan</i>	ND	114,14 ($\pm 6,25$) a ^c
<i>Crotalaria juncea</i>	ND	117,35 ($\pm 1,21$) a ^c
Cerrado Nativo	198,92 ($\pm 13,93$)	ND
	2018	
	<i>Mucuna aterrima</i>	129,40 ($\pm 1,50$) aA ^a
	<i>Raphanus sativus</i>	126,88 ($\pm 2,10$) aA ^a
	<i>Cajanus cajan</i>	135,79 ($\pm 8,26$) aA ^a
	<i>Crotalaria juncea</i>	138,51 ($\pm 9,99$) aA ^a
	2024	
	<i>Mucuna aterrima</i>	121,00 ($\pm 2,09$) aA ^b
	<i>Raphanus sativus</i>	125,05 ($\pm 3,44$) aA ^b
	<i>Cajanus cajan</i>	127,91 ($\pm 10,58$) aA ^b
	<i>Crotalaria juncea</i>	124,04 ($\pm 6,85$) aA ^b

Letras minúsculas nas colunas apresentam diferenças estatísticas entre as plantas de cobertura na mesma dose de N, letras maiúsculas nas linhas representam diferenças estatísticas entre as doses de N (SN e CN), letra minúsculas sobrescrita nas colunas representam diferença estatísticas entre anos ao nível de 5% pelo teste de Tukey. ND: Não Determinado.

Ao comparar os estoques de C entre os anos de 2013 e 2024, observaram-se aumentos de C no solo sob uso das PCs e com a aplicação de N-fertilizante em cobertura no milho ($p > 0,05$). Em 2018, os estoques de C no solo aumentaram ($p > 0,05$) em relação a 2013 para todos os tratamentos. Em 2024, os estoques de C no solo apresentaram uma depleção comparado à 2018, mas ainda superior ($p > 0,05$) a 2013.

Os teores das frações húmicas (AF, AH e HUM) analisados para sucessão de soja às PCs em 2024 estão apresentados na Tabela 7. O teor de AF, nas camadas de 0-10, 10-

20 e 20-40 cm para os tratamentos com e sem N-fertilizante em cobertura não se diferiram estatisticamente, com exceção da camada 0-10 cm, para a sucessão de soja o *Cajanus cajan* com os maiores teores em relação à *Mucuna aterrima* para os tratamentos com N-fertilizante ($p>0.05$). Em relação às doses, parcelas sem N em cobertura obtiveram maiores teores de AF nas profundidades de 0-10 e 20-40 cm, com exceção da soja em sucessão ao *Cajanus cajan*.

Tabela 7. Média e desvio padrão ($\pm$) das frações de carbono em diferentes camadas do solo (0-10, 10-20 e 20-40 cm de profundidade). Ácido Fúlvio (AF); Ácido Húmico (AH) e Humina (HUM) em g kg^{-1} .

Plantas de cobertura	AF	AH	HUM
	----- g kg ⁻¹ -----		
	S/N		
	0-10 cm		
<i>Mucuna aterrima</i>	5,82 (±0,94) aA	1,85 (±0,21) aA	9,05 (±1,12) aA
<i>Raphanus sativus</i>	6,57 (±0,14) aA	1,79 (±0,05) aA	9,01 (±0,66) aA
<i>Cajanus cajan</i>	6,35 (±0,16) aA	1,71 (±0,13) aA	9,06 (±0,63) aA
<i>Crotalaria juncea</i>	6,16 (±0,43) aA	1,77 (±0,16) aA	8,91 (±0,75) aA
	10-20 cm		
<i>Mucuna aterrima</i>	5,38 (±079) aA	1,10 (±0,28) aB	7,75 (±0,78) aA
<i>Raphanus sativus</i>	6,37 (±0,22) aA	1,26 (±0,07) aB	8,46 (±1,07) aA
<i>Cajanus cajan</i>	6,02 (±0,32) aA	1,56 (±0,22) aA	8,48 (±1,48) aA
<i>Crotalaria juncea</i>	6,00 (±0,29) aA	1,27 (±0,19) aB	8,70 (±0,53) aA
	20-40 cm		
<i>Mucuna aterrima</i>	5,91 (±0,11) aA	1,02 (±0,21) aB	7,62 (±0,82) aA
<i>Raphanus sativus</i>	6,24 (±0,14) aA	1,20 (±0,03) aB	8,47 (±0,51) aA
<i>Cajanus cajan</i>	5,95 (±0,22) aA	1,22 (±0,05) aA	7,70 (±0,61) aA
<i>Crotalaria juncea</i>	5,88 (±0,25) aA	1,11 (±0,01) aB	7,90 (±0,06) aA
	C/N		
	0-10 cm		
<i>Mucuna aterrima</i>	3,65 (±0,71) bB	2,00 (±0,19) aA	7,73 (±1,02) aA
<i>Raphanus sativus</i>	3,77 (±0,58) abB	2,27 (±0,14) aA	8,38 (±0,49) aA
<i>Cajanus cajan</i>	5,30 (±0,48) aA	2,06 (±0,13) aA	6,51 (±1,40) aA
<i>Crotalaria juncea</i>	4,13 (±0,16) abB	2,21 (±0,14) aA	6,74 (±0,33) aA
	10-20 cm		
<i>Mucuna aterrima</i>	3,88 (±0,50) aA	2,03 (±0,13) aA	7,14 (±1,16) aA
<i>Raphanus sativus</i>	3,63 (±0,36) aA	1,90 (±0,15) aA	7,06 (±1,40) aA
<i>Cajanus cajan</i>	5,30 (±0,48) aA	2,05 (±0,03) aA	6,26 (±1,29) aA
<i>Crotalaria juncea</i>	4,41 (±1,09) aA	2,07 (±0,04) aA	6,16 (±0,46) aA
	20-40 cm		
<i>Mucuna aterrima</i>	4,04 (±0,67) aB	1,78 (±0,24) aA	6,29 (±1,45) aA
<i>Raphanus sativus</i>	3,59 (±0,57) aB	1,79 (±0,05) aA	6,09 (±1,03) aA
<i>Cajanus cajan</i>	4,73 (±0,30) aA	1,87 (±0,08) aA	4,72 (±0,50) aB
<i>Crotalaria juncea</i>	3,39 (±1,01) aB	1,67 (±0,13) aA	5,98 (±1,51) aA

Letras diferentes minúsculas nas colunas indicam diferenças estatísticas entre tratamentos, letras maiúsculas nas colunas apresentam diferença estatísticas entre as doses (SN e CN) ao nível de 5% pelo teste de tukey.

3.2 Variações dos estoques de C (ΔC)

As variações dos estoques de C (ΔC) do solo (Mg ha^{-1}) até 100 cm, sob as diferentes PCs de 2013-2018; 2013-2024 e 2018-2024, estão apresentadas na Tabela 9. Observaram-se aumentos nos ΔC no PCs com fertilização nitrogenada em cobertura na cultura do milho, com ganho médio de $20,79 \text{ Mg ha}^{-1}$ no período de 2013 a 2018.

Tabela 8. Média e desvio padrão ($\pm$) do delta carbono (ΔC) até 100 cm em 2013, 2018, e 2024.

Plantas de cobertura	C/N	
	Δ 2013-2018	Δ 2013-2024
<i>Mucuna aterrima</i>	22,22 ($\pm 3,19$)	-1,44 ($\pm 4,68$)
<i>Raphanus sativus</i>	23,34 ($\pm 8,44$)	-12,41 ($\pm 10,84$)
<i>Cajanus cajan</i>	19,04 ($\pm 3,96$)	-10,14 ($\pm 10,84$)
<i>Crotalaria juncea</i>	18,57 ($\pm 5,29$)	-8,88 ($\pm 4,37$)
Média	20,79	-8,22
	S/N	C/N
	Δ 2018-2024	
<i>Mucuna aterrima</i>	-8,40 ($\pm 0,98$)	-20,78 ($\pm 7,86$)
<i>Raphanus sativus</i>	-1,83 ($\pm 1,34$)	-10,93 ($\pm 1,78$)
<i>Cajanus cajan</i>	-7,88 ($\pm 3,17$)	-8,89 ($\pm 14,19$)
<i>Crotalaria juncea</i>	-14,47 ($\pm 11,31$)	-9,69 ($\pm 1,18$)
Média	-8,15	-12,57

No entanto, entre 2018 e 2024, esse padrão não se manteve. Nesse intervalo, tanto os tratamentos sem adubação (SN), quanto aqueles com adubação (CN) nitrogenada em cobertura no milho apresentaram perdas negativas ou depleção de C, expresso pelos valores negativos de ΔC . médias negativas. Que considera o período de 11 anos (2013 a 2024), observou-se uma tendência de perda de C no longo prazo.

Na comparação entre os tratamentos com e sem N-fertilizante na cultura de milho, no período de 2018 a 2024, todas as PCs apresentaram perdas de C. Essas perdas foram menos intensas nos tratamentos sem adubação nitrogenada, na comparação entre tratamentos no período de 2018 a 2024, com destaque dessa menor intensidade em relação para a *Mucuna aterrima* e ao *Raphanus sativus*.

3.3 Produtividade das culturas (milho e soja)

A produtividade do milho nas safras 2013/2014, 2018/2019 e da soja 2023/2024 estão apresentados na tabela 10. Na safra de 2018/2019 observou-se uma maior produtividade ($p < 0.05$) do milho em sucessão à *Crotalaria juncea* e *Mucuna aterrima* em relação ao *Raphanus sativus*, em ausência de N em cobertura.

Tabela 9. Média e desvio padrão ($\pm$) da produtividade do milho e da soja em sucessão as Plantas de Cobertura nos anos de 2013, 2018 e 2024 no Cerrado.

Plantas de cobertura	Milho 2013/2014 (kg ha ⁻¹)	
	S/N	C/N
<i>Mucuna aterrima</i>	8.252,19 ($\pm$ 272,64) aB	10.246,24 ($\pm$ 1.450,39) aA
<i>Raphanus sativus</i>	9.156,16 ($\pm$ 128,02) aA	10.192,80 ($\pm$ 1.238,02) aA
<i>Cajanus cajan</i>	8.592,57 ($\pm$ 178,13) aB	10.789,65 ($\pm$ 526,21) aA
<i>Crotalaria juncea</i>	8.075,05 ($\pm$ 419,77) aB	10.315,65 ($\pm$ 1.289,64) aA
	Milho 2018/2019 (kg ha ⁻¹)	
	S/N	C/N
<i>Mucuna aterrima</i>	7.831,13 ($\pm$ 553,79) aB	11.326,30 ($\pm$ 959,19) aA
<i>Raphanus sativus</i>	6.152,57 ($\pm$ 551,60) bB	10.916,07 ($\pm$ 109,79) aA
<i>Cajanus cajan</i>	7.640,28 ($\pm$ 533,39) abB	11.135,23 ($\pm$ 635,19) aA
<i>Crotalaria juncea</i>	8.152,76 ($\pm$ 441,98) aB	11.258,12 ($\pm$ 502,36) aA
	Soja 2023/2024 (kg ha ⁻¹)	
	S/N	C/N
<i>Mucuna aterrima</i>	5.153,00 ($\pm$ 156,96) aA	4.938,12 ($\pm$ 18,86) aA
<i>Raphanus sativus</i>	5.043,83 ($\pm$ 49,51) aA	5.041,36 ($\pm$ 168,30) aA
<i>Cajanus cajan</i>	4.903,05 ($\pm$ 40,99) aA	5.094,08 ($\pm$ 372,61) aA
<i>Crotalaria juncea</i>	4.879,96 ($\pm$ 106,55) aA	4.405,28 ($\pm$ 66,83) aA

Letras minúsculas nas colunas apresentam diferenças estatísticas entre tratamentos, letras maiúsculas nas linhas representam diferença estatísticas entre as doses (SN e CN) ao nível de 5% pelo teste de tukey.

E com aplicação de N em cobertura não houve diferença na produtividade de milho em sucessão às PCs. A produtividade de milho foi maior com aplicação de N em cobertura ($p < 0.05$) em sucessão a todas as PCs. Na safra 2023/2024, não houve diferença significativa de produtividade da soja em sucessão às PCs e entre os tratamentos com e sem N aplicado anteriormente em cobertura na cultura do milho.

3.4 Produção de matéria seca (MS) das PCs

Em relação à produção de matéria seca das PCs nos anos de 2012, 2017 e 2023, (Tabela 11). No ano de 2017, não apresentaram diferenças com e sem aplicação de N-fertilizante ($p < 0,05$). Ao comparar o manejo de N, apenas o *Cajanus cajan* apresentou maior biomassa com aplicação de N-fertilizante ($p > 0.05$).

Em 2023, o *Cajanus cajan* obteve maior biomassa em relação *Crotalaria juncea* para as parcelas sem N ($p > 0.05$). Em relação ao efeito residual da adubação nitrogenada a *Raphanus sativus* e *Cajanus cajan* resultaram em maior produção de matéria seca em relação a *Crotalaria juncea* ($p > 0.05$), e não apresentou diferenças significativas entre o manejo do N.

A produção de matéria seca em 2012 não apresentaram diferença entre as doses com e sem N-fertilizante, com diferenças observadas apenas na subparcela com e sem N com destaque para o *Raphanus sativus* que foi superior a *Mucuna aterrima* e *Crotalaria juncea*.

Tabela 10. Média e desvio padrão ($\pm$) da produção de matéria seca das Plantas de Cobertura nos anos de 2012, 2017 e 2023.

Plantas de cobertura	2012 (kg ha ⁻¹)	
	S/N	C/N
<i>Mucuna aterrima</i>	465,85 ($\pm$ 80,89) aA	583,06 ($\pm$ 135,82) bA
<i>Raphanus sativus</i>	1.175,97 ($\pm$ 468,16) aA	1.549,27 ($\pm$ 367,88) aA
<i>Cajanus cajan</i>	923,44 ($\pm$ 274,12) aA	975,59 ($\pm$ 247,83) abA
<i>Crotalaria juncea</i>	629,21 ($\pm$ 70,08) aA	642,91 ($\pm$ 104,28) bA
	2017 (kg ha ⁻¹)	
	S/N	C/N
<i>Mucuna aterrima</i>	1.124,93 ($\pm$ 22,82) aA	1.208,93 ($\pm$ 22,87) aA
<i>Raphanus sativus</i>	1.129,23 ($\pm$ 41,88) aA	1.214,50 ($\pm$ 54,55) aA
<i>Cajanus cajan</i>	1.123,00 ($\pm$ 12,44) aB	1.230,17 ($\pm$ 28,26) aA
<i>Crotalaria juncea</i>	1.139,03 ($\pm$ 15,78) aA	1.208,70 ($\pm$ 83,25) aA
	2023 (kg ha ⁻¹)	
	S/N	C/N
<i>Mucuna aterrima</i>	1.245,03 ($\pm$ 127,54) abA	1.277,45 ($\pm$ 212,97) abA
<i>Raphanus sativus</i>	1.436,76 ($\pm$ 351,51) abA	1.552,21 ($\pm$ 622,47) aA
<i>Cajanus cajan</i>	1.618,49 ($\pm$ 513,31) aA	1.479,18 ($\pm$ 217,27) aA
<i>Crotalaria juncea</i>	731,81 ($\pm$ 126,54) bA	557,94 ($\pm$ 111,81) bA

Letras minúsculas nas colunas apresentam diferença estatísticas entre tratamentos, letras maiúsculas nas linhas representam diferença estatísticas entre as doses (SN e CN) ao nível de 5% pelo teste de tukey.

3.5 Relação entre estoque de carbono e frações húmicas com a produtividade da soja e MS das PCs.

A análise da ACP mostra os estoques de C, frações da MOS (AF, AH e HUM) e as variáveis quantitativas (produtividade da soja e MS das PCs). O CP1 representou 42,3% e o CP2 27,6% com um total de 69,9% da variabilidade de explicação dos dados (Figura 15). Os dados ordenados em função da contribuição das variáveis mostram que se formaram 3 grupos: 1) AH; 2) estoque de C, biomassa e a produtividade; e, 3) AF e HUM (Figura 15a). A distribuição dos tratamentos com (CN) e sem (SN) a aplicação de N-fertilizante em relação às variáveis avaliadas é apresentada na Figura 15b. A separação entre os grupos indica que a aplicação de N-fertilizante no milho (efeito residual para a soja) pode influenciar as variáveis estudadas, como por exemplo a produtividade. As elipses mostram sobreposição dos tratamentos, o que indica comportamento similar entre a *Crotalaria juncea*, *Cajanus cajan*, *Mucuna aterrima* e *Raphanus sativus* (Figura 15c).

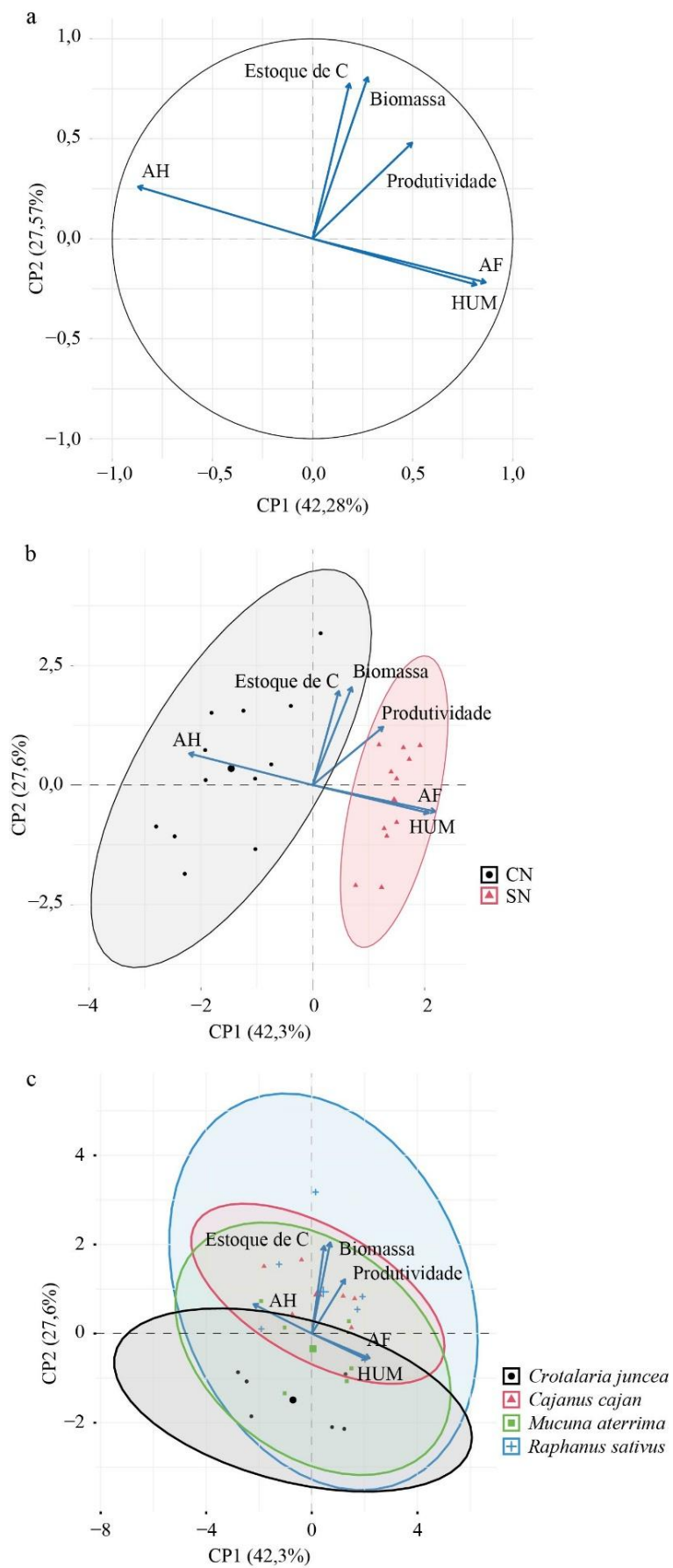


Figura 15. Análise de componentes principais relacionadas, estoque de Carbono, frações da matéria orgânica nas solo substâncias húmicas (Ácido Fúlvio (AF); Ácido Húmico (AH) e Humina (HUM)),

Biomassa e produtividade. A figura (a) Círculo de autovetores das variáveis, figura (b) correlação entre os tratamentos com e sem a aplicação de N-fertilizante e figura (c) mostra a correlação com as culturas para o ano de 2024.

4. DISCUSSÃO

4.1 Densidade do solo, teores e estoques de Carbono do solo

A densidade do solo e o C total do solo do Cerrado podem variar dependendo do tipo de solo e profundidade (Corbeels *et al.*, 2006). Na área de Cerrado nativo adjacente aos sistemas avaliados, a densidade do solo foi abaixo de 1 g cm^{-3} e o C total foi acima de $46,14 \text{ g kg}^{-1}$ com um aumento de 20 % para a densidade e 158 % para o C total até 40 cm em relação a superfície do solo. A densidade e o C total aumentaram nas primeiras camadas de solo, e reduziram ao longo do perfil devido à diminuição da matéria orgânica e menor agregação (Silva *et al.*, 2024).

A concentração de C no solo foi superior na camada superficial (0–5 cm), com redução entre 54% e 67% até 100 cm para os sistemas estudados, sendo que independentemente, do tipo de manejo, cultivo ou região estudada esse padrão se mantém (Button *et al.*, 2022). Essa distribuição reflete a heterogeneidade vertical do solo, fortemente influenciada pela atividade microbiana, cuja composição e funcionalidade variam ao longo do perfil de solo, com concentração dessa atividade nas camadas superficiais do solo até 0-40 cm para o Cerrado nativo e 0-20 cm nos sistemas agrícolas. Os produtos derivados da atividade microbiana, como metabólitos e resíduos celulares, desempenham papel central na formação e estabilização da matéria orgânica (Dove *et al.*, 2020; Peixoto *et al.*, 2020).

A sucessão soja-*Mucuna aterrima* em 2024 pode ter se destacado quanto ao C total devido à maior concentração de lignina e a maior razão lignina:N, juntamente com *Cajanus cajan*, com maior absorção de N (Carvalho *et al.*, 2024), características que influenciam a dinâmica de decomposição e do C no solo, é influencia a dinâmica de decomposição dos resíduos vegetais, consequentemente, os teores de C do solo.

As PCs, como *Crotalaria juncea* e *Cajanus cajan* na fase milho com suas raízes pivotantes e mais profundas, podem acumular mais matéria orgânica no perfil do solo (Cherubin *et al.*, 2024). A aplicação do fertilizante N em cobertura no milho pode ter incrementado a atividade microbiana nesses tratamentos (Dincă *et al.*, 2022), acelera a decomposição da MOS, evidencia que a adição de N-fertilizante pode promover a mineralização do C orgânico do solo (Fang *et al.*, 2019; Malik *et al.*, 2020; Luo *et al.*,

2022). Na fase soja a *Mucuna aterrima* se destaca pela maior absorção de N e lignina:N, respectivamente, e (Carvalho *et al.*, 2024), que influencia a dinâmica de decomposição dos resíduos vegetais, consequentemente, no aumento de teores de C do solo.

Embora a fertilização nitrogenada em cobertura possa ter acelerado a mineralização da MOS, o uso de leguminosas em sucessão de culturas no SPD desempenha um papel relevante como fonte biológica de N (Bayer *et al.*, 2006), com redução desse impacto. Essa contribuição da FBN pode favorecer uma maior estabilidade de C do solo, que se configura como uma estratégia viável para mitigar perdas de C e incrementar seus estoques no solo. Além disso, destaca-se que o histórico de manejo e as condições climáticas exercem influência significativa sobre a dinâmica do C no solo (Muleke *et al.*, 2023), exibindo os efeitos das práticas de fertilização nitrogenada, rotação de culturas e das PCs em sucessão a cultura principal.

O aporte de resíduos durante a fase de milho (2013-2018), caracterizado por uma alta relação C/N, aumentou os estoques de C no sistema em relação a 2024. Em sistemas com soja-PC, a introdução de um PCs com alta C/N é essencial para evitar a depleção dos estoques de C (Carvalho *et al.*, 2013). É essencial para evitar a depleção dos estoques de C devido ao baixo rendimento de biomassa e baixa razão C/N, que promovem uma decomposição mais rápida dos resíduos vegetais e baixos teores de C (Carvalho *et al.*, 2021). Em sucessão ao milho, o uso de leguminosas é mais favorável aos incrementos de estoques de C, o que demonstra a importância desse devido ao aporte de N para equilibrar a razão C/N no sentido de favorecer a mineralização pelos microrganismos do solo (Mazzilli *et al.*, 2014; de Moraes Sá *et al.*, 2025).

4.2 Delta Carbono (ΔC) do solo

As variações nos estoques de C no solo no presente estudo revelam padrões distintos de acúmulo e perda dependendo da cultura ou tipo de sistema, ou seja, na dinâmica de C ao longo dos anos. A rápida mineralização da MOS, potencializada pela disponibilidade de N no sistema, intensifica a atividade dos microrganismos decompositores e acelera a ciclagem de nutrientes (Bayer *et al.*, 2006), promovendo a liberação de N-mineral e a emissão de C orgânico na forma de CO₂ para a atmosfera (de Oliveira *et al.*, 2023). No entanto, a presença de N também é essencial para sustentar uma maior produção de biomassa (Noor, 2017), com o aumento a taxa de fotossíntese e,

consequentemente, a entrada de C no sistema, o que pode compensar essas perdas e favorecer o acúmulo de C no perfil do solo (Nunes, 2023).

A menor perda de C no solo observada com N-fertilizante no período de 10 anos foi para o *Mucuna aterrima*, que apresentou maior razão lignina/N e mais alta absorção de N na parte aérea (Carvalho *et al.*, 2024), seguindo-se em decomposição mais lenta (Carvalho *et al.*, 2013) e favorável ao incremento de estoques de C no solo. Portanto, a combinação de aporte de biomassa com maior lignina/N e maior absorção de N na parte aérea, no caso da sucessão milho-*Mucuna aterrima* contribui para aumentar o armazenamento de C no solo (St. Luce *et al.*, 2022).

De modo geral, percebe-se que SPD favorece o armazenamento de C no solo, o que significa transformar o C presente na atmosfera (na forma de CO₂) em C estocado no solo (Machado, 2005). Outra questão importante está relacionada à manutenção da cobertura do solo que é fundamental para reduzir as emissões de CO₂ durante os períodos de pousio, que, mesmo curtos em regiões subtropicais e tropicais, podem liberar até 27% do C estocado a depender das culturas (Veeck *et al.*, 2022). Esse cenário destaca a importância de práticas como o uso de PCs na safrinha como forma de diversificação dos cultivos.

Em termos de políticas públicas, a recente aprovação do Projeto de Lei 528/21, que regulamenta o Mercado Brasileiro de Redução de Emissões, estabelece mecanismos para a comercialização de créditos de C no país (Câmara dos Deputados, 2022). Nesse contexto, pesquisas em sistemas agrícolas vêm sendo desenvolvidas para mensurar o acúmulo de C e práticas de baixa emissão (Brasil, 2021). Nesse sentido, os resultados aqui apresentados, podem servir de base para estudos que visam mitigar as emissões de GEE, especialmente em áreas com SPD e sucessão de culturas, com o foco em incentivar o cultivo de PCs no inverno (no hemisfério sul), para que os sistemas agrícolas como drenos e não fontes de CO₂ para a atmosfera, tenha a possibilidade de gerar crédito de C.

As implicações práticas do nosso estudo permitem estimativas de créditos de C para diferentes regiões de estudo com base no uso de PCs. O potencial econômico da adoção de práticas agrícolas sustentáveis, associadas à agricultura de baixa emissão de C no Cerrado, é reforçado pela valorização dos créditos de C. Segundo a empresa CredCarbo, o valor estimado para esses créditos é de US\$ 5 por hectare, exibindo a oportunidade de ganhos financeiros decorrentes da implementação de sistemas produtivos que promovam a sustentabilidade e a mitigação das emissões de GEE (Ribeiro *et al.*, 2024).

4.3 Frações da matéria orgânica do solo (substâncias húmicas)

Devido ao efeito da adubação nitrogenada de cobertura do milho até o ano 2020, com efeito residual na soja os teores de AF para a *Mucuna aterrima*, *Raphanus sativus* e *Crotalaria juncea* reduziram, com indicação de uma menor ciclagem dos resíduos vegetais na presença do fertilizante nitrogenado (Ramos *et al.*, 2020), tanto na camada superficial como em camadas mais profundas até 40 cm. A fração AF são facilmente mineralizáveis, pois possuem compostos de menor peso molecular e maior oxigenação, o que favorece a atividade microbiana em comparação com o AH, que tem maior peso molecular (Li *et al.*, 2017, Ramos *et al.*, 2020).

A rápida mineralização da MOS, potencializada pela disponibilidade de N no sistema, intensifica a atividade dos microrganismos decompositores no solo (Bayer *et al.*, 2006), e alto teor de constituintes mais lábeis, como hemiceluloses e lignina/N, podem ser rapidamente convertidos em produtos microbianos (Cotrufo *et al.*, 2013). No presente estudo, estes são representados pela fração FA que promove maior eficiência no uso de C, e, portanto, libera menos CO₂ na atmosfera (de Oliveira *et al.*, 2023).

O efeito da adubação nitrogenada em cobertura do milho, aumentaram os teores de HA, com exceção de parcelas com soja-*Cajanus cajan*, essa fração por ser um indicador de qualidade do solo, o aumento de seus valores em camadas mais profundas do solo, pode indicar melhoria dessa qualidade no perfil do solo (Vikram *et al.*, 2022), uma mineralização intensificada dos resíduos vegetais na presença de fertilizante nitrogenado, o que reduziu a relação lignina/N, favorecendo a mineralização da palha a depender da PCs (Ramos *et al.*, 2020). De acordo com Talbot e Treseder (2012), há uma interação entre lignina, celulose e teor de N em resíduos vegetais, na qual a lignina protege os polissacarídeos da parede celular da degradação microbiana, e a celulose é um substrato para a degradação da lignina. Isso pode explicar por que parcelas com soja-*Cajanus cajan* não tiveram os teores de AH afetados, a *Cajanus cajan* apresenta baixa concentração de celulose e alta concentração de lignina (Carvalho *et al.*, 2024).

O sistema soja-*Cajanus cajan* foi o que se manteve valores mais constante em relação as frações MOS, independente do manejo de N, em partes pode ser atribuído maior acúmulo de compostos recalcitrantes relacionados ao processo de decomposição dos resíduos vegetais (Carvalho *et al.*, 2009). Na fração HUM essa espécie foi a única afetada pela aplicação de N, por se tratar de fração insolúvel, constituída, principalmente,

por C alifático, ácidos graxos de cadeia longa e ésteres (Hayes *et al.*, 2017; Ramos *et al.*, 2020), responsável pelos maiores valores de HUM para essa leguminosa.

4.4 Produtividade e biomassa das plantas de cobertura

A sucessão de culturas e uso das PCs, aliada à rotação milho/soja, está associada a incrementos na produtividade que variam entre 12% e 30%, dependendo das condições regionais (dos Santos *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2024). A fertilização com N em cobertura para a cultura do milho tem promovido maior produtividade (de Carvalho *et al.*, 2021), porém, o efeito do N no sistema não implica no aumento dos rendimentos para a soja e até promove sua redução (Zhang *et al.*, 2021b; St. Luce *et al.*, 2022). As PCs com maior absorção de N na parte aérea (Carvalho *et al.*, 2024) e decomposição acelerada, como *Mucuna aterrima* devem ser priorizadas para uso associadas ao milho.

A adoção de práticas aprimoradas de manejo de culturas com sua diversificação, como rotação e uso de PCs pode aumentar a eficiência de uso do N (EUN), promovendo maior absorção e aproveitamento desse nutriente pelas plantas (Fageria; Baligar, 2005). A aplicação de N em parcelas milho-*Cajanus cajan* influenciou positivamente a biomassa, evidenciando o papel do N como responsável pelo crescimento e desenvolvimento das plantas (Noor, 2017; Sum *et al.*, 2021).

As plantas com alta produção de biomassa e lignina como *Cajanus cajan* e *Raphanus sativus*, consequentemente decomposição lenta, podem ser cultivadas em sucessão com a soja, cujos resíduos se decompõem rapidamente, fornecendo nutrientes em sincronia com soja, no processo mais eficiente de ciclagem (Carvalho *et al.*, 2013).

4.5 Interações entre as variáveis analisadas

A análise de componentes principais revela que o estoque de C no solo está diretamente associado à produção de biomassa e à produtividade das culturas, o que sugere que sistemas agrícolas e as práticas de manejo que favorecem o acúmulo de biomassa e rendimentos, que promovem incrementos nos estoques de C (de Carvalho *et al.*, 2021; Ayarza *et al.*, 2022). Essa relação é amplamente documentada na literatura (Poeplau; Don, 2015; Pacheco *et al.*, 2017; Ramos *et al.*, 2020; Rigon *et al.*, 2021), onde sistemas de rotação de culturas e uso de PCs aumentam o acúmulo de matéria orgânica e, consequentemente, o C no solo.

A compreensão do acúmulo de biomassa e dinâmica da decomposição dos resíduos vegetais (de Carvalho *et al.*, 2013), é fundamental para o manejo e desenvolvimento de culturas que visa o aumento da produtividade e estoques de C no solo (de Carvalho *et al.*, 2021; Freitas Moreira *et al.*, 2021).

A FBN realizadas pelas leguminosas, que aumenta o N disponível no solo, devido à baixa razão C/N dos resíduos vegetais (Ntonta *et al.*, 2022). A maior variação para o *Raphanus sativus*, a única crucífera utilizada nesse estudo (Figura 15 c), pode ter relação com as baixas concentrações de lignina e lignina/N de *Raphanus sativus* (46 g kg⁻¹ e 2,45), que resultam também na sua rápida decomposição (Carvalho *et al.*, 2013).

As frações de C (AH, AF e HUM) seguem um padrão diferente (Figura 15). O comportamento do AH é justificado pelas propriedades químicas e estruturais, que possui baixa mobilidade (Sarlaki *et al.*, 2024), e altamente polimerizada e com maior grau de humificação da MOS (Schwarzer; Schmidt, 2024), que indica maior estabilidade no solo, e não se renova rapidamente com a decomposição da biomassa vegetal. As SHs, como a HUM e o AH desempenham funções importantes na qualidade do solo e na produtividade agrícola, altamente dependente frações disponíveis no solo (Ramos *et al.*, 2020; Vikram *et al.*, 2022).

5. CONCLUSÃO

A hipótese levantada de que a transição milho/soja em SPD com uso de PCs promove o aumento da produtividade e os estoques de C do solo em partes foi aceita, pois, o aumento dos estoques de C total do solo foi afetado com perda pela substituição do milho pela cultura da soja. A menor perda de C no solo em um período de 10 anos foi para o *Mucuna aterrima* com N-fertilizante. O *Cajanus cajan* mostrou maior estabilidade nas frações AF e AH em todas as profundidades, com fertilização nitrogenada. *Mucuna aterrima*, *Raphanus sativus* e *Crotalaria juncea* apresentaram maiores frações de AF (0-10 cm) sem aplicação N-fertilizante e AH (10-20 e 20-40cm) com aplicação de N-fertilizante. A aplicação de N-fertilizante intensificou a produção de milho nos anos de 2013 e 2018. Com a sucessão *Crotalaria juncea* apresentou menor produtividade, possivelmente devido à competição com plantas daninhas para 2013 e 2024.

6. REFERÊNCIAS

ABBAS, F. *et al.* A review of soil carbon dynamics resulting from agricultural practices. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 268, p. 110319, 2020. Disponível em:

[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479720302541?casa_token=ddOnSBTrHV8AAAAA:qpQQXUSJGZK-](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479720302541?casa_token=ddOnSBTrHV8AAAAA:qpQQXUSJGZK-fbEqZljriNQfi0xgs2pNQAAb0TetpMSJtwv4d0CvbtAbWXvX12WyeRoXcIdUW_EAc)

[fbEqZljriNQfi0xgs2pNQAAb0TetpMSJtwv4d0CvbtAbWXvX12WyeRoXcIdUW_EAc](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479720302541?casa_token=ddOnSBTrHV8AAAAA:qpQQXUSJGZK-fbEqZljriNQfi0xgs2pNQAAb0TetpMSJtwv4d0CvbtAbWXvX12WyeRoXcIdUW_EAc) Acesso em: 7 abr. 2025.

ABDALLA, M. *et al.* A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 25, n. 8, p. 2530–2543, 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcb.14644>. Acesso em: 5 jul. 2024.

ARTAXO, P. As três emergências que nossa sociedade enfrenta: saúde, biodiversidade e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, [s. l.], v. 34, n. 100, p. 53–66, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/TRsRMLDdzxRsz85QNYFQBHs/?format=html>. Acesso em: 23 nov. 2023.

AYARZA, M. *et al.* Soil carbon accumulation in crop-livestock systems in acid soil savannas of South America: A review. **Advances in Agronomy**, [s. l.], v. 173, p. 163–226, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S006521132200030X> Acesso em: 7 abr. 2025.

BABU, S. *et al.* Soil carbon dynamics under organic farming: Impact of tillage and cropping diversity. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 147, p. 109940, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X23000821> Acesso em: 15 jun. 2024.

BAYER, C. *et al.* A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 91, n. 1–2, p. 217–226, 2006. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198705003132?casa_token=JqPFgnFtu7YAAAAA:SGKK3JJgyQuPPVIBLgmuMhJPnynWY06GOTIXDenOR2HsSdVl0YI7AAHS8EoMorv9IvHYVHSdqvM Acesso em: 26 fev. 2025.

BATES, Douglas *et al.* Fitting linear mixed-effects models using lme4. **Journal of statistical software**, v. 67, p. 1–48, 2015. Disponível em: <https://www.jstatsoft.org/article/view/v067i01/0> Acesso em: 26 fev. 2025.

BIGOLIN, T.; TALAMINI, E. Impacts of Climate Change Scenarios on the Corn and Soybean Double-Cropping System in Brazil. **Climate**, 2024, Vol. 12, Page 42, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 42, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2225-1154/12/3/42/htm>. Acesso em: 16 nov. 2024.

BLAKEMORE, R.J. Biomass Refined: 99% of Organic Carbon in Soils. **Biomass** 2024, Vol. 4, Pages 1257–1300, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 1257–1300, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-8783/4/4/70/htm>. Acesso em: 7 abr. 2025.

BRASIL. **Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária com vistas ao desenvolvimento sustentável (2020-2030)**. Brasília: [s. n.], 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais/publicacoes/abc-portugues.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2025.

BUTTON, E.S. *et al.* Deep-C storage: Biological, chemical and physical strategies to enhance carbon stocks in agricultural subsoils. **Soil Biology and Biochemistry**, [s. l.], v. 170, p. 108697, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071722001547> Acesso em: 25 fev. 2025.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **PROJETO DE LEI N.º 528, DE 2021**. Brasília, 2022. Disponível em: https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=1988639. Acesso em: 21 abr. 2025.

CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOTT, E.T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], v. 56, n. 3, p. 777–783, 1992. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>. Acesso em: 20 nov. 2023.

CANISARES, L.P. *et al.* Maize-Brachiaria intercropping: A strategy to supply recycled N to maize and reduce soil N₂O emissions?. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s. l.], v. 319, p. 107491, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016788092100195X> Acesso em: 7 dez. 2023.

CARVALHO, A.M de *et al.* Characterization by solid-state CPMAS ¹³C NMR spectroscopy of decomposing plant residues in conventional and no-tillage systems in Central Brazil. *Soil and Tillage Research*, v. 102, n. 1, p. 144-150, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198708001530?via%3Dihub> Acesso em: 12 nov. 2024.

CARVALHO, A.M. De *et al.* Chemical composition of cover plants and its effect on maize yield in no-tillage systems in the Brazilian savanna. **Crop and Pasture Science**, [s. l.], v. 63, n. 12, p. 1075–1081, 2013. Disponível em: <https://www.publish.csiro.au/cp/CP12272>. Acesso em: 12 nov. 2024.

CARVALHO, A.M. de *et al.* Cover Crops Affect Soil Mineral Nitrogen and N Fertilizer Use Efficiency of Maize No-Tillage System in the Brazilian Cerrado. **Land**, [s. l.], v. 13, n. 5, p. 693, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/13/5/693/htm>. Acesso em: 13 ago. 2024.

CHAGAS, J.K.M.; FIGUEIREDO, C.C. de; RAMOS, M.L.G. Biochar increases soil carbon pools: Evidence from a global meta-analysis. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 305, p. 114403, 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479721024658?casa_token=9lTYrlaLzx4AAAAA:lldT5b-ZSutTCpdPOCC99jAG-

en9A4SliemZauAZKuJ0bPTt5h9tDPFk8kKC8xaW7REzYg9NS2w Acesso em: 26 jun. 2024.

CHANG, X. *et al.* Effects of land use and cover change (LUCC) on terrestrial carbon stocks in China between 2000 and 2018. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 182, p. 106333, 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344922001781?casa_token=8VKEPGgzm7kAAAAA:Q_U4YOV18auIqR0mzFEwDid19jYY4T8hkKHawTb_gwImpm3HGXnBLR3MVvYnqRI1TGdlie9ZDg Acesso em: 10 ago. 2024.

CHERUBIN, M.R. *et al.* **Guia prático de plantas de cobertura: espécies, manejo e impacto na saúde do solo**. ESALQ/SOHEMAed. Piracicaba, SP: Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2024. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/003207534>. Acesso em: 14 nov. 2024.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. **Séries Históricas das Safras**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras#gr%C3%A3os-2>. Acesso em: 16 nov. 2024.

CORBEELS, M. *et al.* Soil carbon storage potential of direct seeding mulch-based cropping systems in the Cerrados of Brazil. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 12, n. 9, p. 1773–1787, 2006. Disponível em: [/doi/pdf/10.1111/j.1365-2486.2006.01233.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01233.x). Acesso em: 22 maio 2025.

COTRUFO, M. Francesca *et al.* The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter?. **Global change biology**, v. 19, n. 4, p. 988-995, 2013. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcb.12113> Acesso em: 22 maio 2025.

CREDCARBO. **Vender | CredCarbo**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://credcarbo.com/vender>. Acesso em: 21 abr. 2025.

DE CARVALHO, A.M. *et al.* Chemical composition of cover crops and soil organic matter pools in no-tillage systems in the Cerrado. **Soil Use and Management**, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 940–952, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/sum.12746>. Acesso em: 23 nov. 2023.

DE CARVALHO, Ar.M. *et al.* Cover plants with potential use for crop-livestock integrated systems in the Cerrado region. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 46, n. 10, p. 1200–1205, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/jSmKyXpSpTb3vcyndgsjkbH/?lang=en>. Acesso em: 6 jun. 2025.

DE CARVALHO, A.M. *et al.* Manejo de plantas de cobertura na floração e na maturação fisiológica e seu efeito na produtividade do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 50, n. 7, p. 551–561, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/PPHQc7qRRGNmNnWPPhfBcdy/>. Acesso em: 27 out. 2023.

DE CARVALHO, A.M. de *et al.* Soil Carbon Stocks and Greenhouse Gas Mitigation of Agriculture in the Brazilian Cerrado—A Review. **Plants**, 2023, Vol. 12, Page 2449, [s. l.], v. 12, n. 13, p. 2449, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/12/13/2449/htm>. Acesso em: 28 out. 2023.

DE CARVALHO, A.M. *et al.* Understanding the Relations between Soil Biochemical Properties and N₂O Emissions in a Long-Term Integrated Crop–Livestock System. **Plants**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 365, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/13/3/365/htm>. Acesso em: 22 jun. 2024.

DE MORAES As, J.C. *et al.* No-till systems restore soil organic carbon stock in Brazilian biomes and contribute to the climate solution. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 977, p. 179370, 2025. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972501006X?casa_token=P36CeUnRdzwAAAAA:X5y5jRoeZYumCO3QmHyLYoEF2ZQVzQWjECIrcQLnfbne-U0i2h0yYHLHbNT1AWa3927Z5TfHrcY. Acesso em: 6 jun. 2025.

DE OLIVEIRA, A.D. *et al.* “Effects of soil management, rotation and sequence of crops on soil nitrous oxide emissions in the Cerrado: A multi-factor assessment”. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 348, p. 119295, 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479723020832?casa_token=k-zvXKRmyt0AAAAA:JRrbJqV62B-UCm_UtVOOaZKdf5eMBg8xfXfKygfIpsScrjkDyzhcJtUDZ3QJsnXNSaTXHA1s9Y. Acesso em: 28 ago. 2024.

DINÇÄ, L.C. *et al.* Fertilization and Soil Microbial Community: A Review. **Applied Sciences**, 2022, Vol. 12, Page 1198, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 1198, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/3/1198/htm>. Acesso em: 28 fev. 2025.

DOS SANTOS, S.F. da C.B. *et al.* Soil Microbiological Attributes and Soybean Grain Yield in Succession to Corn Intercropped with Forage in the Maranhão Eastern Cerrado. **International Journal of Plant Production**, [s. l.], v. 15, n. 4, p. 669–677, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42106-021-00167-z>. Acesso em: 17 abr. 2025.

DOVE, N.C. *et al.* Continental-scale patterns of extracellular enzyme activity in the subsoil: an overlooked reservoir of microbial activity. **Environmental Research Letters**, [s. l.], v. 15, n. 10, p. 1040a1, 2020. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abb0b3>. Acesso em: 1 mar. 2025.

EMBRAPA. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2004. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/555355/cerrado-correcao-do-solo-e-adubacao>. Acesso em: 21 nov. 2024.

FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C. Enhancing Nitrogen Use Efficiency in Crop Plants. **Advances in Agronomy**, [s. l.], v. 88, p. 97–185, 2005. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065211305880046?casa_token=j_oMKFBzO1cAAAAA:0RRR1mCVpUlx7b-JXTjctVZxrjYVg9nU8XGR-GcJEB24HmQWijZ0GiNtNzWeAEEinauv_F_KZ1w. Acesso em: 22 maio 2025.

FANG, X.M. *et al.* Phosphorus addition alters the response of soil organic carbon decomposition to nitrogen deposition in a subtropical forest. **Soil Biology and Biochemistry**, [s. l.], v. 133, p. 119–128, 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071719300665?casa_token=I4EPP--EuiQAAAAA:ZOIQ4yJ4fb7ronqhH6-r2c1_aHYcffbrosHxWcgM8sJO6x6Bwx1kUDp50g3XIKCOOd-HX6tVPsU Acesso em: 28 fev. 2025.

FARIAS, P.I.V. *et al.* The Fertilizer Industry in Brazil and the Assurance of Inputs for Biofuels Production: Prospective Scenarios after COVID-19. **Sustainability** **2020**, Vol. **12**, Page **8889**, [s. l.], v. 12, n. 21, p. 8889, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/21/8889/htm>. Acesso em: 22 jun. 2024.

FREITAS MOREIRA, F. *et al.* High-Throughput Phenotyping and Random Regression Models Reveal Temporal Genetic Control of Soybean Biomass Production. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 12, p. 715983, 2021. Disponível em: www.frontiersin.org. Acesso em: 17 abr. 2025.

GEORGE, José *et al.* Controle de fungos e qualidade fisiológica de sementes de soja (*Glycine max* L.) submetidas ao calor húmido. **Revista de Ciências Agrárias**, [s. l.], v. 42, n. 2, p. 464–471, 2019. Disponível em: <https://revistas.rcaap.pt/rca/article/view/17182>. Acesso em: 27 out. 2023.

HAYES, M.H.B.; MYLOTTE, R.; SWIFT, R.S. Humin: Its Composition and Importance in Soil Organic Matter. **Advances in Agronomy**, [s. l.], v. 143, p. 47–138, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0065211317300019> Acesso em: 26 fev. 2025.

HERTEL, T.W.; BALDOS, U. L.C. Attaining food and environmental security in an era of globalization. **Global Environmental Change**, [s. l.], v. 41, p. 195–205, 2016. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378016304046?casa_token=72-2Z9of-igAAAAA:Uu365UdkBmqSYYfU1hYRh0vAHXD7M6h7aJ0usAxOUy_Y2d4kKbK5mm5ND_7V2RZptIVOEScLGFc Acesso em: 10 ago. 2024.

HOTHORN, Torsten; BRETZ, Frank; WESTFALL, Peter. Simultaneous inference in general parametric models. **Biometrical Journal: Journal of Mathematical Methods in Biosciences**, v. 50, n. 3, p. 346–363, 2008.

KENWARD, M. G.; ROGER, J. H. Small Sample Inference for Fixed Effects from Restricted Maximum Likelihood. *Biometrics*, p. 983–997, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2533558> Acesso em: 10 ago. 2025.

KELLY, C. *et al.* Winter cover crops and no-till promote soil macrofauna communities in irrigated, Mediterranean cropland in California, USA. **Applied Soil Ecology**, [s. l.], v. 166, p. 104068, 2021. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092913932100189X?casa_token=F XhzcY5nM1AAAAAA:INx9rUM3yvvh5tafMTuwrqIRIEOIAbJBVTnVDCFwtapAm0Sg-8cjK8zvYT1vQYIDo_vBma5mTFh4 Acesso em: 8 abr. 2025.

LENTH, Russell. emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. **R package version 1.8. 5**, 2023. Disponível em: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1370584340724217473> Acesso em: 27 fev. 2025.

LI, S. *et al.* Evaluation of humic substances during co-composting of sewage sludge and corn stalk under different aeration rates. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 245, p. 1299–1302, 2017. Disponível em: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20173350630> Acesso em: 27 fev. 2025.

LI, X. *et al.* Properties and photosynthetic promotion mechanisms of artificial humic acid are feedstock-dependent. **Carbon Research**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 1–14, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44246-023-00085-x>. Acesso em: 27 abr. 2025.

LIZARAZO, C.I. *et al.* Sustainable Mixed Cropping Systems for the Boreal-Nemoral Region. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, [s. l.], v. 4, p. 551107, 2020. Disponível em: www.frontiersin.org. Acesso em: 10 ago. 2024.

LOCATELLI, J.L. *et al.* Soil carbon allocation, composition, and sequestration changes induced by cropping diversification in tropical systems. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 248, p. 106464, 2025. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198725000182?casa_token=4PurflAnJ0YAAAAA:yPC0NAnnUWpkf2WNq-4g-H_Er10c-ujvd7bszFVikBSchY-SdXr8Ksjr5Td8Ib2n3MKdD6bHXY8 Acesso em: 8 abr. 2025.

LU, X. *et al.* Nitrogen addition stimulates soil aggregation and enhances carbon storage in terrestrial ecosystems of China: A meta-analysis. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 27, n. 12, p. 2780–2792, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcb.15604>. Acesso em: 7 jun. 2024.

LUO, L. *et al.* Nitrogen addition may promote soil organic carbon storage and CO₂ emission but reduce dissolved organic carbon in Zoige peatland. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 324, p. 116376, 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479722019491?casa_token=ff8ZoZgHIwEAAAAA:Nzk18gKaFvE7gpTHGAXrL2D91z_VyN15daQA06_hKhF8QAi9q4_u_BiWMsVuWeKqGamlZWw5H3w Acesso em: 7 jun. 2024.

MACHADO, P.L.O. de A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 329–334, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/CB6Dn3MwxgLYNcdmwjYmvZF/>. Acesso em: 9 nov. 2023.

MALIK, A.A. *et al.* Defining trait-based microbial strategies with consequences for soil carbon cycling under climate change. **The ISME Journal**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 1–9, 2020. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1038/s41396-019-0510-0>. Acesso em: 25 fev. 2025.

MAZZILLI, S.R. *et al.* Priming of soil organic carbon decomposition induced by corn compared to soybean crops. **Soil Biology and Biochemistry**, [s. l.], v. 75, p. 273–281, 2014. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071714001254?casa_token=BO MXZkq2ty0AAAAA:0TPFXI3kaI4NvILi1p7DvIL5dUOOylYOJrJaB9UMa8LtoHgou6 Q34f5wVvdKt720do6cm2Fngzk Acesso em: 26 fev. 2025.

MULEKE, A. *et al.* Clarifying confusions over carbon conclusions: antecedent soil carbon drives gains realised following intervention. **Global Environmental Change Advances**, [s. l.], v. 1, p. 100001, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2950138523000013> Acesso em: 17 abr. 2025.

NOOR, M.A. Nitrogen management and regulation for optimum NUE in maize – A mini review. **Cogent Food & Agriculture**, [s. l.], v. 3, n. 1, 2017. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/23311932.2017.1348214>. Acesso em: 26 jun. 2024.

NOVAIS, G.T. **Climas do Brasil: classificação climática e aplicações**. 1. ed. Porto Alegre, RS: Totalbooks, 2023. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/51/o/Livro_dos_Climas_do_Brasil_-_final.pdf Acesso em: 26 out. 2023.

NTONTA, S. *et al.* Crop residues differ in their decomposition dynamics: Review of available data from world literature. **Geoderma**, [s. l.], v. 419, p. 115855, 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706122001628?casa_token=LR M6K5Hyxp8AAAAA:4_ms-BYOtgTyZlhv4m4tr96NBXbx0Xpkev426PR-SH6E2PCIfNV4iWpku6TLYSkjrL9cQtrMIk Acesso em: 17 abr. 2025.

NUNES, L.J.R. The Rising Threat of Atmospheric CO₂: A Review on the Causes, Impacts, and Mitigation Strategies. **Environments**, 2023, Vol. 10, Page 66, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 66, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3298/10/4/66/htm>. Acesso em: 26 jun. 2024.

OGINO, C.M. *et al.* Poder de compra, preço e consumo de fertilizantes minerais: uma análise para o centro-oeste brasileiro. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, [s. l.], v. 59, n. 1, p. e220367, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/resr/a/YRXYFYCdQnYcqBzRVxnn5Zd/?lang=pt>. Acesso em: 22 jun. 2024.

PACHECO, L.P. *et al.* Biomass yield in production systems of soybean sown in succession to annual crops and cover crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 52, n. 8, p. 582–591, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/ZH7hNyFFstNgXBzMnJkbtCQ/?lang=en>. Acesso em: 26 out. 2023.

PASSOS, A.M.A. dos; ALVARENGA, R.C.; SANTOS, F.C. dos. Sistema de plantio direto. Brasília, DF: **Embrapa**, 2018. cap. 3, p. 61-104, [s. l.], p. 61–104, 2018.

Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1101765>. Acesso em: 25 ago. 2023.

PEIXOTO, L. *et al.* Decreased rhizodeposition, but increased microbial carbon stabilization with soil depth down to 3.6 m. **Soil Biology and Biochemistry**, [s. l.], v. 150, p. 108008, 2020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071720303047?casa_token=LQrRgKNM8gwAAAAA:jv5LjFdUDhCYTHMy0sXvLANf1J3shTX7EoutN-xwq9gai06IEWXPfs8zMUEjungYwe-oOhT0sBM Acesso em: 1 mar. 2025.

PISARČIK, M. *et al.* Role of cover crop roots in soil organic carbon accrual—A review. **European Journal of Soil Science**, [s. l.], v. 75, n. 4, p. e13532, 2024. Disponível em: <https://onlinelibrary-wiley-com.ez54.periodicos.capes.gov.br/doi/full/10.1111/ejss.13532>. Acesso em: 8 abr. 2025.

POEPLAU, C.; DON, A. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s. l.], v. 200, p. 33–41, 2015. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880914004873?casa_token=NcVsZ-W20rIAAAAA:E7oX4vJHnjJDvPFDUoXzAzteZWG3ETX_6_HuQjUhXzy3u-KvsrVxKtFOPKWdyLMV4AQc3A1zmtU Acesso em: 5 jul. 2024.

R CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 21 de Mar. 2025.

RAMOS, M.L.G. *et al.* Carbon fractions in soil under no-tillage corn and cover crops in the Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 55, p. e01743, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/7ppJ74XdLL4pKzWBYdNpR9b/?lang=en&format=html>. Acesso em: 26 out. 2023.

RIBEIRO, F.P. *et al.* Individual Carbon Modeling in Eucalyptus Stands in the Cerrado Region. **Forests**, 2024, Vol. 15, Page 1332, [s. l.], v. 15, n. 8, p. 1332, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-4907/15/8/1332/htm>. Acesso em: 27 abr. 2025.

RIGON, J.P.G. *et al.* Using cover crops to offset greenhouse gas emissions from a tropical soil under no-till. **Experimental Agriculture**, [s. l.], v. 57, n. 4, p. 217–231, 2021. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/experimental-agriculture/article/abs/using-cover-crops-to-offset-greenhouse-gas-emissions-from-a-tropical-soil-under-notill/8C119B57B430B8FA4EA7381BAF10DEDB>. Acesso em: 5 jun. 2024.

ROCHA, K. F. *et al.* Fate of 15N fertilizer applied to maize in rotation with tropical forage grasses. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 238, p. 35–44, 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429019301893?casa_token=C1APAT2gCs0AAAAA:5T5L6PMvLwjH3NPtJfKWMBjJN2xuP-v7pMkQB-UCkm4Q0IuVPE1w-BkpUyRzgavx7hf0N5YvolU Acesso em: 27 jun. 2024.

SARLAKI, E. *et al.* Advances and challenges in humic acid production technologies from natural carbonaceous material wastes. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], v. 498, p. 155521, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com.ez54.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S1385894724070128?via%3Dihub#b0050>. Acesso em: 27 abr. 2025.

SCHWARZER, S.; SCHMIDT, H.Peter. Humus Enrichment of Soils. **3 Degrees More**, [s. l.], p. 205–224, 2024. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-58144-1_10. Acesso em: 27 abr. 2025.

Sidak, Z. Rectangular confidence regions for the means of multivariate normal distributions. **Journal of the American statistical association**, v. 62, n. 318, p. 626-633, 1967. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1967.10482935> Acesso em: 10 ago. 2025.

SILVA, B. de O. *et al.* Implications of converting native forest areas to agricultural systems on the dynamics of CO₂ emission and carbon stock in a Cerrado soil, Brazil. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 358, p. 120796, 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479724007825?casa_token=g36AcmGgVdkAAAAA:koW7qWJokp4ABI9Zjd8oCsV09-PRQRdgdxCQ0t_IC29U96STNa4ibytZDNcHLfhhMI0LbXYkblc. Acesso em: 22 maio 2025.

SISTI, C.P.J. *et al.* Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 76, n. 1, p. 39–58, 2004. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016719870300196X?casa_token=FaH9G8wMKDMAAAAA:2Ep3ZJdAXNEywRbJ5R-Cfc1jT7TNCzNiVVZ6WtmsjHBR49HsHsP81tfm8KEF5td1pumCRhdZU88 Acesso em: 26 dez. 2023.

SNYDER, J.D.; TROFYMOW, J.A. A rapid accurate wet oxidation diffusion procedure for determining organic and inorganic carbon in plant and soil samples. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [s. l.], v. 15, n. 5, p. 587–597, 1984. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00103628409367499>. Acesso em: 20 nov. 2023.

SOUZA, V.S. *et al.* Cover crop diversity for sustainable agriculture: Insights from the Cerrado biome. **Soil Use and Management**, [s. l.], v. 40, n. 1, p. e13014, 2024. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/sum.13014>. Acesso em: 10 ago. 2024.

ST. LUCE, M. *et al.* Long-term effects of tillage and nitrogen fertilization on soil C and N fractions in a corn–soybean rotation. **Canadian Journal of Soil Science**, [s. l.], v. 102, n. 2, p. 277–292, 2022. Disponível em: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/cjss-2021-0129>. Acesso em: 11 abr. 2025.

SUM, W.; SHAHRAJABIAN, M.H; CHENG, Q. Archaea, bacteria and termite, nitrogen fixation and sustainable plants production. **Not Bot Horti Agrobo**, [s. l.], v. 49, n. 2, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/351346653_Archaea_Bacteria_and_Termite_Nitrogen_Fixation_and_Sustainable_Plants_Production. Acesso em: 1 jan. 2024.

SWIFT, R.S. Organic Matter Characterization. *Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods*, [s. l.], p. 1011–1069, 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2136/sssabookser5.3.c35>. Acesso em: 14 nov. 2024.

TALBOT, Jennifer M.; TRESEDER, Kathleen K. Interactions among lignin, cellulose, and nitrogen drive litter chemistry–decay relationships. **Ecology**, v. 93, n. 2, p. 345–354, 2012. Disponível em: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/journal/19399170>. Acesso em: 14 nov. 2024.

TEI, F. *et al.* Nitrogen management of vegetable crops. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 240, p. 106316, 2020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377420302298?casa_token=KkQGN1YmMIUAAAAA:jdd6-pS9lcJ09GO1O1314ihSRv9Ou8ZrDuDV47K9D6Q_xdp56KoHDDOCC2qpULMsOcSIqDwVrFw. Acesso em: 10 ago. 2024.

Tukey, J. W. The problem of multiple comparisons. **Multiple comparisons**, 1953. Disponível em: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1572543024859553152>. Acesso em: 10 ago. 2025.

VEECK, G.P. *et al.* CO₂ flux in a wheat-soybean succession in subtropical Brazil: A carbon sink. **Journal of Environmental Quality**, [s. l.], v. 51, n. 5, p. 899–915, 2022. Disponível em: <https://onlinelibrary-wiley-com.ez54.periodicos.capes.gov.br/doi/full/10.1002/jeq2.20362>. Acesso em: 21 abr. 2025.

VIEIRA, K.C. *et al.* Potential for environmental contamination of herbicides used in corn, soy and sugar cane cultures. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 9, n. 9, p. e417997442–e417997442, 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/7442>. Acesso em: 27 out. 2023.

VIKRAM, N. *et al.* Properties of Humic Acid Substances and Their Effect in Soil Quality and Plant Health. *Humus and Humic Substances. Recent Advances*, [s. l.], 2022. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/82621>. Acesso em: 19 abr. 2025.

YANG, Y. *et al.* Drivers of soybean-based rotations synergistically increase crop productivity and reduce GHG emissions. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s. l.], v. 372, p. 109094, 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880924002123?casa_token=hQrklvUtzKUAAAAA:97hr5MqetrXGj1juWo1EeiE_tyTdKVvAJKwH8zRM-8XD2-2b-UwRmNC3U3EGc3ifD7AH64ah0ec. Acesso em: 17 abr. 2025.

YEOMANS, J.C.; BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [s. l.], v. 19, n. 13, p. 1467–1476, 1988. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00103628809368027>. Acesso em: 14 nov. 2024.

ZHANG, C. *et al.* Long-term warming and nitrogen fertilization affect C-, N- and P-acquiring hydrolase and oxidase activities in winter wheat monocropping soil. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 18542, 2021a. Disponível em: [/pmc/articles/PMC8448830/](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8448830/). Acesso em: 27 jun. 2024.

ZHANG, W.P. *et al.* Shifts from complementarity to selection effects maintain high productivity in maize/legume intercropping systems. **Journal of Applied Ecology**, [s. l.], v. 58, n. 11, p. 2603–2613, 2021b. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/1365-2664.13989>. Acesso em: 28 fev. 2025.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos dados de forma geral mostra que houve efeito da transição milho/soja para os atributos avaliados, em relação ao uso de PCs as variáveis foram são similares entre os tratamentos, com variações pontuais observadas principalmente sob condição de adubação nitrogenada. Vários atributos podem ser utilizados para identificar as alterações no solo em função do sistema de manejo adotado.

Nesse trabalho, observamos que os atributos mais sensíveis às mudanças de manejo do solo, são: 1) Estoques de C do solo ao longo dos anos; 2) As emissões acumuladas e em escala de rendimento de N_2O ; 3) As frações da MOS as substâncias húmicas, especialmente os AF na ausência de adubação nitrogenada. Esses parâmetros permitiram discriminar os efeitos da transição milho/soja e das diferentes PCs com manejo do N sobre a dinâmica do C e do N nos sistemas agrícolas. Além disso, a produtividade do milho também se mostrou interação entre PCs e aporte de N, que se destaca como importantes indicadores da sustentabilidade.

De forma geral a planta de cobertura mais indicada para acumular C e reduzir as emissões de N_2O é *Mucuna aterrima*, pois, considera os seguintes aspectos: Redução das emissões de N_2O (a *Mucuna aterrima* apresentou os menores valores de emissão de N_2O em escala de rendimento sem a aplicação de N-fertilizante); e, acúmulo de C no solo (embora todos os tratamentos tenham promovido incremento nos estoques de C ao longo dos anos a *Mucuna aterrima* foi destaque em relação a fração HUM com adubação nitrogenada).

Os benefícios da *Mucuna aterrima* quanto à eficiência ambiental do sistema (redução de N_2O e incremento de C estável) a tornam uma excelente alternativa para sistemas que visam maior sustentabilidade e menor impacto climático. Entretanto, se o foco for otimizar produtividade agrícola associada ao uso do N, a *Crotalaria juncea* também se destaca, especialmente sob adubação nitrogenada, pela melhor eficiência no uso do N-fertilizante.