

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CAMPUS DE CHAPADÃO DO SUL

JULIA PROCESSO GUERREIRO

**ITREGRAÇÃO LAVOURA – PECUÁRIA - FLORESTA: EMISSÃO DE
CARBONO, TEMPERATURA E UMIDADE DO SOLO EM DIFERENTES
ÉPOCAS**

CHAPADÃO DO SUL-MS

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CAMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**ITREGRAÇÃO LAVOURA – PECUÁRIA - FLORESTA: EMISSÃO DE
CARBONO, TEMPERATURA E UMIDADE DO SOLO EM DIFERENTES
ÉPOCAS**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheira Agrônoma.

Orientador: Prof. Msc. Aldair Felix da Silva

CHAPADÃO DO SUL-MS

2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus por toda força e discernimento ao longo do curso. A minha família que me guiaram em cada passo desta jornada, em especial ao meu pai que faleceu no início da jornada espero que esteja satisfeito e orgulhoso pela pessoa em que estou me tornando.

Aos meus amigos por todo companheirismo ao longo desta trajetória, e todos que ajudaram na realização deste trabalho e pelo apoio inestimável. A Universidade Federal de Mato Grosso do Sul pela oportunidade e pelo aprendizado. Em especial ao meu orientador, Professor Aldair Felix e co-orientadora Dra. Dthenifer Cordeiro, sem eles nada disso seria possível.

16/06/2025, 16:35

SEI/UFMS - 5686434 - Ata



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



ATA DE DEFESA FINAL DO TCC

Bacharelado em Agronomia.

Aos treze dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e cinco, no horário das 09h30 às 11h30, foi realizada a defesa pública do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) da acadêmica **Júlia Processo Guerreiro**, intitulado "**INTREGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA FLORESTA: EMISSÃO DE CARBONO, TEMPERATURA E UMIDADE DO SOLO EM DIFERENTES ÉPOCAS**". Os trabalhos foram instalados pelo Orientador Prof. Me. Aldair Félix da Silva, presidente da Banca Examinadora, constituída pelos seguintes membros: Eng. Agr. Ma. Natielly Pereira da Silva e Eng. Agr. Gabriela Souza Oliveira. A Banca Examinadora avaliou o trabalho e atribuiu a nota média, no valor de 9,8 (Nove vírgula 8) sendo a discente considerada **aprovada**. Encerrados os trabalhos, os Examinadores deram ciência à examinada da decisão. Proclamada a decisão pelo Prof. Me Aldair Félix da Silva, presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos. E para constar eu, Andressa Ferreira Domingos, confiro e assino a presente Ata juntamente com os membros da Banca Examinadora.

Chapadão do Sul, 13 de junho de 2025.

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Aldair Félix da Silva, Professor do Magisterio Superior - Substituto**, em 13/06/2025, às 11:40, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Natielly Pereira da Silva, Usuário Externo**, em 16/06/2025, às 07:57, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Gabriela Souza Oliveira, Usuário Externo**, em 16/06/2025, às 07:59, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5686434** e o código CRC **F5EEBBAA**.

INTEGRAÇÃO LAVOURA – PECUÁRIA - FLORESTA: EMISSÃO DE CARBONO, TEMPERATURA E UMIDADE DO SOLO EM DIFERENTES ÉPOCAS

RESUMO: A integração lavoura pecuária floresta funciona como meio de mitigação para emissão de carbono. Dessa forma é importante avaliar as emissões nesse sistema em estações do ano muito específicas que ocorrem no Cerrado brasileiro, localidade de maior importância agrícola do país. Dessa forma o objetivo do trabalho foi avaliar a emissão de carbono (FCO₂), temperatura e umidade do solo em um sistema de integração lavoura e pecuária no verão e no inverno no município de Chapadão do Sul. A condução desse experimento foi realizada na Fazenda Campo Alegre, no município de Chapadão do Sul, Mato Grosso do Sul. Foram avaliadas a emissão de carbono (FCO₂), a temperatura e a umidade do solo em um sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), em dois períodos sazonais distintos: inverno (agosto) contendo forragem como cobertura de solo e verão (dezembro) com cobertura de soja, ambas as avaliações ocorridas em 2024. Para a mensuração in situ da emissão de CO₂ do solo, foram instalados 20 anéis de PVC em cada área experimental, com 24 horas de antecedência à coleta de dados e a quantificação da FCO₂ foi realizada utilizando o sistema portátil EGM-5. Simultaneamente, foram monitoradas a temperatura e a umidade do solo com um sensor HydraProbe acoplado ao equipamento. Os dados obtidos foram submetidos à análise de comparação de médias. Além disso, foi realizada uma análise de componentes principais (PCA). Os resultados demonstraram que as emissões de CO₂ no sistema ILP foram maiores no verão, período marcado por maior umidade o que proporciona maior atividade biológica no solo.

PALAVRAS CHAVE: gases de efeito estufa, diversidade agrícola, carbono orgânico do solo

ABSTRACT: Crop-livestock integration works as a means of mitigating carbon emissions. Therefore, it is important to evaluate emissions in this system in very specific seasons that occur in the Brazilian Cerrado, the most important agricultural location in the country. Thus, the objective of this work was to evaluate carbon emissions (FCO₂), soil temperature and moisture in an integrated crop-livestock system in summer and winter in the municipality of Chapadão do Sul. This experiment was carried out at Fazenda Campo Alegre, in the municipality of Chapadão do Sul, Mato Grosso do Sul. Carbon emissions (FCO₂), soil temperature and moisture were evaluated in an integrated crop-livestock-forestry (ILPF) system, in two distinct seasonal periods: winter (August) containing forage as soil cover and summer (December) with soybean cover, both evaluations occurred in 2024. For the in situ measurement of soil CO₂ emissions, 20 PVC rings were installed in each experimental area, 24 hours before data collection, and the quantification of FCO₂ was performed using the EGM-5 portable system. Simultaneously, soil temperature and moisture were monitored with a HydraProbe sensor attached to the equipment. The data obtained were subjected to mean comparison analysis. In addition, a principal component analysis (PCA) was performed. The results showed that CO₂ emissions in the ILP system were higher in the summer, a period marked by higher humidity, which provides greater biological activity in the soil.

KEYWORDS: greenhouse gases, agricultural diversity, soil organic carbon

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	8
MATERIAL E MÉTODOS	9
RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
CONCLUSÃO	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15

INTRODUÇÃO

Atribuído as mudanças climáticas globais, dentre as metas governamentais a nível global está a mitigação de emissão de carbono, em que o ciclo do carbono se tornou um importante item de pesquisa científica (Peters et al., 2020). A respiração do solo está entre as maiores fontes de fluxo de carbono para a atmosfera e desempenha um papel importante na regulação do ciclo global do elemento (Liu et al., 2023).

Pequenas mudanças no manejo do solo podem alterar significativamente a concentração atmosférica de CO₂, uma vez que tais práticas afetam diretamente os processos de emissão e sequestro de carbono nos agroecossistemas (Piao et al., 2018; Smith et al., 2023). As terras agrícolas armazenam aproximadamente 10% do carbono orgânico presente nos solos globais (Lal, 2004), e, portanto, representam um importante reservatório de carbono com potencial para mitigar os efeitos das mudanças climáticas. O manejo adequado dessas áreas pode promover o aumento da matéria orgânica no solo, reduzir as perdas por mineralização e erosão, além de intensificar o sequestro de carbono atmosférico (Amundson et al., 2015; Minasny et al., 2022).

Práticas eficazes de agricultura de conservação, como os sistemas de Integração Lavoura-Pecuária (ILP), têm se mostrado promissoras no aumento do sequestro de carbono no solo, ao mesmo tempo em que promovem a intensificação sustentável da produção agropecuária (Leite et al., 2023; Calegari et al., 2022). O sistema ILP integra diferentes componentes produtivos, em uma mesma área, de forma rotativa, sinérgica e sustentável, favorecendo a ciclagem de nutrientes, a melhoria da estrutura do solo e o acúmulo de matéria orgânica (Silva et al., 2023). Paul et al. (2022) destacam que a ILP é uma estratégia eficaz para a mitigação das emissões de carbono, pois reduz a necessidade de abertura de novas áreas e promove a recuperação de pastagens degradadas, contribuindo para o aumento da resiliência dos sistemas produtivos frente às mudanças climáticas.

Nesse contexto, torna-se essencial a quantificação das emissões de gases de efeito estufa, como o CO₂, ao longo do ciclo produtivo e sob diferentes condições sazonais. Isso é especialmente relevante em regiões como o Cerrado brasileiro, bioma de elevada importância agrícola e alta sensibilidade climática, onde as variações entre as estações do ano são marcantes e podem influenciar significativamente os processos de emissão e sequestro de carbono (Dias-Filho, 2021; Oliveira et al., 2024). Assim, compreender o comportamento das emissões em diferentes épocas do ano nesse bioma é fundamental

para validar a sustentabilidade ambiental dos sistemas ILPF e orientar políticas públicas e estratégias de manejo voltadas à mitigação das mudanças climáticas.

Dessa forma o objetivo do trabalho foi avaliar a emissão de carbono (FCO₂), temperatura e umidade do solo em um sistema de integração lavoura e pecuária no verão e no inverno no município de Chapadão do Sul.

MATERIAL E MÉTODOS

A condução desse experimento foi realizada na Fazenda Campo Alegre, no município de Chapadão do Sul, Mato Grosso do Sul (18,79128° S, 52,74724° O, com 810 m de altitude). O clima da região é classificado como Tropical de Savana (Aw), segundo a classificação de Köppen e Geiger, com inverno seco e verão chuvoso. O solo predominante da região é o Latossolo Vermelho Distrófico Argiloso. A característica do solo da localidade em que foi avaliado o experimento consta na Tabela 1.

Tabela 1. Características do solo da área experimental

Prof.	pH	Ca + Mg	Ca	Mg	Al	H + Al	K	P (Mech)	S
	(CaCl ₂)		cmolc dm ⁻³					Mg dm ⁻³	
0-20	5,71	5,86	4,24	1,62	0,04	2,61	0,21	20,45	15,96
20-40	5,12	2,58	1,78	0,8	0,07	3,37	0,11	4,05	45,34
Prof.	M.O	T	V%	Argila		Silte		Areia	
	g dm ⁻³	cmolc dm ⁻³				g/dm ³			
0-20	28,80	8,14	73,49	265		40		665	
20-40	16,81	5,82	45,58	490		65		470	

Foram avaliadas a emissão de carbono (FCO₂), a temperatura e a umidade do solo em um sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), em dois períodos sazonais distintos: inverno (agosto) contendo forragem como cobertura de solo e verão (dezembro) com cobertura de soja, ambas as avaliações ocorridas em 2024. As coletas foram realizadas em áreas manejadas sob diferentes estratégias de uso do solo, com o objetivo de quantificar as variações nos fluxos de CO₂ e nas condições microambientais ao longo do tempo.

Para a mensuração *in situ* da emissão de CO₂ do solo, foram instalados 20 anéis de PVC em cada área experimental, com 24 horas de antecedência à coleta de dados, a fim de minimizar distúrbios no solo. Os anéis, com volume interno de 854,2 cm³ e área

de contato de 83,7 cm², atuaram como câmaras de sistema fechado, impedindo interferências externas que pudessem alterar os fluxos naturais de emissão de gases.

A quantificação da FCO₂ foi realizada utilizando o sistema portátil EGM-5 (modelo AGA560), equipado com sensor infravermelho que opera por espectroscopia de absorção óptica na região do infravermelho (modelo ACS041). As leituras foram feitas durante 30 segundos por ponto, com registros contínuos da pressão barométrica interna a cada segundo, totalizando 30 medições por local. A estimativa da taxa de emissão de CO₂ foi calculada por meio do ajuste da variação da concentração de CO₂ ao longo do tempo, utilizando regressão quadrática, com correção para os efeitos da umidade.

Simultaneamente, foram monitoradas a temperatura e a umidade do solo com um sensor HydraProbe (Stevens), acoplado ao sistema EGM-5. O sensor possui uma sonda com três hastes de 12 cm, inseridas perpendicularmente ao solo e posicionadas a 5 cm dos anéis de PVC, assegurando medições representativas das condições do entorno imediato dos pontos de emissão.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de comparação de médias, visando identificar os manejos que proporcionaram as maiores e menores emissões de CO₂ do solo. As representações gráficas foram elaboradas no software R, utilizando o pacote ggplot2, com gráficos de barras que expressam as médias dos tratamentos. Além disso, foi realizada uma análise de componentes principais (PCA) no mesmo ambiente estatístico, com o intuito de explorar as correlações entre as variáveis ambientais medidas e os diferentes sistemas de manejo adotados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A emissão de carbono no sistema ILPF apresentou maior média no verão (3.68 g m⁻² h⁻¹) em que há maior incidência de chuvas (Figura 1) em contrapartida no inverno a emissão teve média de 1.71 g m⁻² h⁻¹. Assim como a temperatura do solo apresentou maiores médias no período de inverno chegando a 35.5°C, no verão com média de 24.71°C, havendo grande variabilidade de 5.83 a 29.50 °C. Quanto a umidade, foi maior no período do verão que possui maior pluviosidade contribuindo para essa maior média.

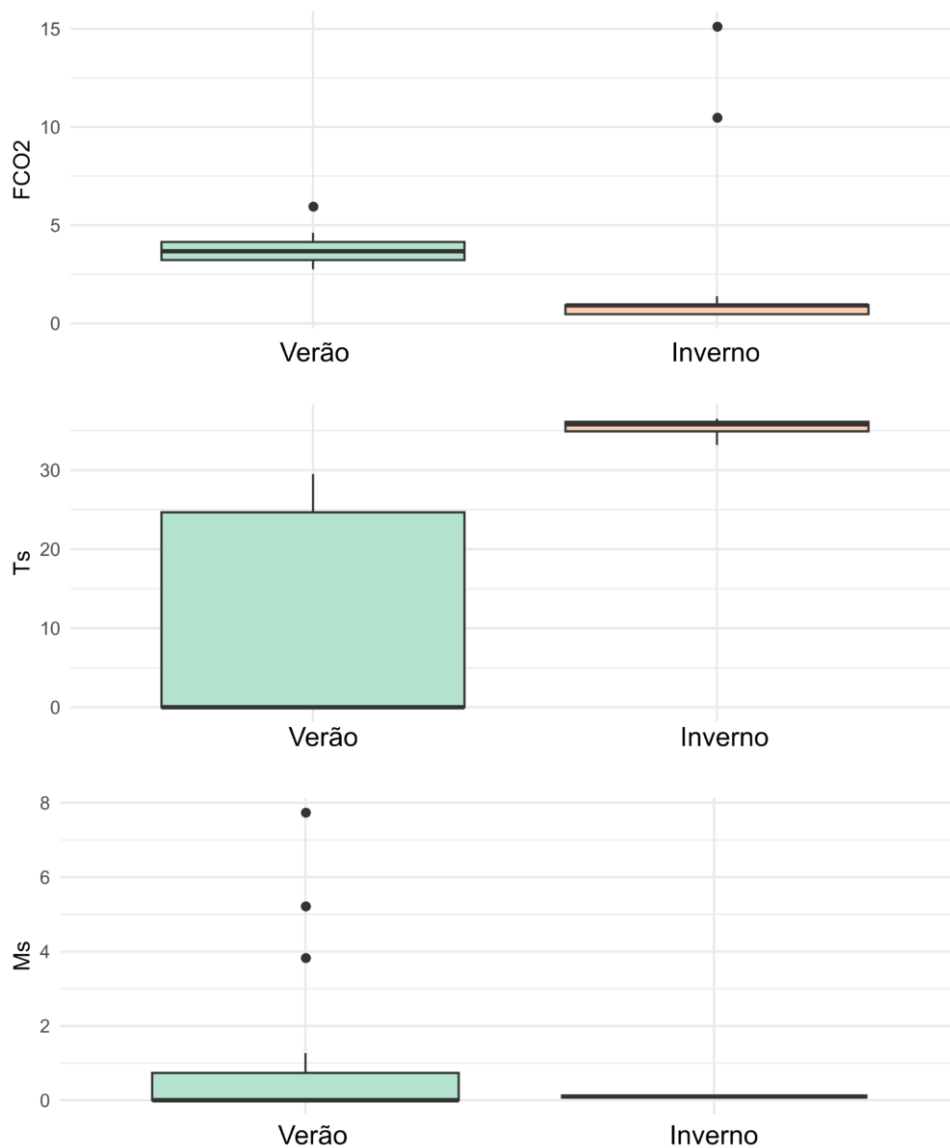


Figura 1. Gráfico de barras para as variáveis emissão de CO₂ do solo in situ (FCO₂), umidade do solo (Ms), temperatura do solo (Ts) e fluxo de CO₂ avaliadas em diferentes manejos de solo avaliados em Chapadão do Sul, Mato Grosso do Sul.

A maior emissão de carbono observada no sistema ILPF durante o verão (média de 3,68 g m⁻² h⁻¹) tal comportamento pode ser associado ao aumento da pluviosidade típica dessa estação. Estudos provaram que as emissões de CO₂ do solo foram controladas pela temperatura e umidade (Mi et al., 2015; Voigt et al., 2017). A decomposição da matéria orgânica (MO) é considerada o processo biogeoquímico mais relevante e é afetada diretamente pelas alterações pluviométricas (Raza et al., 2023). A alta disponibilidade de água no solo favorece a atividade e o acúmulo de matéria orgânica,

processos que podem contribuir maior liberação de CO₂ para a atmosfera (Bertini et al., 2022).

Em contraste, no inverno, a emissão média de CO₂ foi consideravelmente menor (1,71 g m⁻² h⁻¹), o que pode ser atribuído à redução das chuvas e, conseqüentemente, à menor umidade do solo. A disponibilidade hídrica é um dos principais fatores que regulam a atividade microbiana no solo, e sua diminuição tende a limitar a decomposição da matéria orgânica e a respiração microbiana, resultando em menores taxas de emissão de carbono (Zhou et al., 2021). No entanto, esse efeito pode não ser linear. Segundo Lu et al. (2022), em certos contextos, a diminuição da umidade pode provocar pulsos de emissão de CO₂, especialmente após reumidificação do solo, quando microrganismos rapidamente mineralizam frações mais lábeis do carbono orgânico anteriormente protegidas em microambientes secos.

Essa dinâmica está associada a processos de dessecação e reidratação que afetam a estabilidade do carbono no solo, promovendo sua transformação em formas mais acessíveis ao metabolismo microbiano. Assim, embora a média de emissões no inverno seja menor, eventos pontuais de reativação biológica podem contribuir para fluxos temporários de CO₂, especialmente em regiões tropicais com elevada variabilidade hídrica, como o Cerrado brasileiro (Meisner et al., 2017; Figueiredo et al., 2023). Além disso, interações entre umidade e temperatura do solo também modulam a resposta dos microrganismos, podendo favorecer ou inibir a produção de gases como CO₂ e, em condições específicas de anaerobiose, até mesmo metano (CH₄), conforme relatado por Wei et al. (2020).

A temperatura do solo foi maior no inverno, atingindo médias de até 35,5 °C, em comparação ao verão, cuja média registrada foi de 24,71 °C, mesmo com a maior emissão de carbono sendo observada no verão. Esse aparente contraste pode ser explicado, principalmente, pela menor cobertura vegetal no período seco, característica marcante do inverno no Cerrado. A escassez de biomassa e de palhada sobre o solo permite uma maior incidência direta da radiação solar, promovendo o aquecimento mais intenso da superfície (Santos et al., 2022). Além disso, a ausência de sombreamento proporcionado pelas culturas cultivadas durante o verão reduz o isolamento térmico, o que colabora para o aumento da temperatura do solo em períodos de baixa umidade.

De uma forma geral, o aumento da temperatura do solo pode estimular a atividade microbiana e, conseqüentemente, intensificar a decomposição da matéria orgânica e a liberação de CO₂ (Song et al., 2014), esse efeito depende de condições favoráveis à

respiração do solo, como a disponibilidade de umidade e de substrato orgânico. No inverno, a limitação hídrica pode suprimir a atividade biológica, impedindo que as altas temperaturas resultem em maiores fluxos de carbono para a atmosfera (Wang et al., 2021). Assim, a interação entre temperatura e umidade é um fator determinante na regulação da emissão de CO_2 do solo, especialmente em sistemas tropicais onde essas variáveis apresentam elevada amplitude sazonal (Zhou et al., 2023).

Na análise de PCA (Análise de Componentes Principais), foi notável que os vetores de umidade do solo e emissão de CO_2 (FCO_2) apresentaram forte associação durante o verão (Figura 2). Esse padrão reflete a maior disponibilidade hídrica decorrente do aumento da precipitação nessa estação, condição típica do regime climático do Cerrado. A elevação da umidade favorece a atividade microbiológica e enzimática no solo, intensificando os processos de mineralização da matéria orgânica e, consequentemente, a liberação de carbono na forma de CO_2 (Bastida et al., 2019).

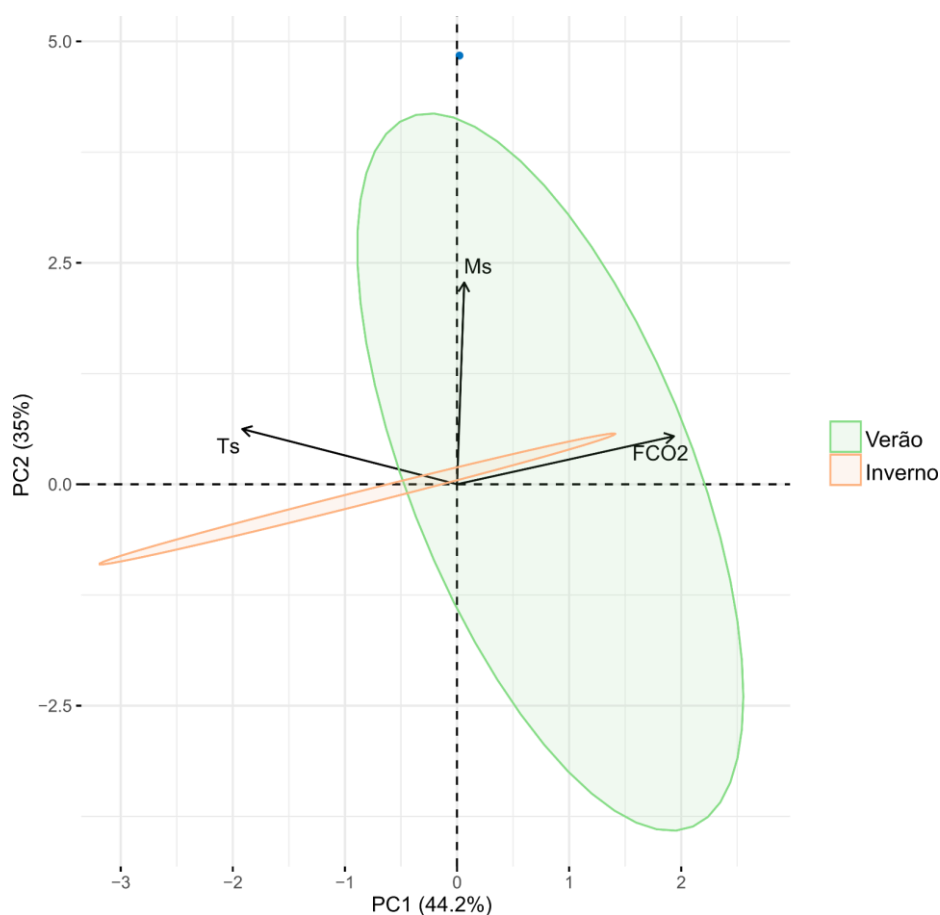


Figura 2. Análise de componentes principais para as variáveis emissão de CO₂ do solo in situ (FCO₂), umidade do solo (Ms), temperatura do solo (Ts) avaliadas em diferentes manejos de solo avaliados em Chapadão do Sul, Mato Grosso do Sul.

Além disso, a PCA permite identificar de maneira multivariada como variáveis ambientais se correlacionam e influenciam de acordo com o ambiente. No verão, as maiores correlações observadas entre umidade e FCO₂ indicam que o regime hídrico foi o principal fator modulador das emissões de carbono. Esse comportamento é combinado com a literatura, que aponta a umidade do solo como um dos controladores mais importantes da respiração do solo, especialmente em regiões tropicais sazonais, onde picos de umidade podem provocar intensa atividade microbiana (García-Palacios et al., 2020). Dessa forma, os resultados da PCA reforçam a relevância de condições hidrológicas na dinâmica do ciclo do carbono em sistemas agrícolas tropicais, como os de Integração Lavoura-Pecuária (ILP).

Os resultados indicam que as emissões de CO₂ no sistema ILP foram maiores no verão, coincidindo com o período de maior umidade e maior atividade biológica no solo. Embora isso represente um aumento na liberação de carbono, trata-se de um processo natural e esperado em solos biologicamente ativos, onde há intensa decomposição da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes. Conforme apontado por Lu et al. (2022), a variação na umidade e temperatura do solo pode estimular a transformação de carbono orgânico estável em formas mais ativas, utilizadas por microrganismos no metabolismo do solo. Assim, a emissão observada reflete o dinamismo do sistema e não deve ser interpretada como um impacto negativo, mas como parte do equilíbrio natural do ciclo do carbono, especialmente em sistemas sustentáveis como o ILP, que contribuem para o sequestro de carbono a longo prazo e para a melhoria da qualidade do solo.

CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram que as emissões de CO₂ no sistema ILP foram maiores no verão, período marcado por maior umidade o que proporciona maior atividade biológica no solo. Por outro lado, a temperatura foi maior no inverno.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMUNDSON, R. et al. Soil and human security in the 21st century. **Science**, v. 348, n. 6235, p. 1261071, 2015.
- BASTIDA, F. et al. Soil microbial diversity–biomass relationships are driven by soil carbon content across global biomes. **The ISME Journal**, v. 13, p. 2104–2116, 2019.
- BERTINI, S. C. B., & AZEVEDO, L. C. B. (2022). Soil microbe contributions in the regulation of the global carbon cycle. In **Microbiome under changing climate** (pp. 69–84). Woodhead Publishing.
- CALEGARI, A. et al. Carbon sequestration and soil quality improvements by no-tillage and crop-livestock integration systems in tropical regions. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 326, p. 107822, 2022.
- CARVALHO, J. L. N. et al. Mitigating greenhouse gas emissions in tropical livestock systems: A case study of integrated crop-livestock systems in Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 859, p. 160017, 2023.
- CHENU, C. et al. Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. **Soil and Tillage Research**, v. 188, p. 41–52, 2019.
- DIAS-FILHO, M. B. **Sistemas integrados de produção agropecuária: estratégias para intensificação sustentável no Cerrado brasileiro**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2021.
- FIGUEIREDO, C. C. et al. Soil carbon dynamics under varying moisture and temperature conditions in tropical agroecosystems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, p. e0230002, 2023.
- FRIEDLINGSTEIN, P. et al. Global Carbon Budget 2023. **Earth System Science Data**, v. 15, p. 5301–5365, 2023.
- GARCÍA-PALACIOS, P. et al. Winter climate change and microbial activity in soils: A meta-analysis to examine the consistency of microbial responses to simulated global warming. **Global Ecology and Biogeography**, v. 29, n. 8, p. 1349–1366, 2020.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, 123(1–2), 1–22.
- LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, v. 304, n. 5677, p. 1623–1627, 2004.
- Leite, F. F. G. D., Nóbrega, G. N., Baumgärtner, L. C., Alecrim, F. B., da Silveira, J. G., Cordeiro, R. C., & Rodrigues, R. D. A. R. (2023). Greenhouse gas emissions and carbon

sequestration associated with Integrated Crop–Livestock–Forestry (ICLF) systems. **Environmental Reviews**, 31(4), 589–604.

LEITE, L. F. C. et al. Integrated crop-livestock systems improve soil carbon and fertility in tropical regions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 343, p. 108304, 2023.

LIU, Y. et al. Global patterns and drivers of soil respiration under climate change. **Global Change Biology**, v. 29, n. 1, p. 40–56, 2023.

LIU, Z., HUANG, F., WANG, B., LI, Z., ZHAO, C., DING, R., ... & JIA, Z. (2023). Soil respiration in response to biotic and abiotic factors under different mulching measures on rain-fed farmland. **Soil and Tillage Research**, 232, 105749.

LU, B., SONG, L., ZANG, S., & WANG, H. (2022). Warming promotes soil CO₂ and CH₄ emissions but decreasing moisture inhibits CH₄ emissions in the permafrost peatland of the Great Xing'an Mountains. **Science of The Total Environment**, 829, 154725.

LU, F. et al. Soil moisture modulates microbial carbon use and CO₂ flux in terrestrial ecosystems. **Global Change Biology**, v. 28, n. 7, p. 2294–2306, 2022.

MEISNER, A. et al. Soil microbial respiration in response to moisture variability in a mesic grassland. **Global Change Biology**, v. 23, n. 5, p. 1831–1846, 2017.

MI, J., LI, J., CHEN, D., XIE, Y., & BAI, Y. (2015). Predominant control of moisture on soil organic carbon mineralization across a broad range of arid and semiarid ecosystems on the Mongolia plateau. **Landscape Ecology**, 30, 1683–1699.

MINASNY, B. et al. Soil carbon 4 per mille. **Geoderma**, v. 292, p. 59–86, 2022.

OLIVEIRA, A. F. et al. Seasonal variation in greenhouse gas emissions in integrated crop-livestock systems in the Brazilian Cerrado. **Agricultural Systems**, v. 213, p. 103553, 2024.

PAUL, K. I. et al. Carbon sequestration and emissions mitigation by integrated crop-livestock systems in tropical regions: A synthesis of evidence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 330, p. 107883, 2022.

PETERS, G. P. et al. Carbon dioxide emissions continue to grow amidst slowly emerging climate policies. **Nature Climate Change**, v. 10, p. 3–6, 2020.

PIAO, S. et al. Soil carbon losses and gains in a warming world. **Nature Climate Change**, v. 8, p. 1043–1047, 2018.

RAZA, T., QADIR, M. F., KHAN, K. S., EASH, N. S., YOUSUF, M., CHATTERJEE, S., ... & OETTING, J. N. (2023). Unraveling the potential of microbes in decomposition

of organic matter and release of carbon in the ecosystem. **Journal of Environmental Management**, 344, 118529.

SANTOS, T. B. et al. Influência da cobertura vegetal e da radiação solar na temperatura e umidade do solo no bioma Cerrado. **Agro@mbiente On-line**, v. 16, n. 1, p. 1–12, 2022.

SILVA, A. G. et al. Soil carbon dynamics and greenhouse gas emissions in integrated crop-livestock systems under tropical conditions. **Journal of Environmental Management**, v. 337, p. 117669, 2023.

SMITH, P. et al. Soils and climate change: Recent advances and future research needs. **SOIL**, v. 9, p. 123–139, 2023.

SONG, C., WANG, X., MIAO, Y., WANG, J., MAO, R., & SONG, Y. (2014). Effects of permafrost thaw on carbon emissions under aerobic and anaerobic environments in the Great Hing'an Mountains, China. **Science of the total environment**, 487, 604-610.

SONG, X. et al. Responses of soil respiration to warming and nitrogen addition in a temperate grassland of northern China. **Scientific Reports**, v. 4, p. 6423, 2014.

VOIGT, C., LAMPRECHT, R. E., MARUSHCHAK, M. E., LIND, S. E., NOVAKOVSKIY, A., AURELA, M., ... & BIASI, C. (2017). Warming of subarctic tundra increases emissions of all three important greenhouse gases—carbon dioxide, methane, and nitrous oxide. **Global Change Biology**, 23(8), 3121-3138.

WANG, J. et al. Soil respiration under different land use types across a climatic gradient in China: Interactions of temperature and moisture. **Forest Ecology and Management**, v. 491, p. 119213, 2021.

WEI, X. et al. Interactive effects of soil moisture and temperature on greenhouse gas emissions from agricultural soils: A review. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 296, p. 106882, 2020.

ZHOU, T. et al. Interactive effects of warming and precipitation changes on soil carbon dynamics in tropical ecosystems: A meta-analysis. **Global Ecology and Biogeography**, v. 32, n. 2, p. 244–257, 2023.

ZHOU, T. et al. Soil moisture and microbial activity control soil respiration response to warming in grasslands. **Science of the Total Environment**, v. 778, p. 146312, 2021.