

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

**PRODUTIVIDADE DA SOJA E DO MILHO SAFRINHA,
ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO EM
MANEJOS DE SOLO E DE CULTURAS**

ODAIR HONORATO DE OLIVEIRA

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2023**

**PRODUTIVIDADE DA SOJA E DO MILHO SAFRINHA,
ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO EM MANEJOS
DE SOLO E DE CULTURAS**

ODAIR HONORATO DE OLIVEIRA

Engenheiro Agrônomo

ORIENTADOR: PROF. DR. GESSÍ CECCON

Tese apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Produção Vegetal, para obtenção do título de Doutor.

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

O48p Oliveira, Odair Honorato de

Produtividade da soja e do milho safrinha, atributos físicos e químicos do solo em manejos de solo e de culturas [recurso eletrônico] / Odair Honorato De Oliveira. -- 2023.

Arquivo em formato pdf.

Orientador: Gessí Ceccon.

Tese (Doutorado em Agronomia)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2023.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:

<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Consórcio de milho safrinha-braquiária. 2. Preparos de solo. 3. Plantio Direto. 4. Plantas de cobertura. I. Ceccon, Gessí. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

PRODUTIVIDADE DA SOJA E MILHO SAFRINHA, ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO EM MANEJOS DE SOLO E DE CULTURAS

Por

Odair Honorato de Oliveira

Tese apresentada com parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de
DOUTOR EM AGRONOMIA

Aprovada em: 31/05/2023.

Prof. Dr. Gessí Ceccon
Orientador - UFGD/Embrapa
(participação remota)

Dra. Elisangela Dupas
Membro Titular – UFGD
(participação remota)

Prof. Dr. Munir Mauad
Membro Titular – UFGD
(participação remota)

Prof. Dra. Silvia Correa Santos
Membro Titular – UFGD
(participação remota)

Dr. Rodrigo Arroyo Garcia
Membro externo – Embrapa
(participação remota)

DEDICATÓRIA

À Deus, pela saúde, fé e perseverança. À minha família e esposa Karoline Omizolo de Souza, que sempre esteve ao meu lado em todos momentos, incentivando e sonhando juntos em alcançar este objetivo.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Eunice Jovelina de Santana Oliveira, ao meu pai José Honorato de Oliveira (*In memoriam*), aos meus irmãos Jauciano Honorato de Oliveira, Paulo Sergio Honorato de Oliveira, Pedro Honorato de Oliveira, Fabiana Eunice de Oliveira, Jaucilene Eunice de Oliveira e Taciana Eunice de Oliveira, pelo carinho, cuidado e dedicação durante minha caminhada.

À minha esposa Karoline Omizolo de Souza pelo apoio, confiança e incentivo em todos os momentos, sempre ao meu lado em busca desse objetivo.

À Universidade Federal da Grande Dourados, ao Programa de Pós-graduação em Agronomia, pelas oportunidades e o espaço cedido para desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de apoio nº - 141163/2020-8, que sem o apoio desta não seria possível o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador Dr. Gessí Ceccon, pela dedicação e atenção e também pela confiança desde o primeiro dia de trabalho, pela paciência, pelas oportunidades que me concedeu, pela amizade que construímos nesse tempo, além dos ensinamentos.

Aos colegas de equipe, Denise Prevedel Capristo, Mateus Aguiar do Nascimento e Rafael Jannini Leonelli. Aos funcionários do Laboratório de Análise de Solo da Embrapa Agropecuária Oeste, que nos auxiliaram durante a condução do experimento.

À Embrapa Agropecuária Oeste, pela disponibilização dos equipamentos e recursos necessários para a condução desta pesquisa.

Aos professores da Universidade Federal da Grande Dourados do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pelos ensinamentos transmitidos.

SUMÁRIO

	PÁGINA
LISTA DE QUADROS	vii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xv
1. REVISÃO DE LITERATURA	18
1.1. Atributos químicos do solo.....	18
1.2. Atributos físicos do solo.....	19
1.3. Manejos de solo.....	21
1.4. Plantas de cobertura.....	22
2. MATERIAL E MÉTODOS	24
2.1. Caracterização da área e clima	24
2.2. Delineamento experimental.....	26
2.3. Aplicação de corretivos e fertilizantes.....	26
2.4. Implantação dos manejo de culturas de cobertura 2020.....	27
2.5. Plantio da soja safra 2020/21	28
2.6. Plantio do consórcio milho safrinha-braquiária 2021	29
2.7. Avaliações	29
2.7.1. Avaliação das plantas de cobertura 2020.....	29
2.7.2. Avaliações da soja	30
2.7.3. Avaliação do consórcio milho safrinha-braquiária 2021	30
2.7.4. Avaliação da resistência do solo à penetração.....	30
2.7.5. Avaliação dos atributos físicos e químicos no solo	31
2.8. Análise Estatística	32
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
3.1. Culturas de cobertura.....	33
3.2. Soja safra 2020/2021	35
3.3. Milho safrinha 2021.....	42
3.4. Atributos físicos do solo	44
3.5. Atributos químicos do solo	57
4. CONCLUSÕES.....	78
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

LISTA DE QUADROS

	PÁGINA
Quadro 1. Teores de fósforo (P), matéria orgânica (MO), CTC e saturação por bases (V%) no solo, antes da implantação dos tratamentos. Dourados – MS, 2019.	25
Quadro 2. Umidade do solo (%) em função dos manejos de solo, no momento da avaliação da resistência do solo à penetração (RP), na área Experimental da Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados – MS, 2023.....	31
Quadro 3. Quadrado médio do resíduo da análise de variância para altura de plantas de braquiária (APB) e produtividade de massa seca da braquiária (PMS), em função dos manejos de solo e culturas, Dourados – MS, 2023.	33
Quadro 4. Altura de planta de braquiária (APB) e produtividade de massa seca da braquiária (PMS) cultivada na safra 2020 em função dos manejos de solo e de culturas. Dourados – MS, 2023.	34
Quadro 5. Quadrado médio do resíduo da análise de variância para altura de plantas (AP), comprimento da raiz (CR), massa seca da raiz (MSR), número de grãos por planta (NGP), massa de 100 grãos (M100), produtividade de massa seca (PMS) e de grãos de soja (PROD), em função dos manejos de solo e culturas, Dourados – MS, 2023.	36
Quadro 6. Altura de plantas (AP), comprimento da raiz (CR), massa seca da raiz (MSR), número de grãos por planta (NGP), massa de 100 grãos (M100), produtividade da massa seca (PMS) e de grãos da soja (PROD) em função dos manejos de solo, Dourados – MS, 2023.....	37
Quadro 7. Altura de plantas (AP), comprimento da raiz (CR), massa seca da raiz (MSR), número de grãos por planta (NGP), massa de 100 grãos (M100), produtividade da massa seca (PMS) e de grãos de soja (PROD) em função dos manejo de culturas, Dourados – MS, 2023.	38
Quadro 8. Produtividade de massa seca (PMS), massa seca da raiz (MSR), comprimento da raiz (CR) da soja em função da interação dos manejos de solo e culturas, Dourados – MS, 2023.....	40

- Quadro 9.** Altura de plantas (AP), número de grãos por planta (NGP), massa de 100 grãos (M100) e produtividade (PROD) da soja em função da interação dos manejos de solo e culturas, Dourados – MS, 2023. 41
- Quadro 10.** Quadrado médio do resíduo da variância para altura de plantas (AP), massa de 100 grãos (M100), número de grãos por espiga (NGE), produtividade da massa seca (PMS) e produtividade de grãos (PROD) do milho safrinha, em função dos manejos de solo e de culturas, Dourados – MS, 2023..... 42
- Quadro 11.** Altura de planta (AP), massa de 100 grãos (M100), número de grãos por espiga (NGE), produtividade de massa seca (PMS) e de grãos de milho safrinha (PROD) consorciado com braquiária em função dos manejo de culturas. Dourados – MS, 2023. 43
- Quadro 12.** Quadrado médio do resíduo da análise de variância para densidade (Ds), macroporosidade (Macro), porosidade total (PT) e resistência do solo a penetração (RP) em função dos manejos de solo, culturas e camadas de solo, e suas interações, Dourados – MS, 2023. 44
- Quadro 13.** Quadrado médio do resíduo da análise de variância para fósforo (P), matéria orgânica (MO), carbono orgânico total (COT), saturação por bases (V%), potencial hidrogeniônico em água (pH), potássio (K⁺), cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), alumínio (Al³⁺), capacidade de troca catiônica (CTC) em função dos manejos de solo, manejo de culturas e camadas, Dourados – MS, 2023. 57

LISTA DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1. Precipitação pluviométrica (mm) decenal e temperaturas máximas (TM) e mínimas (Tm) (°C) registradas durante os manejos culturas, em Dourados – MS. Fonte: Guia Clima (2023).	24
Figura 2. Precipitação pluviométrica (mm) decenal e temperaturas máximas (TM) e mínimas (Tm) (°C) registradas durante o cultivo da soja/2020 e milho safrinha/2021, em Dourados – MS. Fonte: Guia Clima (2023).	25
Figura 3. Incorporação do calcário e gesso com arado de discos (A), aivecas (B) e escarificador (C) na área experimental da Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados – MS, 2023.	27
Figura 4. Semeadura das culturas do outono-inverno em 2020 (Plantio Direto, à esquerda, escarificador ao centro e arado de discos à direita) na área experimental da Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados – MS, 2023.	28
Figura 5. Coleta de dados da resistência a penetração do solo através do penetrógrafo Falker® e umidade do solo, na área Experimental da Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados – MS, 2023.	31
Figura 6. Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para densidade do solo (g dm ³). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Dourados – MS, 2023.	45
Figura 7. Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para macroporosidade do solo (%). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Dourados – MS, 2023.	49

- Figura 8.** Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para microporosidade do solo (%). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Dourados – MS, 2023. 51
- Figura 9.** Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para porosidade total do solo (%). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Dourados – MS, 2023. 53
- Figura 10.** Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para resistência do solo à penetração (MPa). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Dourados – MS, 2023. 56
- Figura 11.** Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para pH em (H₂O). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Dourados – MS, 2023. 59
- Figura 12.** Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para alumínio (Al³⁺ cmol_c dm⁻³). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-

M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu.
Dourados – MS, 2023. 61

Figura 13. Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para cálcio (Ca^{2+} $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Dourados – MS, 2023. 63

Figura 14. Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para magnésio (Mg^{2+} $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Dourados – MS, 2023. 64

Figura 15. Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para potássio (K^+ $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Dourados – MS, 2023. 66

Figura 16. Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para fósforo (P mg dm^{-3}). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Dourados – MS, 2023. 68

Figura 17. Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para capacidade de troca de cátions (CTC $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de

culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Dourados – MS, 2023. 71

Figura 18. Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para saturação de bases (V%). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Dourados – MS, 2023. 73

Figura 19. Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para matéria orgânica (MO). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Dourados – MS, 2023. 75

Figura 20. Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para carbono orgânico total (COT). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Dourados – MS, 2023. 77

PRODUTIVIDADE DA SOJA E MILHO SAFRINHA, ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO EM MANEJOS DE SOLO E DE CULTURAS

Autor: Odair Honorato de Oliveira
Orientador: Prof. Dr. Gessi Ceccon

RESUMO: O Sistema Plantio Direto é o principal sistema de cultivo utilizado no manejo de solo em culturas anuais, pela sua importância na conservação do solo e da água. No entanto, quando não atendido seus princípios, pode acarretar em camadas compactadas do solo, reduzindo a produtividade das culturas. Desta forma, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de identificar a combinação do manejo de solo e de plantas de cobertura que proporcionem a redução da compactação do solo, influenciando positivamente na produtividade da soja e do milho safrinha em sucessão, e promova melhorias nos atributos físicos e químicos do solo. O experimento foi realizado na área experimental da Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados – MS, de março de 2020 a julho de 2021 em Latossolo Vermelho eutrófico. O delineamento experimental foi em blocos casualizados com parcelas subdivididas. Nas parcelas principais foram alocados os manejos de solo (Plantio Direto, preparo do solo com arado de discos, com arado de aivecas e com escarificador). Nas subparcelas foram alocados os manejos de culturas (*Brachiaria brizantha* cv. Marandu, Marandu consorciada com *Crotalaria Ochroleuca* e consórcio milho safrinha-Marandu), em seis repetições. Nas avaliações realizadas no solo, as camadas foram consideradas as subsubparcelas (0 a 10, 10 a 20 a 30 e 30 a 40 cm) em três repetições. Foram avaliados os atributos químicos e físicos do solo, a produção de massa das culturas de cobertura, a produtividade da soja e do milho safrinha em sucessão. Os dados foram submetidos a análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Os manejos de solo com arado de aivecas, arado de discos e escarificador não foram eficientes em elevar os elementos químicos ao perfil do solo, no período avaliado. O preparo do solo com arado de aivecas, arado de disco ou escarificador aumentou a porosidade total do solo na camada de 0-10 cm, entretanto, nas camadas de 20 a 30 e 30 a 40 cm ocorreu a diminuição da porosidade total. O preparo do solo não reduziu a resistência do solo à penetração nas camadas de 20 a 30 e 30 a 40 cm. Os consórcios braquiária-crotalária e milho safrinha-braquiária proporcionaram melhoria

dos atributos físicos e químicos do solo. Os manejos de culturas com braquiária solteira e consorciada com milho proporcionaram melhorias na produtividade da soja. O milho safrinha em sucessão à soja não foi afetado pelos manejos de solo e de culturas. O manejo de culturas com marandu solteira em Plantio Direto apresentou maior microporos do solo em todas as camadas. A produção da massa das espécies em consórcio contribuiu para a maior matéria orgânica do solo na camada de 0 a 10 cm. Os consórcios marandu-crotalária e milho-marandu, em plantio direto, contribuem para a melhoria do sistema de produção.

Palavras-chave: consórcio de milho safrinha-braquiária; preparos de solo; Plantio Direto; plantas de cobertura.

PRODUCTIVITY OF SOYBEAN AND OFF-SEASON MAIZE, PHYSICAL AND CHEMICAL ATTRIBUTES OF THE SOIL IN SOIL AND CROPS MANagements

Author: Odair Honorato de Oliveira

Advisor: Prof. Dr. Gessi Ceccon

ABSTRACT: The no-till system is the main cultivation system used in soil management in annual crops, due to its importance in soil and water conservation. Nevertheless, when its principles aren't met, it can result in compacted soil layers, reducing crop productivity. This way, the present work was carried out to identify the combination of soil management and cover crops that reduce soil compaction, positively influencing the productivity of soybeans and off-season maize in succession, and promoting improvements in the physical and chemical attributes of the soil. The experiment was carried out in the experimental area of Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados - MS, from March 2020 to July 2021. The experimental design was in randomized blocks with split plots. In the main plots, soil management was allocated (no-till, soil preparation with disk plow, moldboard plow, and scarifier). In the subplots, crop managements were allocated (*Brachiaria brizantha* cv. Marandu, Marandu intercropped with *Crotalaria Ochroleuca* and Marandu intercropped with off-season maize) in six repetitions. In the evaluations carried out on the soil, the layers were considered the sub subplots (0 to 10, 10 to 20 to 30 and 30 to 40 cm) in three repetitions. The chemical and physical attributes of the soil, the mass production of cover crops, and the productivity off-season maize and soybean in succession were evaluated. Data were subjected to analysis of variance and means compared by Tukey's test ($p < 0.05$). Soil management with moldboard plow, disk plow, and scarifier wasn't efficient in carrying chemical elements to the soil profile during the evaluated period. Turning the soil with a moldboard plow, disc plow, and scarifier increased total soil porosity in the 0 to 10 cm layer, nevertheless, in the 20 to 30 and 30 to 40 cm layers there was a decrease in total porosity. Turning the soil didn't reduce soil resistance penetration in the 20 to 30 and 30 to 40 cm layers. The intercropped brachiaria-crotalaria and off-season maize provided improvements in the physical and chemical attributes of the soil. Crop management with single brachiaria and intercropped with maize provided improvements in soybean productivity. The off-season maize in succession to soybeans was not affected by soil and crop management. The management of crops with single marandu in no-till showed greater soil micropores in all layers. The mass production of species in intercropped contributed to greater soil organic matter in the 0 to 10 cm layer. The marandu-crotalaria and maize-marandu intercropped, in no-till, contribute to improving the production system.

Keywords: consortium of *Brachiaria* with off-season maize, soil preparation, no-till, cover crops.

INTRODUÇÃO

A região Centro-Oeste do Brasil é marcada pela diversidade nos fatores climáticos. Durante o verão, o clima mostra-se quente e chuvoso, enquanto no inverno a situação é de seca, com temperaturas amenas. A produção de grãos nessa região fundamenta-se principalmente no cultivo da soja no verão, semeada no início e colhido no final do período chuvoso, e no cultivo de milho safrinha, que é semeado após a colheita da soja e colhido no inverno.

Neste sistema de cultivo combinado de soja e milho safrinha, ocasionalmente ocorre a colheita da soja, seguida imediatamente pelo plantio do milho safrinha em um solo com umidade elevada. Isso acaba impactando negativamente a qualidade do solo devido a fatores como redução da porosidade e aumento da densidade, o que resulta em uma maior resistência à penetração. Como resultado desses efeitos, tem sido observada a necessidade de realizar mobilização parcial ou até mesmo total do solo utilizando implementos agrícolas. Isso é feito na tentativa de reverter os efeitos adversos causados pela compactação dessas camadas do solo.

O movimento frequente de máquinas grandes e pesadas realizando as operações de preparo do solo, têm tido um papel significativo na criação de camadas compactadas abaixo da profundidade efetiva de trabalho dos equipamentos. Essas camadas compactadas geralmente formam-se em entre 15 a 25 cm de profundidade, o que acaba por restringir o desenvolvimento das raízes das plantas e, conseqüentemente, impactar negativamente a produtividade das culturas.

A combinação de práticas de manejos de solo juntamente com adoção de culturas de cobertura, como parte de um sistema como o Plantio Direto (PD), emerge como uma estratégia altamente eficaz para aprimorar tanto os aspectos químicos quanto os físicos do solo. Isso ocorre devido ao crescimento expansivo das raízes dessas espécies, que atingem camadas mais profundas do solo, resultando na ciclagem de nutrientes entre as camadas. Essa abordagem visa mitigar problemas de degradação do solo, ao mesmo tempo que assegura o máximo potencial produtivo das culturas.

Nesse sentido, acredita-se que a associação entre práticas de manejo do solo e adoção de culturas de cobertura, como parte de um sistema sustentável, possa ser uma estratégia promissora para mitigar os efeitos negativos da compactação do solo. Assim, acredita-se que o crescimento profundo das raízes das culturas de cobertura, juntamente

com a ciclagem de nutrientes nas diferentes camadas do solo, possa contribuir para melhoria da estrutura física e química do solo, resultando em um ambiente mais propício para o desenvolvimento radicular das culturas principais e, conseqüentemente, aumento da produtividade agrícola.

1. REVISÃO DE LITERATURA

1.1. Atributos químicos do solo

Os atributos químicos, físicos e biológicos do solo, são responsáveis pelo funcionamento do sistema produtivo (KRELING et al., 2022). Estes são caracterizados pelo índice de pH, concentração de Al^{3+} , acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$), capacidade de troca de cátions, teores de P, matéria orgânica e os micronutrientes.

Os atributos químicos apresentam-se de forma heterogênea no solo, estão em constantes reações, e o preparo do solo de forma constante aumenta a sua heterogeneidade. O manejo do solo de forma integrada com outras práticas, como rotação de culturas, minimiza essa heterogeneidade do solo.

A rotação de culturas é importante condicionador dos atributos do solo, por representar uma alternativa que minimiza o impacto do uso intensivo da terra, através da deposição de diferentes resíduos orgânicos (NASCENTE et al., 2016). Avaliando a caracterização química do solo em Sistema de Plantio Direto (SPD), Santana et al. (2018), observaram que após dois anos de cultivo, os atributos químicos do solo apresentaram melhorias, como: maior acúmulo de P, K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , e maior aporte de matéria orgânica, melhor armazenamento de água, em relação ao plantio convencional.

Neste contexto, em regiões de verão chuvoso com veranicos e outono-inverno seco, como a região Centro-Oeste do Brasil, torna-se importante o cultivo de plantas de cobertura com alta produtividade de massa para total cobertura do solo. Assim, o cultivo de espécies gramíneas perenes na entressafra da soja, pode fornecer quantidades de massa suficiente para permanecer sobre o solo e atuar nos atributos químicos, aumentar o teor de matéria orgânica e a fração do carbono orgânico do solo (CASTRO et al., 2015).

O sistema de manejo de solo adotado na entressafra da soja pode minimizar perdas significativas de água, solo e conseqüentemente de nutrientes. Para Pacheco et al. (2013), o cultivo de *Brachiaria ruziziensis* e milheto (*Pennisetum glaucum*) e o consórcio de milho com *B. ruziziensis* sem revolvimento do solo, proporcionaram maior acúmulo de massa seca, maior cobertura e acúmulo de nutrientes pela soja em sucessão. Para Salton et al. (2014), o cultivo das gramíneas na entressafra pode trazer maior acúmulo de matéria orgânica do solo em profundidade devido ao seu sistema radicular ser mais ativo e vigoroso.

A força exercida pelos implementos, como arado de discos, arado de aivecas e escarificador, pode provocar modificações nos atributos químicos dos solos em virtude da intensidade com que é exercida essa força. Avaliando dois preparos de solos (arado de aivecas e grade aradora), Silveira et al. (2000), concluíram que houve variações na distribuição dos teores de pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , P, K^+ e saturação por bases no perfil do solo com o uso de arado de aivecas, e segundo os autores, o revolvimento do solo permitiu a distribuição do calcário e incorporação da matéria orgânica nas camadas do solo, o que influenciou nessas variações.

Ao avaliar a produtividade do milho em diferentes preparos de solo, Afshar et al. (2022), observaram que em três anos de cultivo, o manejo de solo com arado de aivecas e SPD, o milho apresentou maior produtividade em comparação ao cultivo com arado de discos e preparo convencional. Porém não houve diferença significativa no pH, na condutividade elétrica e no carbono orgânico total do solo na camada de 0 a 15 cm.

Analisando os atributos químicos e a produção de biomassa do consórcio de milho com uma leguminosa (cunhã - *Clitoria ternatea* L.), Pompeu et al. (2019) observaram que esse consórcio proporcionou aumento nos teores de K^+ , Cu^{2+} e B no solo, e que essa maior concentração de Cu^{2+} e B ocorreu devido a uma maior concentração desses micronutrientes na matéria seca da leguminosa. Já no consórcio milho-crotalária, os autores verificaram maior acúmulo de matéria orgânica no solo.

Assim, os atributos químicos do solo, mesmo sendo uma característica intrínseca de cada solo, podem ser alterados com manejos de solo e plantas de cobertura, com resultados importantes para maior produtividade de grãos das culturas comerciais.

1.2. Atributos físicos do solo

Os atributos físicos do solo são caracterizados pela textura, densidade, macroporosidade e microporosidade, conferindo a porosidade total, umidade e resistência do solo à penetração. Esses indicadores permitem identificar camadas de solo compactadas, que podem interferir na produtividade das culturas. Neste sentido, o processo de compactação do solo é ocasionado geralmente, pelo trânsito intensivo do maquinário no sistema de preparo mecanizado do solo, imposta pelo revolvimento do solo com sulcadores, arados, escarificadores, grades e semeadoras (BERTOLLO e LEVIEN, 2019). No PD tem-se verificado a formação de camadas superficiais

compactadas em virtude do tráfego intenso de máquinas, principalmente na época da colheita da soja, onde os índices pluviométricos ocasionalmente estão elevados e a umidade do solo alta, assim podendo elevar a taxa de compressão exercida pelas máquinas sobre o solo.

O uso intensivo de maquinários tem promovido alterações gradativas nos atributos físicos do solo, como aumento da densidade, redução da absorção de água, aumento na resistência a penetração das raízes, redução da macroporosidade e porosidade total (TORRES et al., 2015). A compactação do solo e a variação espacial da resistência à penetração, segundo Gao et al. (2016), afetam o desenvolvimento das raízes que geralmente, limita o crescimento das plantas e a eficiência do uso dos recursos naturais pelas plantas.

Assim, os preparos de solo de forma intensiva, associados à monocultura têm resultado na degradação da camada arável do solo, com perdas de solo e aumento da compactação (FREITAS et al., 2017). Em solos com princípios de compactação, o crescimento radicular é reduzido por apresentar baixa concentração de oxigênio e redução de transporte de fluídos, expondo assim, as plantas a um ambiente de estresse e consequente baixa capacidade produtiva (COLOMBI e KELLER, 2019).

De acordo com Colombi et al. (2018), em solos com camadas compactadas, pode haver redução na produtividade das culturas, pela limitação do sistema radicular aos reservatórios de água e nutrientes do solo. Nesse contexto, utilizar plantas de cobertura que apresentam sistemas radiculares vigorosos têm se tornado uma alternativa para a descompactação do solo, criando ambiente favorável para o crescimento radicular das culturas comerciais (CARVALHO et al., 2020).

Avaliando os atributos físicos do solo, Mottin et al. (2022), observaram que na camada 0 a 10 cm, o consórcio milho-*Brachiaria ruziziensis*, foi mais eficiente em promover melhorias na macroporosidade e redução da densidade do solo. Nesse sentido, o manejo do solo e cultivo de plantas pode variar de maneira específica de acordo com a rotação de culturas, e influenciar diretamente nos atributos do solo, no sentido de minimizar os efeitos negativos causados pelo intensivo uso do maquinário, da monocultura, com solo sem cobertura e com baixo teor de matéria orgânica (JENSEN et al., 2020).

Os atributos físicos do solo também desempenham um papel importante na infiltração de água no solo, influenciando sua capacidade de absorção. A porosidade,

distribuição dos poros, textura, estrutura e compactação do solo afetam a taxa de absorção de água que pode infiltrar. Solos com porosidade adequada, boa estrutura e menos compactação tendem a permitir uma infiltração mais eficaz. Neste caso, a cobertura vegetal tem um papel, protegendo o solo da erosão causada pela chuva. Em conjunto, esses fatores determinam a capacidade do solo de absorver água, que é essencial para o crescimento das plantas e a redução da erosão.

1.3. Manejos de solo

O preparo de solo com arado de discos, arado de aivecas e escarificador tem o princípio aprimorar as propriedades físicas do solo, como a formação de agregação, infiltração de água e criar um ambiente favoráveis para germinação e desenvolvimento das plantas. No entanto, o uso tradicional desses implementos no preparo do solo convencional pode acarretar em efeitos negativos, incluindo desagregação de partículas, compactação em camadas abaixo da profundidade de trabalho dos implementos, diminuição da matéria orgânica e redução do acúmulo de carbono (SALES et al., 2016).

Assim, o uso sucessivo de implementos que revolvem a camada arável do solo, como grades e arados, pode resultar em redução da infiltração de água e formação de camadas compactadas (ROSABONI et al., 2019). Dessa forma, o uso e o manejo adotado podem causar alterações em seus atributos físicos, e comprometer sua capacidade produtiva (TORRES, et al., 2015).

Nesse contexto, é necessário identificar a umidade do solo ideal de trabalho, e realizar a escolha correta dos implementos, a fim de proporcionar condições ideais, para deposição das sementes no solo e estabelecimento populacional das plantas. De acordo com Silva et al. (2014), cada sistema de preparo de solo apresenta diferenças, tanto na época de preparo, quanto na estrutura física do solo.

O preparo de solo com arado de discos e/ou com arado de aivecas é caracterizado pela inversão das camadas do solo, e permite a incorporação de corretivos da acidez do solo, dos resíduos vegetais, controle de plantas daninhas, e aumento do volume total de poros, que permite a aeração e infiltração de água. O preparo com escarificador pode atuar em superfície ou em subsuperfície, e é caracterizado pelo rompimento de camadas compactadas, não havendo o revolvimento do solo como é observado nos preparos com arado de discos e/ou aivecas.

Avaliando preparos de solo com arado de discos, arado de aivecas, grade aradora, escarificador e enxada rotativa, Silva et al. (2021) encontraram maiores alturas de plantas quando utilizado arado de discos e de aivecas, em comparação com escarificador. Segundo os autores, os arados de discos e aivecas, permitiram maior mobilização do solo, permitindo maior exploração das raízes no perfil do solo. Já, Deperon Júnior et al. (2016), verificaram aumento da resistência do solo à penetração, maior densidade e porosidade total em função dos preparos de solo empregados, refletindo em redução da matéria seca das plantas e menor produtividade de grãos de milho.

1.4. Plantas de cobertura

As plantas de cobertura são alternativas viáveis para melhoria dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, principalmente em SPD, caracterizadas pela introdução de espécies de diferentes famílias com a deposição de palha e exploração diversificada do solo.

A escolha das espécies é fundamental para manutenção ou aumento da fertilidade do solo (RIVERO HERRADA; MOZENA LEANDRO; FERREIRA, 2017). Conforme Albuquerque et al. (2013), a espécie deve atender alguns princípios, como potencial de produção de palha, capacidade de absorção e acúmulo de nutrientes.

A produção de palha pelas culturas de cobertura, é considerada um dos mais importantes fatores ligados a melhorias dos atributos do solo. É importante que as plantas de cobertura apresentem sistema radicular agressivo, alta produtividade de massa, rusticidade, rápido estabelecimento, adaptabilidade a solos com baixa fertilidade e crescimento em período seco do ano.

Nesse sentido, a *Brachiaria ruziziensis* e *B. brizantha* têm sido amplamente utilizadas no SPD, pois têm sistema radicular agressivo, crescendo com a umidade no perfil do solo, com alta produtividade de massa (PACHECO et al., 2011). A *Crotalaria spp.* têm sido utilizada em sistema de rotação de culturas, por ser fixadora de nitrogênio, com adaptabilidade à baixa disponibilidade hídrica, boa produção de palha e ciclagem de nutrientes (MELLO FRASCA, 2021).

O cultivo de plantas forrageiras como as braquiárias para cobertura de solo, proporciona maiores teores de carbono no solo, e maiores produtividades do milho e da

soja em sucessão (SILVA, 2022). De acordo com Tanaka et al. (2019), a maior produtividade das culturas em sucessão é atribuída a maior produção de massa que as espécies antecessoras produzem, o que favorece o estabelecimento do milho e da soja em sucessão, principalmente sob condições climáticas desfavoráveis.

Segundo Ribeiro et al. (2018), a cobertura do solo com plantas forrageiras como a *B. ruziziensis*, mantém a umidade no solo em condições climáticas não favoráveis em virtude da palha sobre o solo. Teixeira (2014), constatou que as espécies com sistemas radiculares mais agressivos penetram em maior profundidade seguindo a umidade no solo, e explorando maior volume de solo e amenizando o estresse de seca causado às plantas cultivadas em sucessão.

Avaliando a produtividade da soja após o consórcio milho safrinha-braquiária, Mechi et al. (2016), constataram o incremento na produtividade da soja cultivada em sucessão. Já, Kappes e Zancanaro (2015), avaliando consórcio milho-*Brachiaria spp.* e *Crotalaria spp.*, verificaram que a consorciação do milho com *C. juncea* produziu maior quantidade de massa, e a soja em sucessão apresentou aumento de 20% na produtividade de grãos.

Nesse contexto, os atributos químicos e físicos são características passíveis de mudanças em função dos manejos de solo e de culturas adotados no sistema de cultivo, e desta forma, o manejo adequado do solo, assim como, a obtenção de informação segura para tomada de decisão, são fundamentais para a sustentabilidade do sistema de produção adotado. Sendo assim, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de identificar a combinação do manejo de solo e de plantas de cobertura que proporcionem a redução da compactação do solo, influenciando positivamente na produtividade da soja e do milho safrinha em sucessão, e promova melhorias nos atributos físicos e químicos do solo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área e clima

O experimento foi realizado na área Experimental da Embrapa Agropecuária Oeste, no município de Dourados – MS, em solo classificado como Latossolo Vermelho Eutrófico, de textura muito argilosa (SANTOS et al., 2018). O clima da região é caracterizado segundo a classificação de Köppen, como do tipo Cwa, com verões quentes e invernos secos, e temperaturas máximas observadas nos meses de outubro a janeiro, coincidindo com as chuvas de primavera-verão, e temperaturas mínimas e déficit hídrico entre maio e agosto (FIETZ; FISCH, 2008). A precipitação pluviométrica acumulada durante o cultivo das culturas de cobertura no ano de 2020 foi de 872 mm (Figura 1), e durante o cultivo da soja 2020/21 foi de 705 mm, e no milho safrinha 2021 foi de 245 mm (Figura 2). Confirmando um período de verão chuvoso e dois períodos de outono-inverno com estiagens prolongadas.

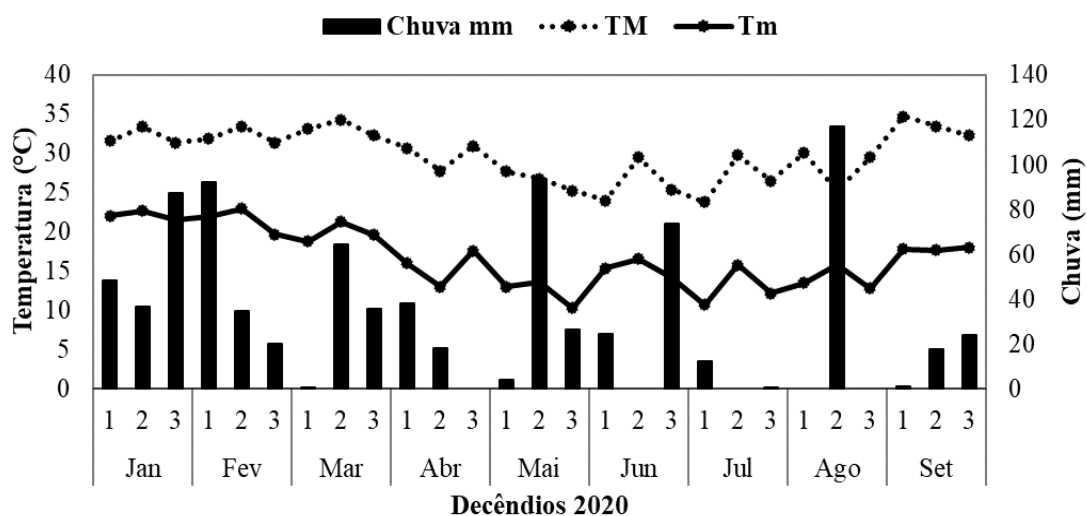


Figura 1. Precipitação pluviométrica (mm) decenal e temperaturas máximas (TM) e mínimas (Tm) (°C) registradas durante experimento, em Dourados – MS.

Fonte: Guia Clima (2023).

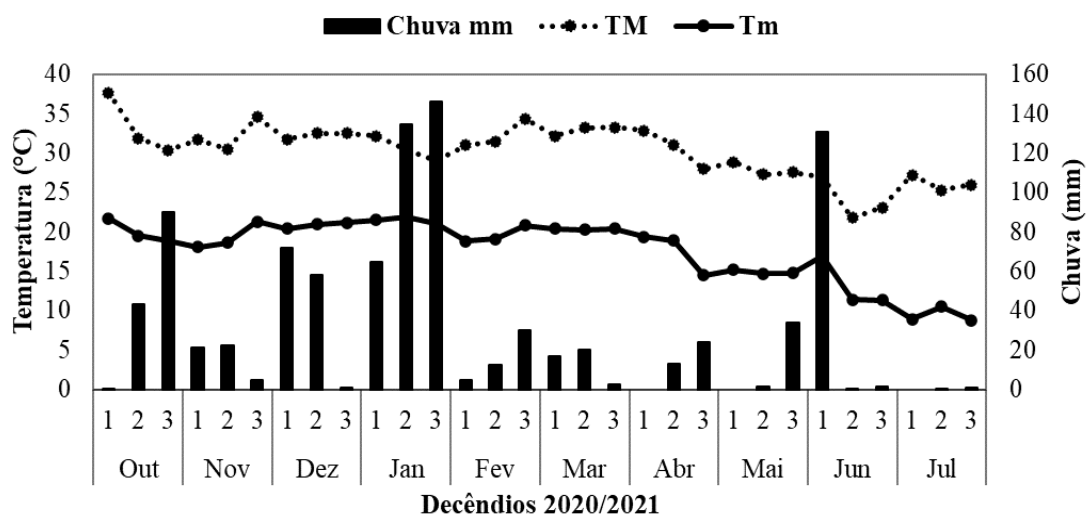


Figura 2. Precipitação pluviométrica (mm) decencial e temperaturas máximas (TM) e mínimas (Tm) (°C) registradas durante o cultivo da soja/2020 e milho safrinha/2021, em Dourados – MS. **Fonte:** Guia Clima (2023).

A área experimental estava com SPD de 2005 a 2019, com a soja cultivada no verão, e no outono-inverno o milho safrinha, feijão-caupi e braquiária em rotação. Antes da instalação do experimento foi realizado a caracterização dos atributos químicos do solo nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm, e os principais resultados são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1. Teores de fósforo (P), matéria orgânica (MO), CTC e saturação por bases (V%) no solo, antes da implantação dos tratamentos. Dourados – MS, 2019.

Camadas	P (Melich ¹ mg dm ⁻³)	MO (%)	CTC (cmolc dm ⁻³)	V%
0,00 - 0,10	48,11	33,46	12,13	59,17
0,10 - 0,20	8,08	23,94	10,05	37,11
0,20 - 0,30	3,68	21,70	9,04	36,52
0,30 - 0,40	2,10	18,84	7,57	39,29
Média	32,88	24,49	9,69	43,02
C.V. (%)	15,49	14,84	8,25	14,26

C.V. (%): Coeficiente de variação. Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de $p \leq 0,05$. **Fonte:** Fachinelli, (2022).

2.2. Delineamento Experimental

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso (DBC) em parcelas subdivididas. Nas parcelas principais foram alocados os quatro manejos de solo (arado de aivecas, arado de discos, escarificador e PD) e nas subparcelas os três manejos de culturas (*Brachiaria brizantha* cv. Marandu solteira, *B. Marandu* consorciada com *Crotalaria ochroleuca*, milho safrinha consorciado com *B. Marandu*) em parcelas de 9 x 12,5 m em seis repetições. Os atributos químicos do solo foram avaliados nas camadas 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm, e os atributos físicos do solo foram avaliados nas camadas 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm e 30-40 cm, e essas camadas foram consideradas o terceiro fator de variação, ambos em três repetições.

2.3. Aplicação de corretivos e fertilizantes

No dia 05 de março de 2020, foram aplicadas quatro toneladas (t) de calcário dolomítico seco ha^{-1} na área experimental, para elevação da saturação em bases a 70% na camada 0-20 cm, mais três t ha^{-1} de gesso, e incorporados com os três manejos de solo (Figura 3).

A incorporação foi realizada com os tratamentos que compõe o manejo de solo deste trabalho. O arado de aivecas, com duas aivecas, trabalhou à profundidade de 25 cm; o arado de discos com três discos, trabalhou à profundidade de 17 cm; e o escarificador, com sete hastes, trabalhou à profundidade de 27 cm. Todos esses implementos foram tracionados com um trator New Holland TM 7010, com 141CV.

No dia 06 de março de 2020, foram aplicados 400 kg ha^{-1} de “Fosfato Natural Reativo de Bonito”, (equivalente a 67,6 kg ha^{-1} de P_2O_5 total, solúvel em ácido cítrico); e incorporado com grade aradora com discos de 28 polegadas de diâmetro até a profundidade de 15 cm.

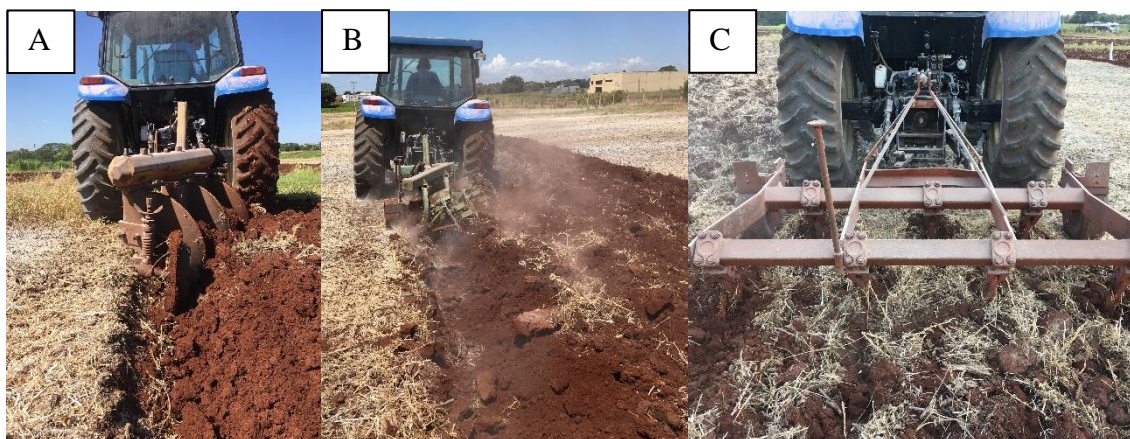


Figura 3. Incorporação do calcário e gesso com arado de discos (A), aivecas (B) e escarificador (C) na área experimental da Embrapa Agropecuária Oeste, em 2020. Dourados – MS, 2023.

2.4. Implantação dos manejos de culturas de cobertura 2020

As espécies que compõe os tratamentos de manejo de culturas foram semeadas no dia 06 de março de 2020 (Figura 4). A *Brachiaria brizantha* cv. Marandu foi semeada nos três tratamentos com sementes para atingir a população de dez plantas por metro quadrado, utilizando metodologia descrita por Ceccon et al. (2018). No tratamento de consórcio com milho safrinha, este foi semeado com seis plantas por metro quadrado, e no tratamento consórcio com crotalária, foram adicionadas sementes de *Crotalaria ochroleuca* para obtenção de dez plantas por metro quadrado (2 kg ha⁻¹ de sementes com 80% de germinação) juntamente com as sementes de braquiária. As três espécies foram semeadas em linhas espaçadas de 45 cm, a profundidade de três a cinco cm, utilizando semeadora SHM 15/17 (<https://www.semeato.com.br/produtos/ver/7/shm>), com caixa adicional, para sementes miúdas, tracionada por um trator New Holland TL 95, com 95CV.



Figura 4. Semeadura das culturas do outono-inverno em 2020 (Plantio Direto, à esquerda, escarificador ao centro e arado de discos à direita) na área experimental da Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados – MS, 2023.

2.5. Plantio da soja safra 2020/21

Em 02 de outubro de 2020, foi realizada a aplicação de glifosato na dose de 1,44 L ha⁻¹ de equivalente ácido, com volume de 200 L ha⁻¹ de calda, para dessecação das espécies vegetais presentes na área.

A semeadura da soja foi realizada em 27 de outubro de 2020, em área total, utilizando a cultivar M 6410 IPRO, com semeadora modelo SHM 15/17 da Semeato®, em espaçamento de 50,0 cm entre linhas, com população de 24 sementes m⁻². As sementes foram tratadas com fungicida a base de Carbendazim e inseticida Tiametoxam na dose de 100 e 60g por cada 100 kg de sementes, respectivamente. No mesmo dia do plantio, as sementes foram inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* na dose de 100 mL/50 kg de semente de soja, contendo as estirpes SEMIA 5079 e SEMIA 5080, com garantia de 7x10⁹ unidades formadoras de colônia por grama do produto comercial. Foram aplicados 300 kg ha⁻¹ de adubo NPK 08-20-20, nas linhas de semeadura.

O controle de plantas infestantes foi realizado com uma aplicação de 0,72 L ha⁻¹ de equivalente ácido de glifosato no estágio de V3 da soja, além de catação manual periódica de plantas de amargoso (*Digitaria insularis*).

O controle de insetos-pragas, principalmente percevejos, foi realizado com duas aplicações de Tiametoxam + Lambda-Cialotrina na dose de 200 mL ha⁻¹ do produto comercial.

2.6. Plantio do consórcio milho safrinha-braquiária 2021

A semeadura do consórcio milho safrinha-braquiária foi realizada no dia 02 de março de 2021, utilizando semeadora PST4 Flex Supreme® com cinco linhas. O híbrido BRS 1010 foi semeado em linhas espaçadas de 0,50 cm, com população aproximada de 60.000 plantas ha⁻¹, em área total, com adubação de 200 kg ha⁻¹ da fórmula NPK 08-20-20. As sementes da braquiária (*B. ruziziensis* cv. Kennedy) foram colocadas em caixa adicional, com distribuição imediatamente a frente do disco de corte da semeadora, com taxa de semeadura de 2 kg ha⁻¹ de sementes germináveis, e incorporadas com a passagem dos mecanismos abertura e fechamento de sulcos de plantio do milho.

O controle de plantas daninhas foi realizado com uma aplicação de Atrazine na dose de 1,5 L ha⁻¹, do princípio ativo, em pós-emergência do milho e das plantas daninhas. As pragas foram controladas mediante duas aplicações de inseticida Acefato aos 15 e 30 dias após a emergência do milho, na dose de 800 mL ha⁻¹.

2.7. Avaliações

2.7.1. Avaliação das plantas de cobertura 2020

Durante o florescimento das plantas de cobertura, foram avaliados a produção de massa das espécies (*B. brizantha* cv. Marandu, *C. Ochroleuca* e milho safrinha). As plantas foram avaliadas em uma linha central de dois metros de cada parcela. Uma subamostra de cada espécie foi seca em estufa com circulação de ar forçada a 60°C até massa constante para determinação da massa seca.

Na maturação fisiológica do milho foram utilizadas as plantas em duas linhas de dois metros em cada parcela, onde foram avaliadas a massa de cem grãos e calculada a produtividade de grãos, com umidade corrigida para 13%.

2.7.2. Avaliações da soja

A avaliação da soja foi realizada durante o estágio de pleno florescimento (R2), onde foram selecionadas quatro plantas aleatórias em cada parcela para avaliação da produtividade de massa seca da parte aérea, massa seca da raiz e comprimento da raiz principal. Após a coleta das amostras da soja no estágio R2 através do arranquio, a raiz principal (pivotante) foi cuidadosamente avaliada em bancada medindo-a com régua graduada.

A produtividade de grãos da soja foi avaliada em 25 de fevereiro de 2021, mediante a colheita manual das plantas em duas linhas centrais, de três metros de comprimento, e cada parcela foi trilhada em colhedora marca Winterstiger®. Os grãos foram limpos das impurezas, e secos em estufa a 60°C para determinação da umidade. Posteriormente, foram pesados para determinar produtividade de grãos e massa de cem grãos a 13% de umidade.

2.7.3. Avaliação do consórcio milho safrinha-braquiária 2021

A avaliação do milho foi realizada mediante a coleta rente ao solo das plantas contidas em duas linhas de dois metros de cada parcela, onde foram avaliados a massa seca da parte aérea e massa de cem grãos, e posteriormente foi calculada a produtividade de grãos a 13% de umidade. A braquiária foi avaliada mediante ao corte rente ao solo das plantas presentes em uma linha de dois metros de comprimento. Uma sub amostra foi seca em estufa de circulação forçada de ar a 60°C para determinação da produtividade de massa seca de braquiária e massa seca do consórcio.

2.7.4. Avaliação da resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração foi avaliada no dia 10 de julho de 2020, utilizando penetrógrafo eletrônico PGL1020 da Falker® de acionamento manual (Figura 5), com leitura de até 40 cm de profundidade, em quatro amostragens por parcela na linha de plantio.

A umidade do solo (Quadro 2) foi determinada pelo o método gravimétrico (TEIXEIRA et al., 2017) para melhor caracterizar a resistência do solo à penetração.



Figura 5. Coleta de dados da resistência a penetração do solo através do penetrógrafo Falker® e umidade do solo, na área Experimental da Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados – MS, 2023.

Quadro 2. Umidade do solo (%) em função dos manejos de solo, no momento da avaliação da resistência do solo à penetração (RP), na área experimental da Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados – MS, 2023.

Camadas (cm)	Arado de aivecas	Arado de discos	Escarificador	Plantio Direto
	(%)			
0-10	23,89	24,39	27,64	26,23
10-20	25,98	24,87	26,32	29,5
20-30	24,19	25,37	28,31	28,61
30-40	24,65	24,98	27,29	29,93

2.7.5. Avaliação dos atributos físicos e químicos no solo

Para avaliação dos atributos físicos do solo foram coletados anéis volumétricos de 114 cm³ de solo nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-30 cm de profundidade. As amostras foram identificadas e levadas ao laboratório de análise de solo da Embrapa Agropecuária Oeste, onde foi avaliada a densidade do solo pelo método de anel volumétrico, macroporosidade, microporosidade e calculada a porosidade total (TEIXEIRA et al., 2017).

Para a avaliação dos atributos químicos foram coletadas três amostras compostas de solo nas camadas 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm de profundidade. As amostras foram levadas ao Laboratório de Análise de solo da Embrapa Agropecuária

Oeste, em Dourados – MS, onde foram secas ao ar, moídas em moinho tipo martelo modelo TE-330 da TECNAL® e em seguida foram realizadas as análises, de acordo com Silva (2009).

2.8. Análise Estatística

Para avaliar os efeitos dos tratamentos considerou-se a metodologia de modelos mistos, sendo empregado o seguinte modelo:

Equação 1.

$$y_{kijl} = \mu + b_k + S_i + C_j + P_l + (SC)_{ij} + (SC)_{il} + (CC)_{jl} + (SCC)_{ijl} + p_{ijk} + \varepsilon_{kijl}$$

A Equação 1, representa o efeito do k-ésimo bloco, efeito da média geral do experimento, representando o efeito do i-ésimo nível de solo, o efeito da j-ésima cultura e representa o efeito da l-ésima camada.

Os termos acima, representando os efeitos das interações Solo versus Cultura, Solo versus Camada, Cultura versus Camada e Solo versus Cultura versus Camada, respectivamente. Todos os termos supracitados foram considerados no modelo misto como de efeito fixo e a parcela sendo inserida como de efeito aleatório. O termo citado acima, representa o erro experimental associada a observação. Os fatores de efeito fixo foram avaliados por meio do teste F obtido pela Análise de Variância. As comparações múltiplas foram realizadas por meio do teste Tukey. Em todos os testes de hipóteses adotou-se o nível de 5% de significância. Essa análise estatística foi conduzida no *software* R (R Core Team, 2022). A biblioteca *gamlss* (STASINOPOULOS et al., 2017), foi utilizada para ajuste do modelo misto.

O teste de Tukey foi construído por meio da biblioteca *emmeans* (LENTH et al., 2018). O pacote *ggplot2* foi empregado para apresentação gráfica (WICKHAM, 2016).

Os dados de produtividade de soja safra 2020/21, do consórcio braquiária-milho safrinha, safra 2021 foram submetidos à análise de variância e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Culturas de cobertura

A análise de variância apresentou efeito de manejos de solo para massa seca de braquiária e efeito de manejo de culturas para altura de plantas de braquiária (Quadro 3).

Quadro 3. Quadrado médio do resíduo da análise de variância para altura de plantas de braquiária (APB) e produtividade de massa seca da braquiária (PMS), em função dos manejos de solo e culturas, Dourados – MS, 2023.

Fonte de variação	GL	APB		PMS	
Manejos de Solo	3	293,1 ^{ns}		1765066,2 [*]	
Manejo de Culturas	2	486,3 [*]		309395,4 ^{ns}	
MS x MC	6	109,6 ^{ns}		1306411,5 ^{ns}	
CV (%)			7,52		22,9

^{ns} = não significativo; ^{*} = significativo à $p \leq 0,05$, respectivamente pelo teste F.

No manejo de solo com arado de aivecas (Quadro 4), a altura máxima das plantas de braquiária atingiu 136,7 cm. Esse valor foi 6,1%, superior ao observado no manejo de PD. Essa diferença na altura de plantas pode estar relacionada a uma menor densidade do solo no primeiro manejo (Figura 6) e a uma maior porosidade total (Figura 9). Essas características têm impacto direto no crescimento e desenvolvimento da braquiária. De acordo com Vitoria et al. (2012), algumas características físicas do solo como densidade e porosidade total podem influenciar o crescimento da cultura, pelo aumento da exploração pelas raízes.

A densidade refere-se à quantidade de massa do solo por unidade de volume, enquanto a porosidade total diz respeito à quantidade de espaço vazio entre as partículas do solo. Solos com menor densidade e maior porosidade, têm potencial para criar um ambiente favorável para o crescimento das raízes, o que, por sua vez, pode estimular um crescimento mais vigoroso das plantas.

Na produtividade da massa seca da braquiária, conforme o Quadro 4, os valores variaram de 3.247 a 3.917 kg ha⁻¹. Notavelmente, o uso do arado de aivecas resultou em uma produtividade de 3.917 kg ha⁻¹, o que representou um aumento significativo de 17,1% em comparação com o PD. Esse aumento indica que o manejo de

solo com arado de aivecas teve um impacto positivo na produção de massa seca da braquiária, tornando-o uma opção para melhorar o rendimento de massa da braquiária.

A diferença na produtividade de massa seca da braquiária, pode estar diretamente relacionada às melhores condições físicas do solo proporcionada pelo arado de aivecas. O manejo de solo com arado de aivecas resultou em uma menor densidade do solo (Figura 6) e uma maior porosidade total nas camadas subsuperficiais do solo em comparação com o PD. Essas características físicas mais favoráveis do solo criam um ambiente propício para o crescimento das raízes das plantas, permitindo que elas explorem o solo com mais eficiência.

No SPD, é comum ocorrer a formação de uma camada compactada conhecida como “pé-de-grade” nas camadas subsuperficiais do solo, que é resultado do intenso tráfego de máquinas agrícolas. Essa camada pode interferir no crescimento das raízes das plantas e ter um impacto negativo na produtividade de massa das culturas. Esses dados corroboram com Machado et al. (2023), que observaram maiores valores de resistência do solo à penetração após a profundidade de 20 cm.

Quadro 4. Altura de planta de braquiária (APB) e produtividade de massa seca da braquiária (PMSB) cultivada na safra 2020 em função dos manejos de solo e de culturas. Dourados – MS, 2023.

Manejos de solo	APB (cm)	PMSB (kg ha⁻¹)
Arado de aivecas	136,7 a	3.917 a
Arado de discos	131,7 ab	3.812 ab
Escarificador	128,1 b	3.872 ab
Plantio Direto	128,3 b	3.247 b
Manejo de culturas		
Marandu	126,2 b	3.641 a
Marandu-crotalária	132,5 a	3.652 a
Milho safrinha-marandu	134,9 a	3.843 a
Média	131,2	3.712
C.V. (%)	7,52	22,93

Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey, $p \leq 0,05$; C.V. (%): Coeficiente de variação.

Em relação ao manejo de culturas, os consórcios milho safrinha-marandu e marandu-crotalária mostraram-se mais eficientes no crescimento das plantas de marandu (Quadro 4), em comparação com cultivo solteiro da marandu. Dentre os manejos de

cultura avaliado, o consórcio milho safrinha-marandu apresentou a maior altura de plantas, alcançando 134 cm. Essa altura foi significativamente superior em 8,7%, quando comparado com marandu solteira. Esses resultados sugerem que a interação entre o milho safrinha e a marandu ou crotalária no consórcio beneficia o crescimento das plantas, resultando em maior altura das mesmas em comparação com o cultivo da marandu solteira.

A maior altura de plantas da marandu no consórcio, pode estar associado ao crescimento inicial mais rápido do milho e da crotalária, diminuindo a possibilidade de competição. Isto ocorre devido o milho safrinha e crotalária serem culturas anuais e de crescimento rápido, como resultado essas culturas ocupam mais rapidamente o espaço disponível e explora os recursos com mais eficiência. De acordo com Ceccon et al. (2014), o maior crescimento da braquiária é verificado após a maturação fisiológica do milho, proporcionando maior cobertura do solo, sem que haja competição entre as culturas.

A produtividade da massa da braquiária não apresentou diferença significativa entre o cultivo solteiro e consorciado (Quadro 4). No entanto, o consórcio milho safrinha-marandu mostrou um aumento de 5% na produtividade da braquiária em comparação com o cultivo solteiro da marandu. Embora não tenha havido diferença significativa, esse aumento na produtividade da massa de braquiária no consórcio é relevante. Isso pode ser resultado de uma interação positiva entre o milho safrinha e marandu, que pode proporcionar um ambiente mais favorável para o crescimento da braquiária. Esse consórcio, milho safrinha-marandu fornece uma cobertura do solo mais densa, reduzindo a competição com plantas daninhas e ajudando manter a umidade do solo e contribuir para aumentar a matéria orgânica do solo.

Além do mais, essa produção de massa do consórcio milho safrinha-marandu, contribuiu para o aumento do teor de matéria orgânica no solo (Figura 12). De acordo com Mechi et al. (2015), a combinação do consórcio milho com braquiária é uma alternativa para aumento da produção de resíduos orgânicos, contribuindo assim para manutenção ou melhoria da matéria orgânica do solo.

3.2. Soja safra 2020/2021

Na avaliação das características, como altura de plantas, comprimento da raiz, massa seca da raiz, número de grãos por planta, massa de 100 grãos, produtividade de

massa seca e de grãos de soja em função dos diferentes manejos de solo e culturas (Quadro 5), foram observadas diferenças significativas. Especificamente, notou-se que o comprimento da raiz apresentou variações significativas devido aos diferentes manejos de solo, enquanto a altura das plantas foi influenciada pelos diferentes manejos de culturas. Além disso, a massa de 100 grãos mostrou-se efeito significativo pela interação entre os manejos de solo e culturas. Contudo, para as demais características analisadas, não foram observadas diferenças significativas relacionadas aos manejos de solo e culturas.

Quadro 5. Quadrado médio do resíduo da análise de variância para altura de plantas (AP), comprimento da raiz (CR), massa seca da raiz (MSR), número de grãos por planta (NGP), massa de 100 grãos (M100), produtividade de massa seca (PMS) e de grãos de soja (PROD), em função dos manejos de solo e culturas, Dourados – MS, 2023.

Fonte de variação	GL	AP	CR	MSR	NGP	M100	PMS	PROD
MS	3	6,4 ^{ns}	118,6*	48,22*	2078,8*	1,19*	4175,0 ^{ns}	585721,8*
MC	2	83,6*	25,6*	4,7*	1538,8*	0,35 ^{ns}	825,6 ^{ns}	100965,2*
MS x MC	6	11,8 ^{ns}	102,6*	16,9*	655,9*	0,85 ^{ns}	7758,9 ^{ns}	532780,8*
Média		125,8	24,86	9,65	157,5	10,96	1.372	3.044
C.V. (%)		3,46	12,03	12,36	8,21	5,87	4,64	4,59

^{ns} = não significativo; * = significativo à $p \leq 0,05$, respectivamente pelo teste F; C.V. (%): coeficiente de variação; MS – manejos de solo; MC – manejo de culturas.

No quadro 6, constata-se que a produtividade da massa da soja não apresentou diferença significativa em decorrência dos diferentes manejos de solo utilizados. No manejo de solo com arado de aivecas, foram observados maiores valores para a massa seca da raiz e o comprimento da raiz, que atingiram 14,5 g planta⁻¹ e 27,1 cm, respectivamente. Esse aumento pode estar relacionado aos valores de resistência do solo à penetração, este foi de 2,3 MPa na camada de 10-20 cm para esse tipo de manejo de solo, em comparação com o PD, que apresentou um valor de resistência à penetração de 2,8 MPa na mesma camada. Verifica-se que em ambos os manejos de solo houve a formação de uma camada compactada abaixo de 10 cm de profundidade. No entanto, o PD resultou em um maior impedimento ao crescimento das raízes e à massa seca da raiz em comparação ao manejo de solo com arado de aivecas.

A compactação do solo e agregação das partículas aumentam os impedimentos ao crescimento das raízes, sendo assim, é necessário aplicar manejos que proporcionem melhorias nas características físicas do solo. Para Bertollo e Levien (2019), no SPD tem sido observado uma redução dos macroporos do solo, o que leva ao aumento da densidade do mesmo. Esse fenômeno é resultado constantes pressões frequentes exercidas pelo tráfego de máquinas, que alteram a estrutura do espaço poroso, resultando no processo de compactação do solo.

A altura de plantas não apresentou diferença significativa em relação aos diferentes manejos de solo. No entanto, a massa de 100 grãos (M100) foi influenciada, sendo que o PD resultou em uma maior massa de grãos em comparação aos outros manejos. Esse aumento na massa de grãos obtidos em PD, pode estar associado as melhores qualidades químicas como: pH, CTC, Ca²⁺ e K⁺ no solo, observada nesse sistema.

Quadro 6. Altura de plantas (AP), comprimento da raiz (CR), massa seca da raiz (MSR), número de grãos por planta (NGP), massa de 100 grãos (M100), produtividade da massa seca (PMS) e de grãos da soja (PROD) em função dos manejos de solo, Dourados – MS, 2023.

Manejos de solo	AP	CR	MSR	NGP	M100	PMS	PROD
	(cm)	(cm)	(g planta ⁻¹)		(g)	(kg ha ⁻¹)	
Arado de aivecas	126,1 a	25,0 a	11,3 c	172,0 a	10,9 ab	1.375 a	2.917 b
Arado de discos	126,5 a	27,1 a	14,5 a	158,6 b	10,7 b	1.377 a	3.184 a
Escarificador	125,3 a	26,0 a	10,9 c	146,4 c	11,0 ab	1.386 a	2.862 b
Plantio direto	125,3 a	21,2 b	12,6 b	153,4 bc	11,3 a	1.350 a	3.214 a
Média	125,8	24,86	9,65	157,5	10,96	1.372	3.044
C.V. (%)	3,46	12,03	12,36	8,21	5,87	4,64	4,59

Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey, $p \leq 0,05$. C.V. (%): Coeficiente de variação.

A produtividade da soja foi significativamente maior no PD 3.214 kg ha⁻¹ em comparação com o manejo de solo escarificador 2.862 kg ha⁻¹, representando uma diferença de 11% na produtividade. A massa de 100 grãos exerceu uma influência direta nesse resultado, pois o PD apresentou um maior valor, mesmo com um menor número de grãos por planta.

No Quadro 7, observou-se que a produtividade de massa seca, o comprimento da raiz e a massa de 100 grãos, não apresentaram diferença significativa em relação aos diferentes manejos de culturas. No entanto, em relação à massa seca da raiz, houve uma

diferença significativa para o manejo com marandu solteira, o qual apresentou um maior valor 13,0 g planta⁻¹. Isso indica que o manejo com marandu solteira teve um impacto positivo específico na produção de massa seca da raiz em comparação aos demais manejos.

Ao avaliar a massa de 1000 grãos, Wolschick et al. (2018) encontraram uma variação de 164,9 a 169,9 g. Segundo os autores, as culturas de cobertura não apresentaram efeito significativo, mesmo obtendo valores superiores aos encontrados no presente experimento. Os valores de massa seca observados neste experimento estão abaixo dos obtidos por Wolschick et al. (2018), e essa diferença pode ser atribuída, em parte, às condições climáticas que foram verificadas no ano agrícola do experimento.

Quadro 7. Altura de plantas (AP), comprimento da raiz (CR), massa seca da raiz (MSR), número de grãos por planta (NGP), massa de 100 grãos (M100), produtividade da massa seca (PMS) e de grãos de soja (PROD) em função do manejo de culturas, Dourados – MS, 2023.

Manejo de culturas	AP	CR	MSR	NGP	M100	PMS	PROD
	(cm)	(cm)	(g plan ⁻¹)	(g)	(g)	(kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)
Marandu	127,9 a	25,70 a	13,0 a	148,3 b	10,9 a	1.373 a	3.080 a
Marandu-crotalária	125,3 ab	23,70 a	12,0 b	162,9 a	11,1 a	1.366 a	2.969 b
Milho safrinha-marandu	124,2 b	25,16 a	12,1 b	161,4 a	10,9 a	1.378 a	3.083 a
Média	125,8	24,86	9,65	157,5	10,96	1.372	3.044
C.V. (%)	3,46	12,03	12,36	8,21	5,87	4,64	4,59

Médias seguidas por letras iguais, em cada variável, não diferem entre si pelo teste de Tukey, $p \leq 0,05$. C.V. (%): coeficiente de variação.

Para a altura das plantas de soja, o cultivo com marandu solteira proporcionou um valor maior de 127,9 cm, em comparação ao consórcio de milho safrinha-marandu, que obteve uma altura de 124,2 cm. Em relação ao número de grãos por planta de soja, cultivada no consórcio marandu-crotalária, foi observado um efeito significativo, sendo essa característica 9,0% maior em comparação com o cultivo de marandu solteira. Esses resultados indicam que o cultivo com marandu solteira foi benéfica para o crescimento em altura das plantas de soja, enquanto o consórcio de marandu-crotalária apresentou um maior número de grãos por planta, o que pode ter impacto positivo na produtividade fina da cultura. As diferentes associações entre culturas e a presença de leguminosas no consórcio podem proporcionar benefícios complementares ao desenvolvimento das

plantas e, conseqüentemente, influenciar suas características de crescimento e produção de grãos.

A fixação biológica de nitrogênio proporcionada pela crotalária reduz a necessidade de adubação nitrogenada para soja, além de melhorar a fertilidade do solo ao longo do tempo. Essa associação entre as culturas de cobertura pode ser uma estratégia eficiente para promover o aumento da produção de grãos da soja e reduzir a dependência de fertilizantes nitrogenados, tornando o sistema mais sustentável. A produtividade da soja alcançou o maior valor quando cultivada sobre o consórcio milho safrinha-marandu, com uma média de 3.083 kg ha⁻¹. Esse resultado indica que associação entre milho safrinha-marandu foi benéfica para o crescimento e desenvolvimento da soja, levando a uma maior produtividade agrícola.

De acordo com Chioderoli et al. (2012), foi constatado que a produtividade da soja foi maior após o cultivo do consórcio milho-braquiária. Os autores atribuíram esse resultado ao fato de que o consórcio milho-braquiária proporcionar melhorias nas condições físicas e químicas do solo, devido à maior produtividade de palha. Essa palhada produzida permitiu que houvesse a redução da erosão, retenção da umidade, aumento da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes.

No Quadro 8, foi observado que a soja cultivada sobre o consórcio milho safrinha-marandu, no manejo de solo com arado de discos, apresentou uma maior massa seca de soja 1.417 kg ha⁻¹, massa de raiz 14,1 g. planta⁻¹ e comprimento de raiz 28,0 cm em comparação com PD. Essa diferença observada nessas características, pode estar associada à produção de palha ocorrida nesse referido manejo, em função da cultura de cobertura (milho safrinha-marandu). O efeito positivo da palhada no consórcio milho safrinha-marandu, combinado com o manejo de solo com arado de discos, contribuíram para o aumento da massa seca da soja em relação ao PD. O consórcio de culturas de diferentes famílias, alinhada com uma estratégia de manejo de solo pode trazer benefícios significativos para o sistema agrícola, tornando-o mais produtivo.

A presença da palha sobre o solo, traz benefícios como melhoria nos atributos químicos e físicos do solo, e esses atributos têm relação direta com o crescimento das raízes das plantas. Uma maior produção e acúmulo de palha no solo resulta em melhores condições para o desenvolvimento das raízes, o que, por sua vez, promove seu crescimento mais vigoroso. Para Chioderoli et al. (2012), o consórcio de milho com

ferrageira promove melhorias físico-hídricas do solo em virtude da maior produção de massa seca e raízes, utilizando melhor o perfil do solo.

O PD demonstrou uma camada compactada em subsuperfície, evidenciando um aumento da densidade, e redução na proporção de macroporos e um aumento na proporção de microporos nas camadas de 20-40 cm. Essas modificações têm o potencial de impactar o desenvolvimento das raízes das plantas. Avaliando o desenvolvimento das raízes ao longo do perfil do solo, Bengough et al. (2011), constataram que o aumento da densidade do solo limita o crescimento das raízes e absorção de nutrientes do solo pelas plantas.

Quadro 8. Produtividade de massa seca (PMS), massa seca da raiz (MSR), comprimento da raiz (CR) da soja, no estágio R1, em função da interação dos manejos de solo e de culturas, Dourados – MS, 2023.

F	PMS (kg ha ⁻¹)			MSR (g plan ⁻¹)			CR (g plan ⁻¹)		
	MS-M	M-C	M	MS-M	M-C	M	MS-M	M-C	M
AI	1.403 aAB	1.327 aA	1.394 aA	9,5 bA	12,0 aB	12,3 aBC	24,8 aAB	25,1 aA	25,1 aB
AD	1.417 aA	1.365 aA	1.349 aA	14,0 aB	14,8 aA	14,8 aA	28,0 aA	26,0 aA	27,3 aAB
ES	1.374 aAB	1.400 aA	1.385 aA	9,5 bB	11,9 aB	11,3 aC	20,6 cB	26,5 bA	31,0 aA
PD	1.317 aB	1.371 aA	1.363 aA	15,1 aA	9,2 cC	13,4 bAB	27,1 aA	17,1 bB	19,3 bB
M		1.372			9,65			24,86	
C.V.		1,64			12,36			12,03	

Médias seguidas de mesma letra, minúscula na linha para efeito manejos de solo em cada manejo de culturas, maiúscula na coluna para efeito do manejo de culturas em cada manejo de solo não diferem entre si pelo teste de Tukey $p \leq 0,05$. F – fatores; AI – arado de aivecas; AD – arado de discos; ES – escarificador; PD – plantio direto; C.V. (%): coeficiente de variação; M – médias. MS-M – milho safrinha-marandu; M-C – marandu-crotalária; M – marandu.

Os diferentes manejos de cultura não apresentaram efeito significativo na massa seca da soja nos respectivos manejos de solo. Em termos gerais, a utilização do arado de discos resultou em um aumento médio de 22,3% no crescimento das raízes e um aumento de 13,0% na massa seca das raízes, em comparação com PD, independentemente do tipo de manejo de cultura empregado. Isso permite inferir que, quando utilizado o manejo de arado de discos, independente do manejo de cultura, a planta irá produzir mais raízes, porém sem refletir em maior produtividade de grãos.

Os valores médios da altura de plantas de soja (Quadro 9) não apresentaram interação significativa entre manejos de solo e culturas. Na massa de 100 grãos não houve interação entre manejos de solo, no entanto, no cultivo solteiro da marandu, houve efeito significativo no PD com maior valor para M100 (11,5 g), quando comparado ao manejo

de solo com arado de discos. Ao avaliar os manejos de solo em cada manejo de cultura, não houve interação significativa.

Quadro 9. Altura de plantas (AP), número de grãos por planta (NGP), massa de 100 grãos (M100) e produtividade de gr (PROD) da soja em função da interação dos manejos de solo e culturas, Dourados – MS, 2023.

F	AP (cm)			NGP		
	MS-M	M-C	M	MS-M	M-C	M
AI	124 aA	126 aA	127 aA	178,0 aA	178,2 aA	159,2 bA
AD	124 aA	126 aA	128 aA	151,1 aBC	163,9 aAB	160,7 aA
ES	122 bA	125 abA	128 aA	146,7 aC	149,6 aB	142,7 aAB
PD	125 aA	123 aA	127 aA	169,8 aAB	159,6 aAB	130,6 bB
Média	125,8			157,5		
C.V.	3,46			8,21		
F	M100 (g)			PROD (kg ha ⁻¹)		
	MS-M	M-C	M	MS-M	M-C	M
AI	10,6 aA	11,2 aA	10,7 aAB	2.810 bB	3.106 aA	2.835 bB
AD	11,2 aA	10,5 aA	10,3 aB	3.227 bA	2.971 cB	3.524 aA
ES	11,1 aA	11,1 aA	10,8 aAB	2.996 aB	3.023 aA	2.567 bC
PD	10,6 aA	11,5a A	11,5 aA	3.300 aA	2.957 bAB	3.386 aA
Média	10,96			3,044		
C.V.	5,87			4,59		

Médias seguidas de mesma letra, minúscula na linha para efeito manejos de solo em cada manejo de culturas, maiúscula na coluna para efeito do manejo de culturas em cada manejos de solo. não diferem entre si pelo teste de Tukey $p \leq 0,05$. F – fatores; AI – arado de aivecas; AD – arado de discos; ES – escarificador; PD – plantio direto; C.V. (%): coeficiente de variação. MS-M – milho safrinha-marandu; M-C – marandu-crotalária; M – marandu.

O número de grãos por planta apresentou interação entre manejos de solo e de culturas. No consórcio milho safrinha-marandu, em manejo com arado de aivecas, verificou-se maior número de grãos por planta (178), em comparação com arado de aivecas em marandu solteira que apresentou 159,2 grãos por planta. O consórcio de milho safrinha-marandu em manejo de solo arado de aivecas proporcionou melhores condições químicas ao solo. Essa melhoria nas características químicas do solo refletiu nas características da cultura sucessora.

A produtividade da soja (Quadro 9) foi alterada em função da interação dos manejos de solo e de culturas. A maior produtividade (3.534 kg ha⁻¹) foi observada após marandu solteira e preparo do solo com arado de discos. Essa produtividade foi de 27,3% maior que a obtida no preparo de solo com escarificador na mesma cultura de cobertura.

3.3. Milho safrinha 2021

Na análise de variância para altura de plantas, massa de 100 grãos, número de grãos por espiga, produtividade da massa seca e produtividade de grãos do milho safrinha, em função dos manejos de solo e culturas (Quadro 10), observa-se que houve efeito apenas para altura de plantas em função dos manejos de culturas. E para demais características não houve interação em função dos manejos de solo utilizados.

Quadro 10. Quadrado médio do resíduo da variância para altura de plantas (AP), massa de 100 grãos (M100), número de grãos por espiga (NGE), produtividade da massa seca (PMS) e produtividade de grãos (PROD) do milho safrinha, em função dos manejos de solo e de culturas, Dourados – MS, 2023.

Fonte de variação	GL	AP	M100	NGE	PMS	PROD
MS	3	179,0 ^{ns}	1,56 ^{ns}	3678,4 ^{ns}	787471,9 ^{ns}	545599,6 ^{ns}
MC	2	340,6*	5,69 ^{ns}	962,6 ^{ns}	204770,9 ^{ns}	428299,5 ^{ns}
MS x MC	6	73,5 ^{ns}	1,18 ^{ns}	2178,6 ^{ns}	390741,1 ^{ns}	500847,1 ^{ns}
Média		133,1	26,9	286,8	4.949	3.863
C.V. (%)		6,6	5,92	12,7	16,7	13,8

^{ns} = não significativo, * = significativo à $p \leq 0,05$, respectivamente pelo teste F. C.V. (%): coeficiente de variação. MS – manejo de solo; MC – manejo de culturas.

No Quadro 11, observa-se que a altura das plantas de milho foi maior no cultivo de marandu solteira (136,6 cm), quando comparado com consórcio maranducrotalária (129,6 cm). Em relação à produtividade de massa seca e de grãos de milho safrinha, não houve diferença significativa. Em estudo conduzido por Santos et al. (2016), estes também não observaram diferença significativa na produtividade de massa e de grãos de milho, em função da braquiária solteira. No entanto, os mesmos autores encontraram maiores valores para produtividade de massa e grãos de milho safrinha, quando este estava em consórcio com braquiária.

Nesse contexto, mesmo não sendo estatisticamente diferente, o consórcio milho safrinha-marandu produziu massa que impactou nas qualidades físicas (Macro, Micro, VTP e Ds) e químicas (MO, C total, Ca^{2+} e Mg^{2+}) do solo, proporcionando condições adequadas para o desenvolvimento da cultura do milho no ano seguinte.

Avaliando o consórcio de milho com *B. ruziziensis* sem revolvimento do solo, Pacheco et al. (2013), observaram que o cultivo de *Brachiaria ruziziensis* e milho (*Pennisetum glaucum*), proporcionou maior acúmulo de massa seca, maior cobertura e maior acúmulo de nutrientes pela soja em sucessão.

Quadro 11. Altura de planta (AP), massa de 100 grãos (M100), número de grãos por espiga (NGE), produtividade de massa seca (PMS) e de grãos de milho safrinha (PROD) consorciado com braquiária em função do manejo de culturas. Dourados – MS, 2023.

Fontes de variação	AP (cm)	M100 (g)	NGE	PMS (kg ha⁻¹)	PROD
Marandu	136,6 a	27,3 a	283,7 a	4.964 a	3.868 a
Marandu-crotalária	129,6 b	26,3 a	282,6 a	4.849 a	3.726 a
Milho safrinha-marandu	133,5 ab	27,1 a	294,1 a	5.032 a	3.993 a
Média	133,1	26,9	286,8	4.949	3.863
C.V.(%)	6,6	5,92	12,7	16,7	13,8

Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey, $p \leq 0,05$. C.V. (%): coeficiente de variação.

A massa de 100 grãos, o número de grãos por espiga a massa seca de plantas e a produtividade de grãos não foram afetadas pelos sistemas de culturas, no entanto, o consórcio milho safrinha-marandu pode ter criado as melhores condições devido ao maior diâmetro de colmos, que permaneceram por mais tempo no solo. De acordo com Lopes et al. (2007), produtividade de grãos de milho é determinada principalmente pelo número de grãos por espiga e por unidade área, e em menor escala pela massa dos grãos.

3.4. Atributos físicos do solo

Ao analisar os atributos físicos do solo, foi observado interação entre os sistemas de manejos de solo, de culturas e camadas de solo (Quadro 12).

Quadro 12. Quadrado médio do resíduo da análise de variância para densidade (Ds), macroporosidade (Macro), porosidade total (PT) e resistência do solo a penetração (RP) em função dos manejos de solo, culturas e camadas de solo, e suas interações, Dourados – MS, 2023.

Fonte de variação	GL	Ds	Macro	Micro	PT	RP
Bloco	2	0,81 ^{ns}	0,39 ^{ns}	0,98 ^{ns}	0,35 ^{ns}	2,21 ^{ns}
MS	3	7,88*	57,82*	2,76 ^{ns}	29,27*	8,95*
MC	2	7,84*	5,38*	1,25 ^{ns}	3,26 ^{ns}	14,97*
CA	3	96,43*	70,32*	17,45*	134,77*	1172,46*
MS x MC	6	25,95*	328,42*	55,68*	88,31*	10,03*
MS x CA	9	7,39*	3,05*	9,86*	10,22*	16,90*
MC x CA	6	3,71*	5,02*	2,67*	2,97*	3,18*
MS x MC x CA	18	2,97*	8,55*	3,64*	11,40*	7,06*
CV (%)	-	4,40	10,30	2,70	2,70	5,90

^{ns} = não significativo, * = significativo à $p \leq 0,05$ respectivamente pelo teste F. MS – manejos de solo; MC – manejo de culturas; CA - camadas.

Ao avaliar a Ds em função dos manejos de solo, na camada de 0-10 cm no manejo de culturas, os valores ficaram a abaixo de 1,2 g dm³ independente do manejo de cultura utilizado (Figura 6). O PD apresentou adensamento do solo na camada de 10-20 cm, com valor acima de 1,2 g dm³ no consórcio com marandu-crotalária. Avaliando a Ds, Andrade et al. (2009), também observaram que o PD apresentou maiores valores Ds em comparação com preparo de solo convencional. No entanto, houve redução desse adensamento com uso de escarificador e arado de aivecas. Esse resultado no presente estudo pode ter ocorrido em função dos implementos, onde o arado de aivecas revolveu o solo até 25 cm e o escarificador até a camada de 27 cm, respectivamente.

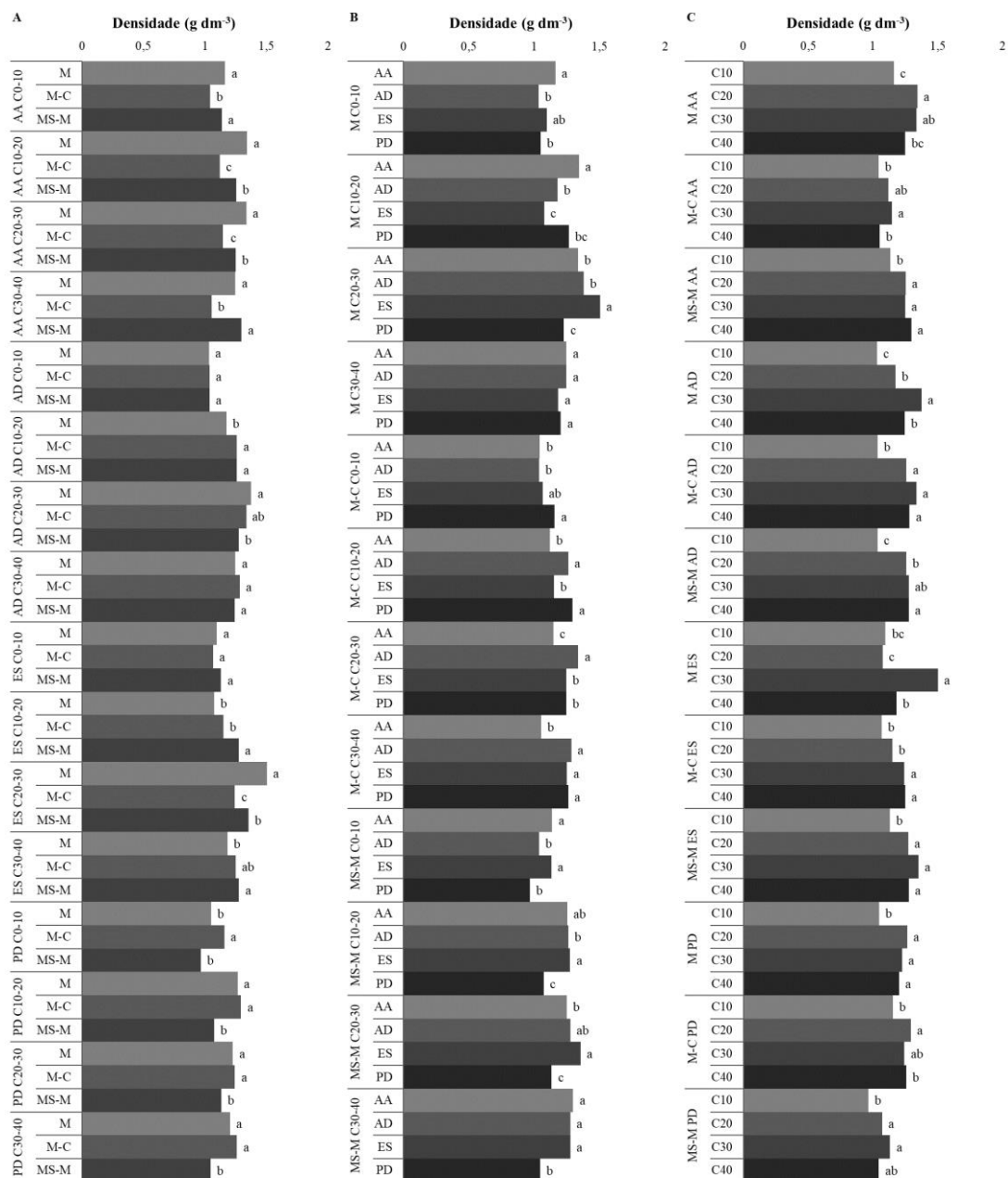


Figura 6. Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para densidade do solo (g dm³). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Resultados do teste Tukey ($p \geq 0,05$). Médias seguidas da mesma letra, na vertical, em cada interação não difere entre si. Dourados – MS, 2023.

O manejo de solo com arado de aivecas e PD apresentaram menores valores de Ds na camada de 0-10 cm quando cultivado marandu solteira (Figura 6), novamente observa-se, que na camada de 10-20 cm, ocorre aumento da Ds em função dos manejos de solo com arado de aivecas e arado de discos na camada de 20-30 cm. Nesse caso, pode ter ocorrido o adensamento das partículas em função dos implementos utilizado quando tem-se apenas uma cultura cultivada na área, que nesse caso foi a marandu solteira.

Os manejos de solo em consórcio milho safrinha-marandu (Figura 6), observa-se que o PD apresenta menores valores de densidade em todas as camadas verificadas, quando comparadas com os manejos de solo no mesmo manejo de cultura. Estes resultados podem estar associados ao vigoroso sistema radicular apresentado pela *B. brizantha* cv. marandu e principalmente do milho safrinha, em que os manejos de solo não foram mais eficientes que o PD na diminuição da Ds. Nesse contexto, Nascente e Stone (2018), observaram reduções na Ds em virtude das combinações de culturas com diferentes sistemas radiculares de tamanhos e agressividade, que atuaram sobre os atributos físicos do solo.

Os valores de Ds, na camada de 0-10 cm, em função manejo de culturas nos manejos de solo e camadas, apresentaram-se abaixo de $1,2 \text{ g dm}^{-3}$ independente do manejo de solo utilizado. Na camada de 0-10 cm encontra-se a maior parte das raízes adventícias, e estas são responsáveis pela maior parte de absorção de água e nutrientes pela planta. Quando cultivado o consórcio marandu-crotalária no arado de aivecas, a Ds apresentou melhores resultados, quando comparado com os demais manejos em todas as camadas avaliadas (Figura 6).

No manejo de solo com arado de discos, os manejos de culturas não apresentaram diferença significativa nas camadas de 0-10 e 10-20 cm, respectivamente (Figura 6). No PD, o consórcio milho safrinha-marandu induziu aos menores valores de Ds independente da camada avaliada. No preparo com escarificador o consórcio de culturas proporcionou redução na Ds do solo. Importante destacar que só houve aumento dos valores de Ds acima de $1,2 \text{ g dm}^{-3}$ na camada 20-30 cm quando cultivado a marandu solteira. Em cultivo de sequeiro, Reichert et al. (2009), relatam que valores de Ds acima de $1,4 \text{ g dm}^{-3}$ podem se tornar impeditivo para o desenvolvimento da maioria das culturas anuais produtoras de grãos.

Na avaliação da Ds em camadas, dentro dos manejos de culturas e solo, a camada de 0-10 cm apresentou os menores valores independente dos manejos de culturas

e solo utilizados (Figura 6). No entanto, o PD na camada de 0-10 cm, o consórcio milho safrinha-marandu apresentou Ds abaixo $1,0 \text{ g dm}^3$ (Figura 6). De acordo com Silva et al. (2022), as menores densidades são observadas em camadas superficiais, pois estas estão relacionadas à maior densidade de raízes das culturas e ao maior teor de matéria orgânica, e também pelo revolvimento do solo causado pela semeadura das culturas.

Na camada de 20-30 cm, observa-se a formação de uma camada adensada nos manejos com revolvimento do solo, independente do manejo de cultura utilizado. Nesse caso, pode ter ocorrido o adensamento das partículas do solo, em virtude do tráfego de máquinas na área. Avaliando a Ds, Sartor et al. (2020), observaram que uma das principais formas de compactação, é o uso de maquinários, e a deposição de partículas no perfil do solo que são deslocadas pelas chuvas, aumentando a Ds em diferentes camadas.

Avaliando a macroporosidade do solo em função dos manejos de solo, o arado de aivecas, no consórcio marandu-crotalária, apresentou maior percentagem de macroporos em todas as camadas avaliadas (Figura 7). Os demais manejos, ficaram próximos dos 10,0% de macroporos em todas as camadas e no mesmo manejo de culturas. Esse resultado, pode ter ocorrido em virtude da maior aeração e formação de macroporos.

No preparo com escarificador e cultivo de marandu solteira houve diferença significativa em comparação com os demais manejos de solo em todas as camadas avaliadas (Figura 7). Neste caso, o escarificador rompeu as camadas do solo até a profundidade de 27 cm, e isso permitiu a maior exploração das raízes da marandu em cultivo solteiro. Avaliando a cobertura do solo com plantas forrageiras, Ribeiro et al. (2018), identificaram que, *B. ruziziensis* permite a manutenção da umidade do solo no outono-inverno em que as condições climáticas não são favoráveis, de tal modo, que a soja cultivada em sucessão mantém a produtividade, em virtude da palha sobre o solo.

A macroporosidade do solo em PD e consórcio de milho safrinha-marandu em camadas, observa-se diferença significativa dos manejos de solo, e culturas nas camadas do solo (Figura 7). O PD apresentou macroporosidade acima de 20% em consórcio milho safrinha-marandu em comparação com os demais manejos de solo, até a camada de 30 cm. Neste caso, o revolvimento do solo não é interessante quando utilizado o consórcio de milho safrinha-marandu, pois o revolvimento não melhorou a macroporosidade do solo. Avaliando atributos físicos do solo em PD, com uso de diferentes manejos de culturas de cobertura, Brown et al. (2018), observaram aumento da macroporosidade do solo em função da rotação de culturas.

O consórcio de milho safrinha-marandu proporciona a manutenção da massa seca sobre o solo no período mais seco, e isso tem minimizado a amplitude térmica do solo, com manutenção da umidade, ciclagem de nutrientes e manutenção dos atributos físicos do solo, em virtude da maior produção de massa seca por essas culturas. Avaliando os benefícios do consórcio milho safrinha-braquiária, Silva et al. (2019), observaram que, a produção de palha auxilia na manutenção do PD e manutenção da qualidade física do solo e sistema de produção agrícola.

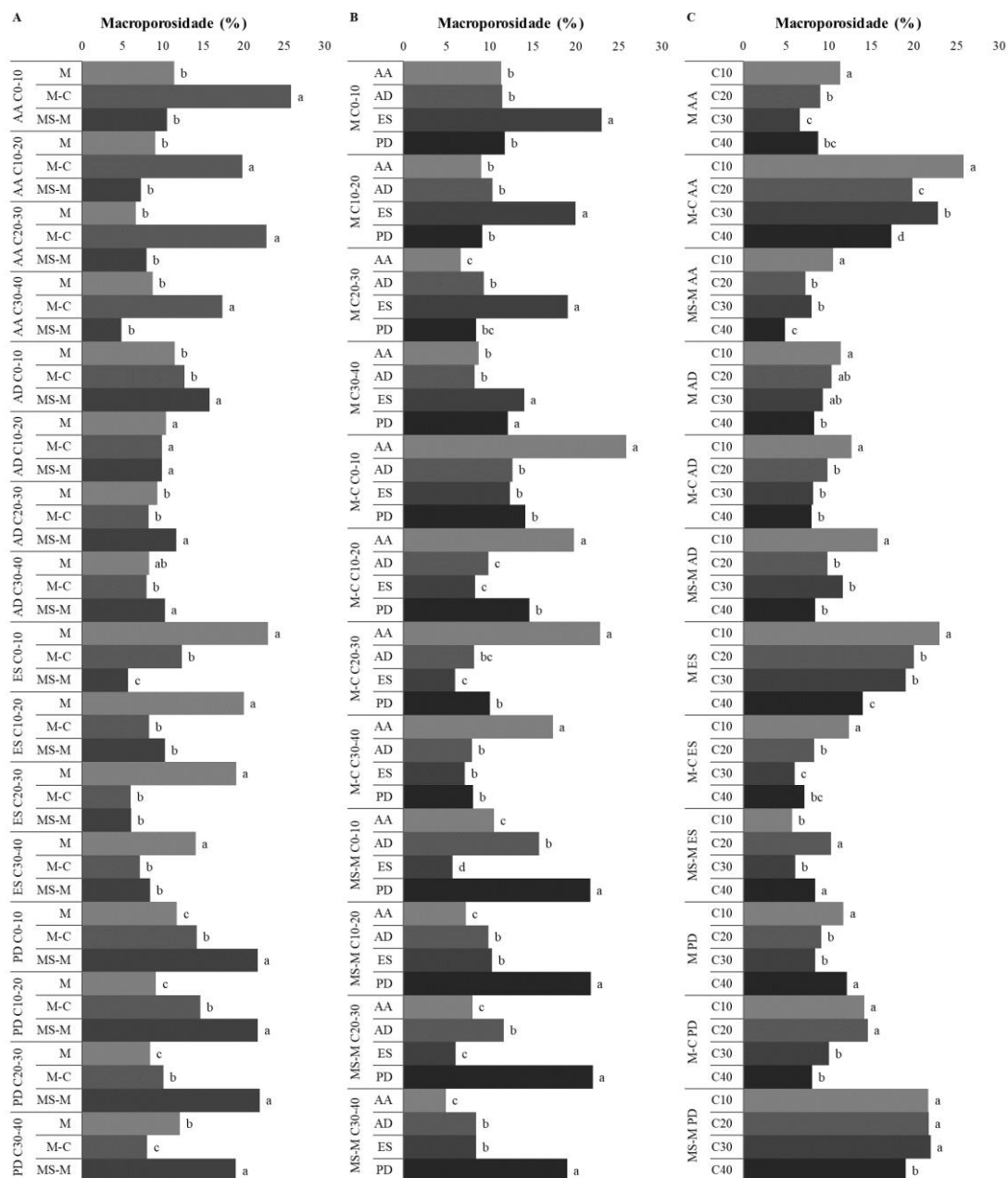


Figura 7. Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para macroporosidade do solo (%). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Resultados do teste Tukey ($p \geq 0,05$). Médias seguidas da mesma letra, na vertical, em cada interação, não diferem entre si. Dourados – MS, 2023.

A microporosidade normalmente apresenta valores maiores que a macroporosidade, no entanto, esta é menos sensível ao processo de compactação do solo, quando comparado a macroporosidade (Figura 8). A maior microporosidade foi observada na camada de 0-10 cm, no manejo de solo com escarificador em consórcio marandu-crotalária, enquanto que os menores valores foram observados no manejo de solo com arado de aivecas e PD no mesmo consórcio de plantas.

No manejo de cultura com marandu solteira, o manejo de solo com PD foi o que apresentou maiores valores de microporos em todas as camadas verificadas, diferindo estatisticamente do manejo de solo com escarificador (Figura 8). No entanto, a microporosidade no consórcio de marandu-milho safrinha, o PD apresentou menores valores de microporosidade. Essa redução da microporosidade em todas as camadas avaliadas, pode estar associado ao crescimento constante das raízes, maior produção de palha do consórcio e redução do revolvimento solo no PD. Avaliando a formação de poros nas camadas do solo em função das plantas de coberturas, Lima, et al. (2015), observaram que as raízes de diferentes famílias contribuem com a formação de bioporos com ampla variação de tamanhos.

Ao avaliar a microporosidade em camadas nos manejos de culturas e de solos (Figura 8), observa-se que as maiores porcentagens de microporos encontram-se na camada de 0-10 cm. Esses resultados podem estar associados ao revolvimento do solo e maior presença de raízes nessa camada. Entretanto, à medida que aumenta a profundidade, ocorre a redução da microporosidade e contribui para presença de camadas compactadas, afetando o crescimento das raízes e das plantas, pela menor eficiência no uso dos recursos disponíveis (GAO et al., 2016).

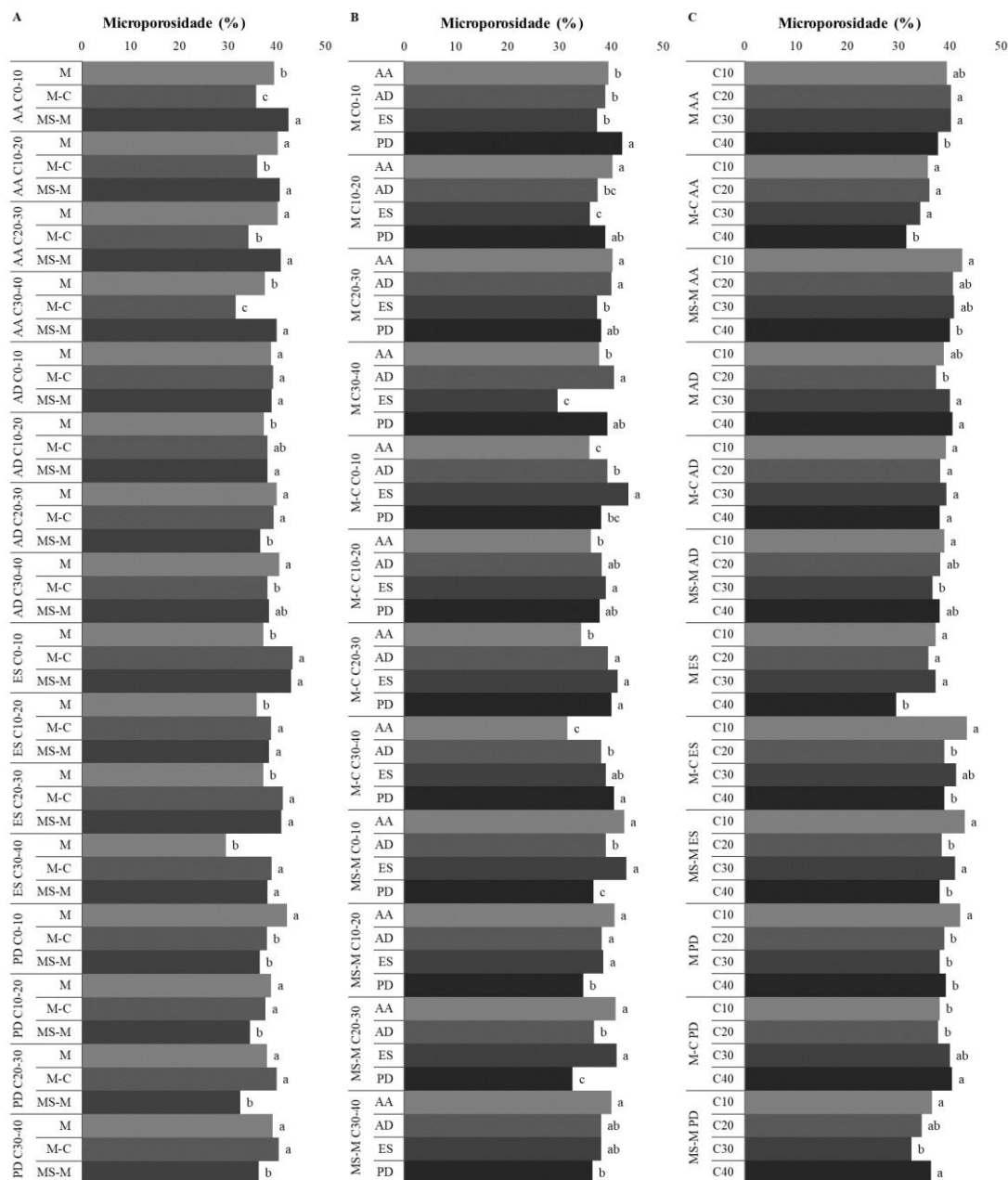


Figura 8. Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para microporosidade do solo (%). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Resultados do teste Tukey ($p \geq 0,05$). Médias seguidas da mesma letra, na vertical, em cada interação, não diferem entre si. Dourados – MS, 2023.

A porosidade total foi alterada em função dos manejos de solo, manejo de culturas e camadas (Figura 9). A porosidade total do solo foi maior em manejo de solo com arado de aivecas e consórcio marandu-crotalária na camada 0-10 cm. Esse resultado apresentou comportamento semelhante ao indicado na densidade do solo, com consórcio marandu-crotalária na camada 0-10 cm, o que é coerente, pois são atributos dependentes entre si, sendo assim, quanto menor a densidade, maior é a porosidade do solo (BORGES et al., 2020).

No cultivo de marandu solteira, o manejo de solo com escarificador apresentou porosidade total próxima dos 60% na camada de 0-10 cm (Figura 9). No entanto, na camada de 30-40 cm, o PD neste mesmo sistema de cultura apresentou a maior porosidade total (51,3%). Esse resultado pode ser explicado, pela maior exploração das raízes da braquiária em profundidade, visto que a mesma apresenta sistema radicular profundo, o que promove a formação poros em camada mais profunda, dessa forma aumentando a porosidade total do solo (SEIDEL et al., 2014).

Ao avaliar o manejo de solo, em PD a porosidade total do solo foi maior no consórcio de marandu-milho safrinha, em todas as camadas do solo avaliadas. Sendo assim, não é necessário o revolvimento do solo quando for utilizado o consórcio marandu-milho safrinha em PD, pois este, aumentaria a porosidade total. Esse resultado, seguiu o comportamento de maiores valores de macroporos e menores de microporos no PD, sendo que os valores de macroporos variaram de 17,9 a 25,6% e os microporos de 31,0 a 39,0%. Os sistemas radiculares resultantes do consórcio de culturas forrageiras com milho contribuem para que haja melhorias nos atributos físicos e hídricos do solo, alterando os valores de resistência do solo a penetração, densidade e porosidade total (SILVA, 2020).

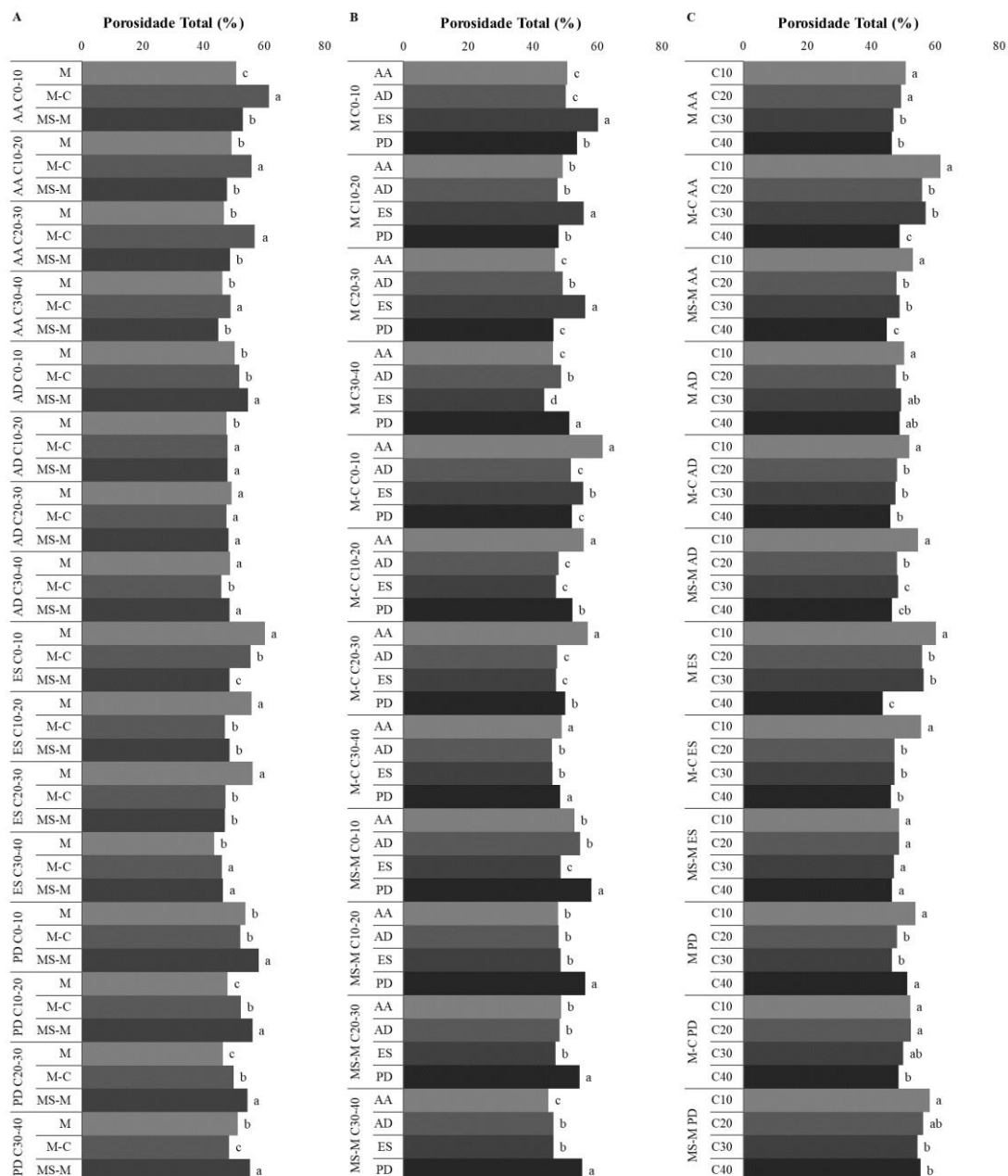


Figura 9. Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para porosidade total do solo (%). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Resultados do teste Tukey ($p \geq 0,05$). Médias seguidas da mesma letra, na vertical, em cada interação, não diferem entre si. Dourados – MS, 2023.

Para resistência do solo à penetração (Figura 10), não houve diferença dos manejos de solo nos manejos de culturas e camada de 0-10 cm com valores médios abaixo de 1,0 MPa. Esses valores estão associados, aos manejos de solo e culturas. A baixa RP do solo permite maior exploração das raízes, maior absorção de nutrientes e infiltração de água no solo. Avaliando a RP em diferentes sistemas de cultivo, Cardoso et al. (2022), encontraram menores RP nas camadas superficiais em PD, com tendência de aumento à medida que aumentava a profundidade.

O aumento acentuado da resistência do solo à penetração (RP) em camadas, com valores superiores a 2,0 MPa, independente do dos manejos de solo e culturas utilizadas, indica a presença de compactação do solo. Esse aumento da RP após a camada de 20 cm também foi constatado por Machado et al. (2023), em seu estudo de avaliação de diferentes manejos de solo e culturas de cobertura. De acordo com os autores a formação dessa camada compactada é influenciada pelos implementos agrícolas, que podem contribuir para a formação de um ‘pé-de-grade’. Essa camada compactada, por sua vez, impede o crescimento das raízes em profundidade, limitando sua capacidade de explorar o solo em busca de água e nutrientes.

Além disso, a RP acima de 2,0 MPa também pode comprometer a infiltração de água no solo, resultando em menor capacidade de retenção de água e potencializando problemas de drenagem (MORAES et al., 2020). Esses resultados destacam a importância do manejo adequado do solo e da utilização praticas que evitem a compactação, como adoção de sistemas de rotação de culturas, manejo solo, e o uso de implementos adequados. Essas medidas visam minimizar os efeitos negativos da compactação do solo, promovendo um ambiente mais favorável para o desenvolvimento das raízes e crescimento das plantas.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 10, nos diferentes manejos de solo e camadas avaliados, os consórcios marandu-crotalária e milho safrinha-marandu, juntamente com os manejos de arado de discos, arado de aivecas e escarificador, foram os que mais contribuíram para redução da RP. Esse resultado pode estar relacionado ao revolvimento do solo realizado até a profundidade de 27,0 cm nos tratamentos mencionados. O revolvimento do solo promovido pelos implementos agrícolas utilizados nestes manejos contribuiu para a descompactação das camadas mais adensadas do solo, facilitando o crescimento das raízes.

Além disso, o sistema radicular pivotante da crotalária e do milho também pode ter desempenhado um papel importante na redução da RP. O sistema radicular pivotante é caracterizado por apresentar uma raiz profunda, que tem a capacidade de romper camadas mais compactadas do solo, permitindo a penetração das raízes em profundidade.

Dessa forma, a combinação de revolvimento do solo promovido pelos implementos agrícolas e sistema radicular pivotante das culturas crotalária e milho safrinha contribuíram para redução da RP, melhorando as condições de desenvolvimento das raízes e possibilitando um melhor crescimento das plantas. Conforme Shinkai et al. (2020), as espécies leguminosas juntamente com espécies gramíneas podem promover ação conjunta para a melhoria dos atributos físicos do solo auxiliando na estabilização e na estruturação do mesmo.

Além disso, o consórcio de espécies leguminosas, como a crotalária, juntamente com espécies gramíneas, pode promover uma ação conjunta para a melhoria dos atributos físicos do solo. Além do mais, as leguminosas têm a capacidade de fixar nitrogênio atmosférico por meio da simbiose com bactérias fixadoras de nitrogênio em seus nódulos radiculares e esse processo resulta na liberação de nitrogênio no solo, o que pode beneficiar o desenvolvimento das gramíneas.

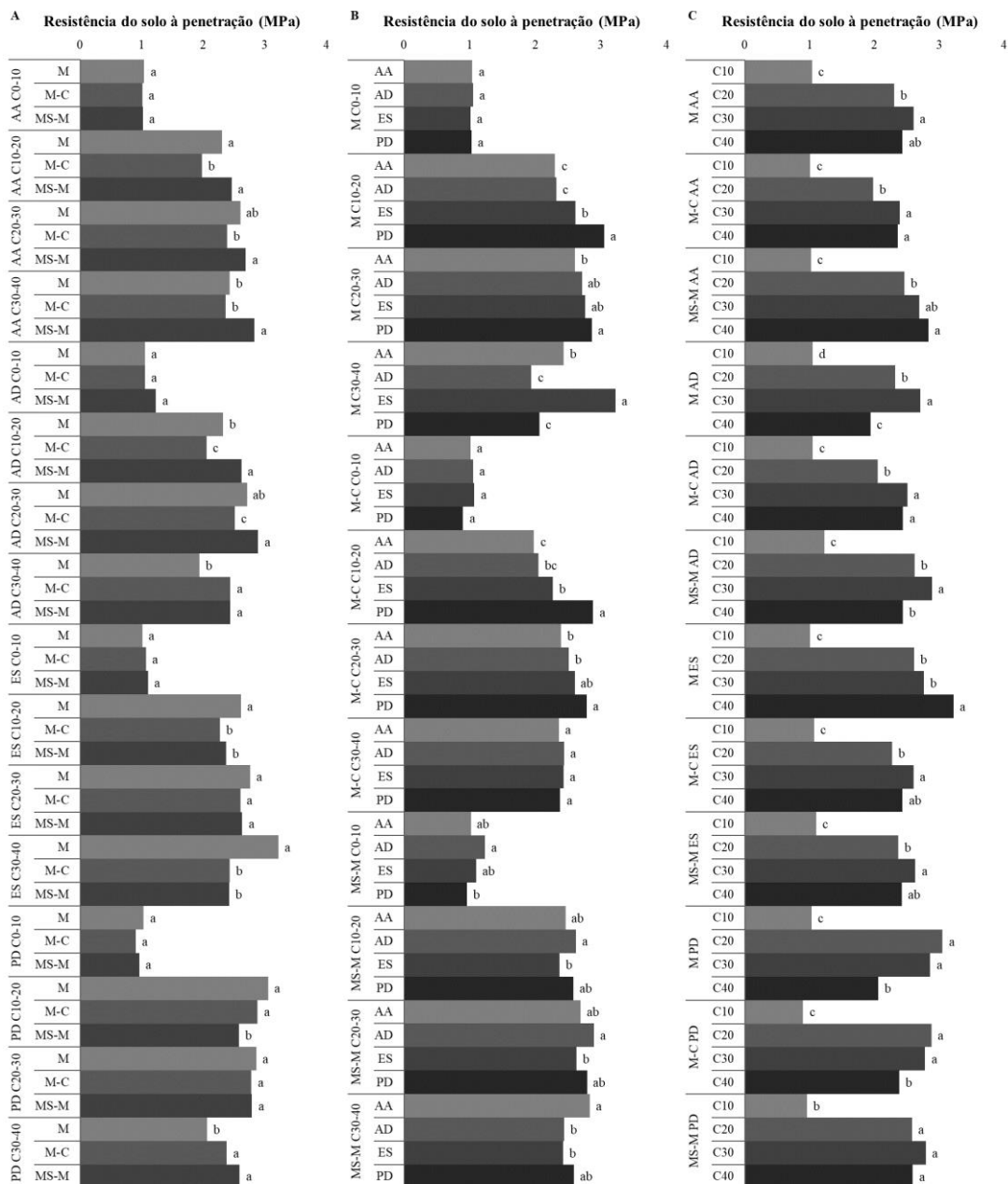


Figura 10. Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para resistência do solo à penetração (MPa). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Resultados do teste Tukey ($p \geq 0,05$). Médias seguidas da mesma letra, na vertical, em cada interação, não diferem entre si. Dourados – MS, 2023.

3.5. Atributos químicos do solo

A análise de variância (Quadro 13), apresentou efeito significativo na interação tripla entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas de solo, para todas as variáveis.

Quadro 13. Quadrado médio do resíduo da análise de variância para fósforo (P), matéria orgânica (MO), carbono orgânico total (COT); saturação por bases (V%), potencial hidrogeniônico em água (pH), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), alumínio (Al^{3+}), capacidade de troca catiônica (CTC) em função dos manejos de solo, manejo de culturas e camadas, Dourados – MS, 2023.

Fonte de variação	GL	pH	Al^{3+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+
Bloco	2	0,41 ^{ns}	1,01 ^{ns}	0,96 ^{ns}	0,74 ^{ns}	3,13 ^{ns}
Manejos de solo	3	4,25*	15,39*	78,83*	21,26*	123,63*
Manejo de culturas	2	11,06*	4,87*	12,75*	9,51*	47,19*
Camadas de solo	2	1008,39*	325,18*	1602,65*	765,31*	907,57*
Ms x Mc	6	44,28*	22,39*	39,95*	36,48*	59,54*
Ms x Ca	6	5,54*	5,03*	2,71*	1,26 ^{ns}	26,57*
Mc x Ca	4	26,04*	14,58*	39,62*	19,98*	18,18*
Ms x Mc x Ca	12	37,96*	15,81*	28,45*	10,08*	17,16*
C.V. (%)	-	1,20	23,40	5,80	7,00	13,90
	GL	P	CTC	V	MO	COT
Bloco	2	0,51 ^{ns}	0,76 ^{ns}	0,53 ^{ns}	1,13 ^{ns}	1,55 ^{ns}
Manejos de solo	3	18,37*	330,87*	14,06*	40,99*	34,48*
Manejo de culturas	2	10,52*	2,58 ^{ns}	0,29 ^{ns}	6,46*	5,58*
Camadas de solo	2	949,97*	474,81*	1029,48*	1019,89*	833,42*
Ms x Mc	6	19,34*	64,00*	32,23*	46,23*	39,06*
Ms x Ca	6	6,54*	8,19*	4,97*	1,34 ^{ns}	3,30*
Mc x Ca	4	8,91*	10,30*	29,93*	4,14*	2,23 ^{ns}
Ms x Mc x Ca	12	11,76*	8,07*	17,77*	13,07*	9,83*
C.V. (%)	-	18,80	3,80	5,50	5,30	6,0

^{ns}, * = não significativo, significativo à $p \leq 0,05$, respectivamente pelo teste F. CV: coeficiente de variação,

Na avaliação do pH em H_2O na camada de 0-10 cm, no manejo de solo com PD e arado de disco no consórcio de marandu-crotalária, foram obtidos os maiores valores. Os valores de pH ideias variam de acordo com as culturas a serem cultivadas, mas geralmente, para a maioria das culturas agrícolas, um pH próximo a neutro (em torno de 6,0 a 7,0) é considerado adequado. E nesses tratamentos os valores pH foram acima de 6,0. Esses maiores valores observado no consórcio marandu-crotalária, pode estar associado aos benéficos adicionais, como a fixação biológica, que libera gradualmente nutrientes ao solo, contribuindo para melhoria do pH e da fertilidade. No caso do manejo

de solo, por sua vez, ao realizar o revolvimento do solo, promoveu revolvimento dos resíduos orgânicos, ocasionando uma maior neutralidade do pH.

No manejo de solo com arado de aivecas na camada de 10-20 cm, também foi observado um maior valor de pH no consórcio marandu-crotalária. Além disso, nos manejos de solo com arado de aivecas e escarificador no consórcio milho safrinha-marandu e marandu solteira, respectivamente, foram registrados os maiores valores de pH na camada de 0-10 cm. Esses resultados indicam que, em ambos os casos, os manejos de solo e a combinação de culturas tiveram um efeito positivo no aumento dos valores de pH nessas camadas de solo específicas.

A presença da crotalária no consórcio com marandu influenciou positivamente o pH nas camadas de 0-10 e 10-20 cm, sugerindo que a crotalária pode ter um efeito alcalinizante no solo, contribuindo para elevar o pH. Isso pode estar relacionado à liberação de substâncias alcalinizante pelas raízes da crotalária, bem como a fixação biológica que aumenta a disponibilidade de nutrientes para as plantas. Barroso et al. (2021) avaliando a melhoria dos atributos químicos do solo em função da adubação verde, observaram que a utilização da crotalária como adubo verde ocasionou a diminuição da acidez potencial e aumento da matéria orgânica do solo.

Neste contexto, os manejos de solo arado de aivecas, arado de discos e escarificador não incorporaram o calcário nas camadas ou não houve tempo suficiente para identificação nas amostras avaliadas. Sendo assim, a reação do calcário se concentrou apenas na camada superficial. Avaliando a influência dos preparos de solo nos atributos químicos, Falleiro et al. (2003), identificaram aumento do pH nas camadas em função do arado de aivecas e grade pesada. Segundo os autores, estes implementos favoreceram a incorporação do resíduo vegetal que estava sobre o solo e este contribuiu para variação do pH em profundidade.

O pH apresentou maiores valores quando foi utilizado os consórcios marandu-crotalária e marandu-milho safrinha, nos manejos de solo em camada de 0-10 cm. Avaliando os efeitos do monocultivo e do consórcio nos atributos químicos do solo, Crusciol et al. (2015), também encontraram maiores valores de pH do solo, Ca^{2+} , Mg^{2+} trocáveis na camada de 0-20 cm. Esses resultados podem estar associados ao aumento da ciclagem de nutrientes devido ao maior aporte de resíduos vegetais sobre o solo em comparação com monocultivo.

Ao avaliar o pH em camadas, observa-se que de 0-10 cm foi o que apresentou valores de pH acima de 6,0, no entanto, nas camadas inferiores de 10-20 cm e 20-30 cm o pH não passou de 6,0. Sendo assim, constatou-se que os manejos de solo e culturas não tiveram influência significativa no pH do solo em profundidade, e a reação do calcário não foi efetiva em profundidade.

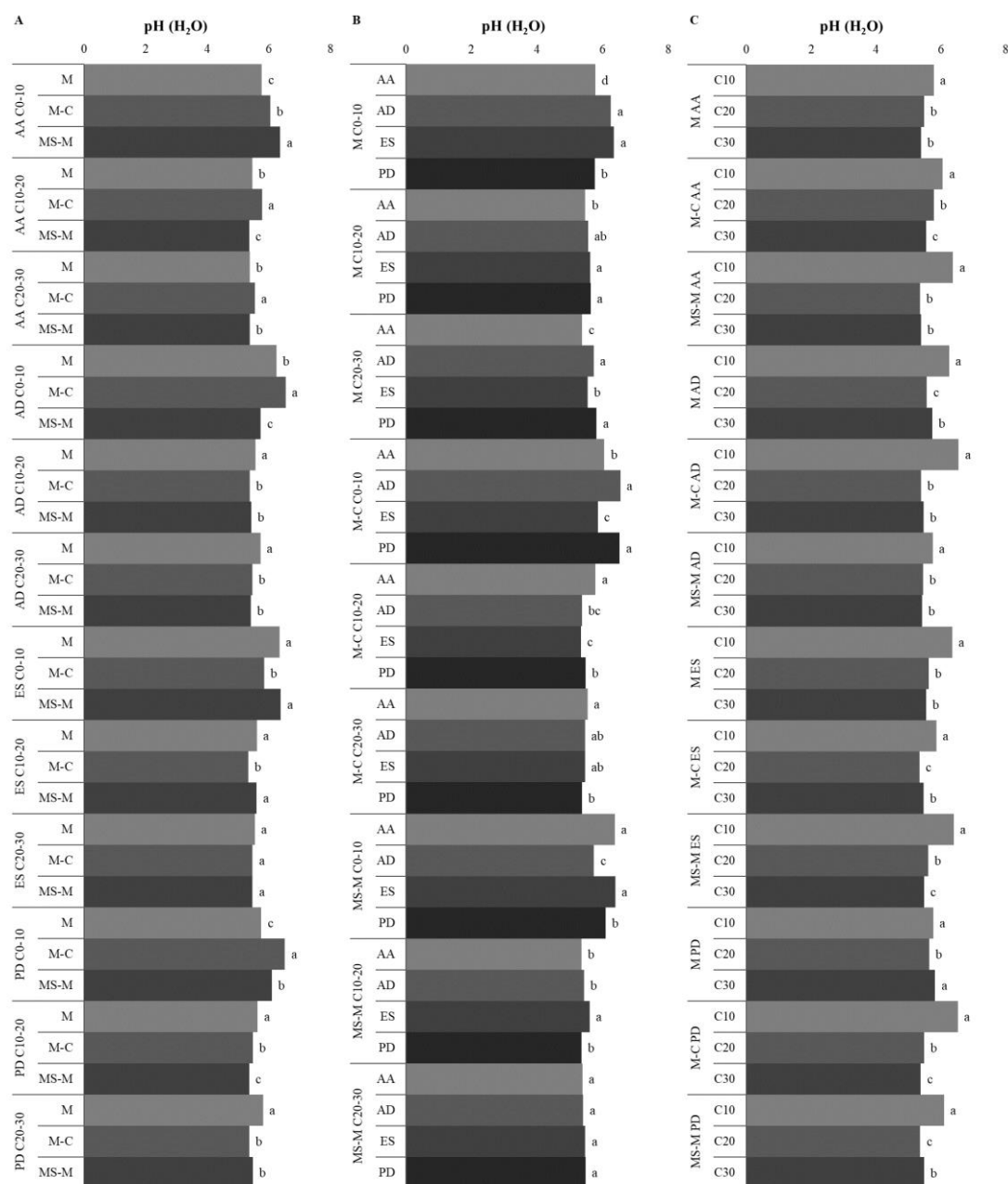


Figura 11. Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para pH em (H₂O). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES

– Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Resultados do teste Tukey ($p \geq 0,05$). Médias seguidas da mesma letra, na vertical, em cada interação, não diferem entre si. Dourados – MS, 2023.

Os resultados indicam que o teor de Al^{3+} não apresentou diferença significativa em função dos manejos de solo nos consórcios marandu-crotalária e milho safrinha-marandu na camada de 0-10 cm (Figura 12). Essa uniformidade nos teores de Al^{3+} pode ser atribuída à maior reação do calcário na superfície de 0-10 cm, uma vez que os manejos de solo não incorporaram quantidades suficientes de calcário em subsuperfície.

Quando o calcário é aplicado superficialmente, a reação deste tende a mais efetiva na camada superficial 0-10 cm, elevando o pH e reduzindo o teor de Al^{3+} nessa região. No entanto, nas camadas de subsuperfície, a reação do calcário é limitada devido a falta de incorporação adequada, o que pode resultar em menores efeitos na redução dos teores de Al^{3+} nessas camadas, que pode explicar o maior teor de Al^{3+} entre os manejos de solo nos consórcios e marandu solteira nas camadas mais profunda do solo.

Ao avaliar o teor de Al^{3+} nas camadas nos diferentes manejos de solo e culturas, observa-se aumento com aumento da profundidade. Isso indica que a concentração do Al^{3+} tender a ser maior nas camadas mais profundas do solo devido à menor reação do calcário nessas camadas. Este resultado está de acordo com a tendência observada no pH do solo (Figura 11) que também diminuiu em profundidade. Isso destaca a relação direta entre o pH e a disponibilidade do Al^{3+} no solo. Seguindo o diagrama de disponibilidade de nutrientes (TAIZ e ZEIGER, 2017), quanto menor o pH, maior é a disponibilidade de Al^{3+} no solo, nesse sentido, o menor valor de pH nas camadas de 10-20 e 20-30 cm refletiram em maior valor de Al^{3+} no solo.

O aumento da disponibilidade do Al^{3+} nas camadas mais profunda pode ser prejudicial para o crescimento das plantas, uma vez que altas concentrações desse íon são tóxicas para a maioria das culturas. Por isso, a correção do pH do solo é uma prática importante para reduzir a disponibilidade de Al^{3+} , dessa forma, a relação entre o aumento do teor de Al^{3+} em profundidade e a diminuição do pH reforça a importância de se monitorar e ajustar o pH do solo por meio de práticas de manejo do solo.

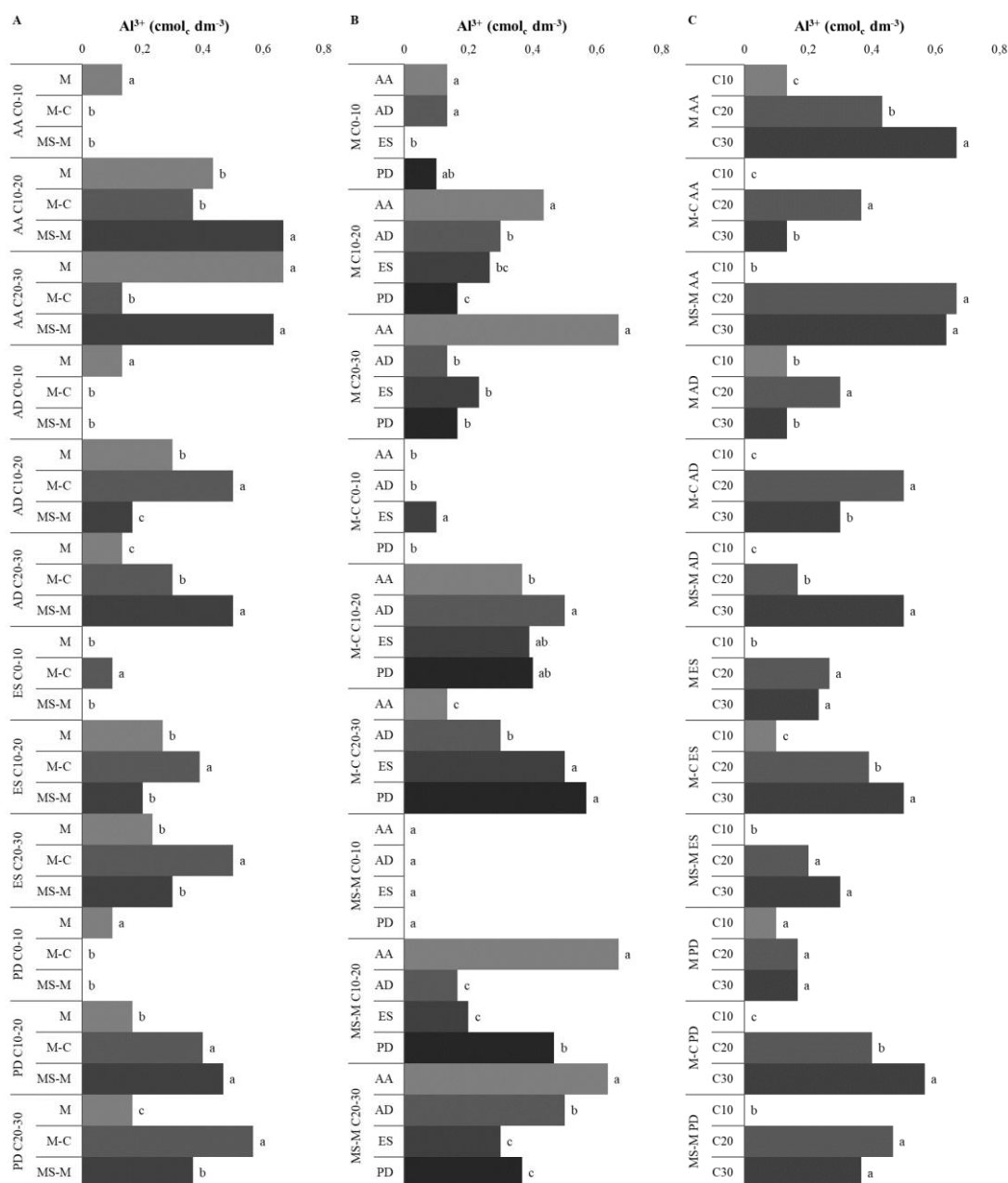


Figura 12. Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para alumínio (Al^{3+} cmol_c dm⁻³). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Resultados do teste Tukey ($p \geq 0,05$). Médias seguidas da mesma letra, na vertical, em cada interação, não diferem entre si. Dourados – MS, 2023.

Os teores mais elevados de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram identificados na camada de 0-10 cm do solo, influenciados pelos manejos de solo com PD e arado de discos em conjunto com o consórcio marandu-crotalária (Figura 13 e 14). E ao analisar os diferentes manejos de solo no cultivo da marandu solteira, constatou-se que os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram mais elevados nos sistemas de manejo de solo com escarificação e PD. No consórcio milho-marandu, os valores mais elevados de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram identificados nos manejos com escarificador e arado de aivecas. Ocorreu variação nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} em função dos manejos de solo e de culturas utilizadas, sendo que as maiores concentrações foram encontradas na camada superficial de 0-10 cm. Essa maior concentração de Ca^{2+} e Mg^{2+} nessa camada é associado ao pH e a maior reação do calcário nesta camada.

O pH do solo desempenha um papel crucial na disponibilidade de nutriente para as plantas. Para disponibilidade ideal do Ca^{2+} e Mg^{2+} , o pH do solo deve estar em torno de 5,5 a 7,0. Neste experimento o pH variou de 5,7 a 6,5 nos manejos de solo e culturas, entretanto, a reação do calcário foi maior na camada de 0-10 cm (Figura 11). Este resultado, pode ser atribuído à não incorporação em profundidade do calcário pelos diferentes manejos de solo e culturas, bem como à baixa mobilidade Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo, como resultado, houve uma maior concentração desses nutrientes na camada superficial do solo.

Na avaliação dos diferentes manejos de culturas nos manejos de solo, destaca-se que o consórcio milho safrinha-marandu apresentou diferença significativa nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} nas camadas de 10-20 e 20-30 cm em comparação com os demais tratamentos. Esse resultado indica que a interação entre plantas milho safrinha e marandu influenciou a distribuição e disponibilidade de Ca^{2+} e Mg^{2+} em profundidade, resultando em variações notáveis nesses nutrientes. Essa variação pode estar associada ao sistema vigoroso e agressivo das raízes do milho safrinha e da marandu, que pode ter influenciado a mobilidade do Ca^{2+} e Mg^{2+} em profundidade. A presença de raízes profundas da marandu pode ter facilitado a mobilidade desses nutrientes para a camada mais profunda do solo, onde geralmente encontra-se menores teores destes nutrientes.

Avaliando o teor de Mg^{2+} em função dos manejos de cultura, Miranda (2015), encontrou maiores valores em consórcio milho-marandu quando comparado com milho solteiro nas camadas avaliadas. Segundo o autor, a diferença entre os teores de Mg^{2+} pode estar relacionada a maior adição de resíduos vegetais, ocasionado pelo consórcio que promove a ciclagem de nutrientes deixando o Ca^{2+} e Mg^{2+} mais livre em solução do solo.

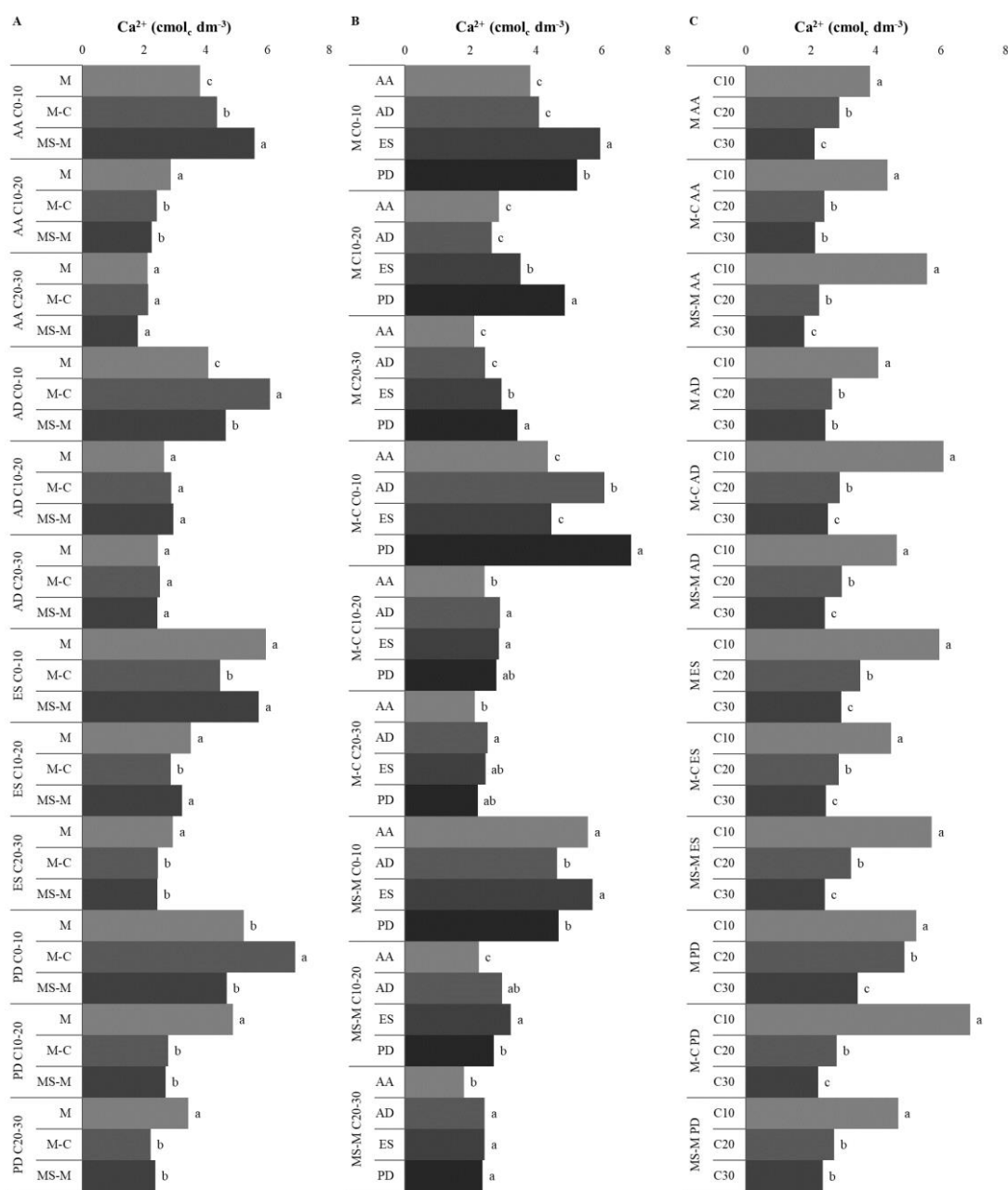


Figura 13. Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para cálcio (Ca^{2+} cmol_c dm⁻³). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Resultados do teste Tukey ($p \geq 0,05$). Médias seguidas da mesma letra, na vertical, em cada interação, não diferem entre si. Dourados – MS, 2023.

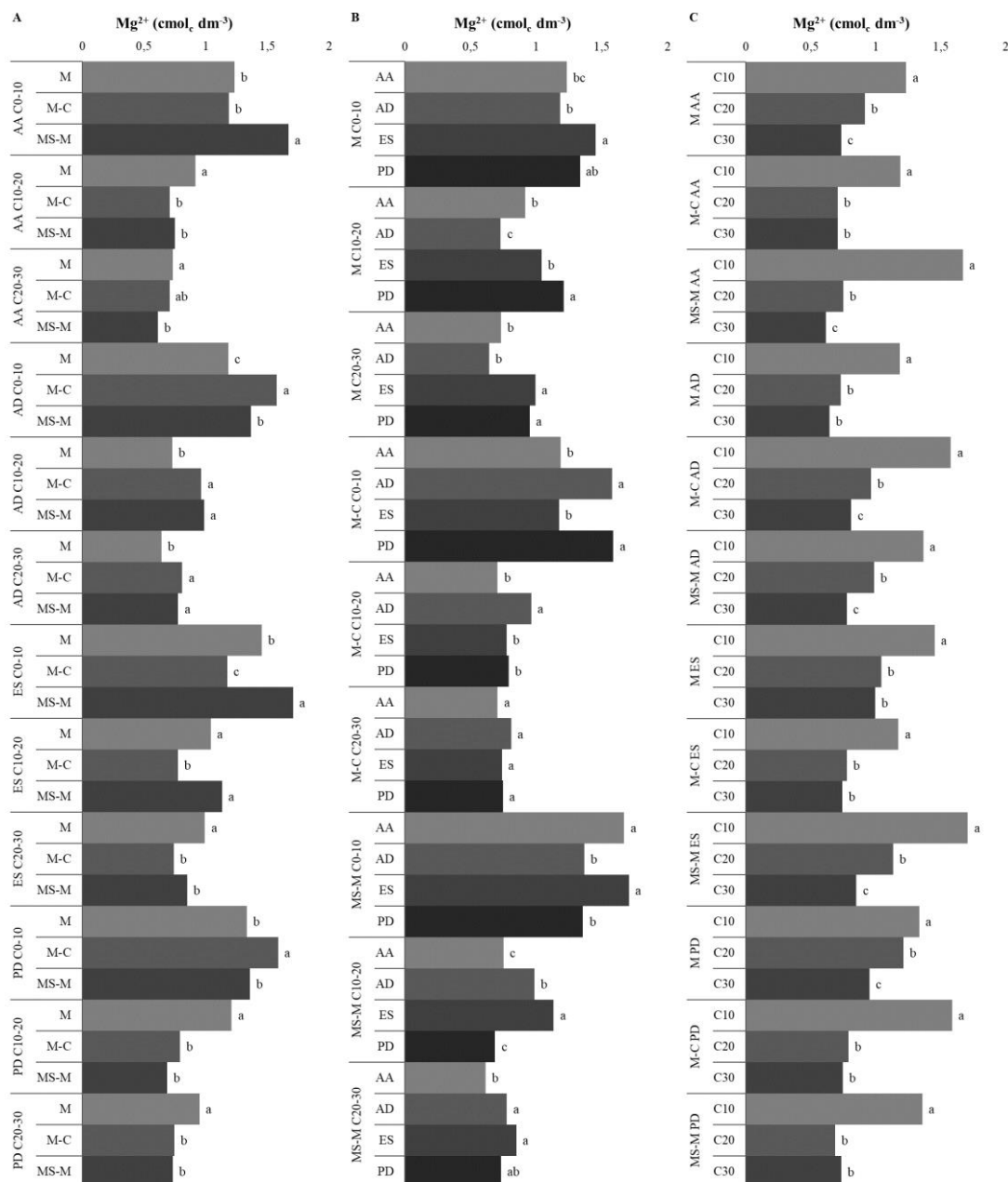


Figura 14. Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para magnésio (Mg^{2+} cmol_c dm⁻³). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Resultados do teste Tukey ($p \geq 0,05$). Médias seguidas da mesma letra, na vertical, em cada interação, não diferem entre si. Dourados – MS, 2023.

Os resultados para o potássio (K^+) indicam que o PD foi o manejo de solo que resultou nos maiores teores desse nutriente, nas camadas superficial e subsuperficial do solo, independente do manejo de cultura utilizada.

O maior acúmulo de potássio (K^+) na camada de 0-10 cm no manejo de solo PD pode estar relacionado à ciclagem de nutrientes ocasionada pela deposição dos resíduos vegetais das culturas de cobertura sem revolvimento do solo. A presença dessa cobertura vegetal e a ausência de revolvimento do solo criam um ambiente favorável para ciclagem de nutrientes, incluindo o potássio.

As culturas de coberturas utilizadas no SPD, como a marandu, crotalária, e o milho safrinha podem explorar as camadas subsuperficiais do solo, promovendo a captura dos nutrientes e o transporte desses para a camada superficial através da ciclagem de nutrientes. Neste contexto, Jesus Diniz et al. (2021), também observaram maiores concentrações de K^+ na camada superficial solo. Segundo Pacheco et al. (2011), a palha produzida pela braquiária pode resultar na ciclagem de até 142,8 kg ha⁻¹ de N, 13,6 de P kg ha⁻¹ e 126,7 kg ha⁻¹ de K^{2+} .

O teor K^+ de 2,3 cmol_c dm⁻³, observado na camada de 0-10 cm no consórcio marandu-crotalária no PD é considerado alto, no entanto, os demais manejos de solo nos manejos de culturas variaram de 0,55 à 1,2 cmol_c dm⁻³, sendo considerando baixo de acordo com Broch e Ranno (2012). A crotalária devido a sua alta capacidade de produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes, tem apresentado eficiência na extração de nutrientes do solo. Segundo Silva et al. (2017), a crotalária cultivada como planta de cobertura em solo no cerrado, conseguiu converter quantidades suficientes de macronutrientes (387,5 kg ha⁻¹ de N, 151,8 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 480,6 kg ha⁻¹ de K₂O) através da quantidade de matéria seca produzida.

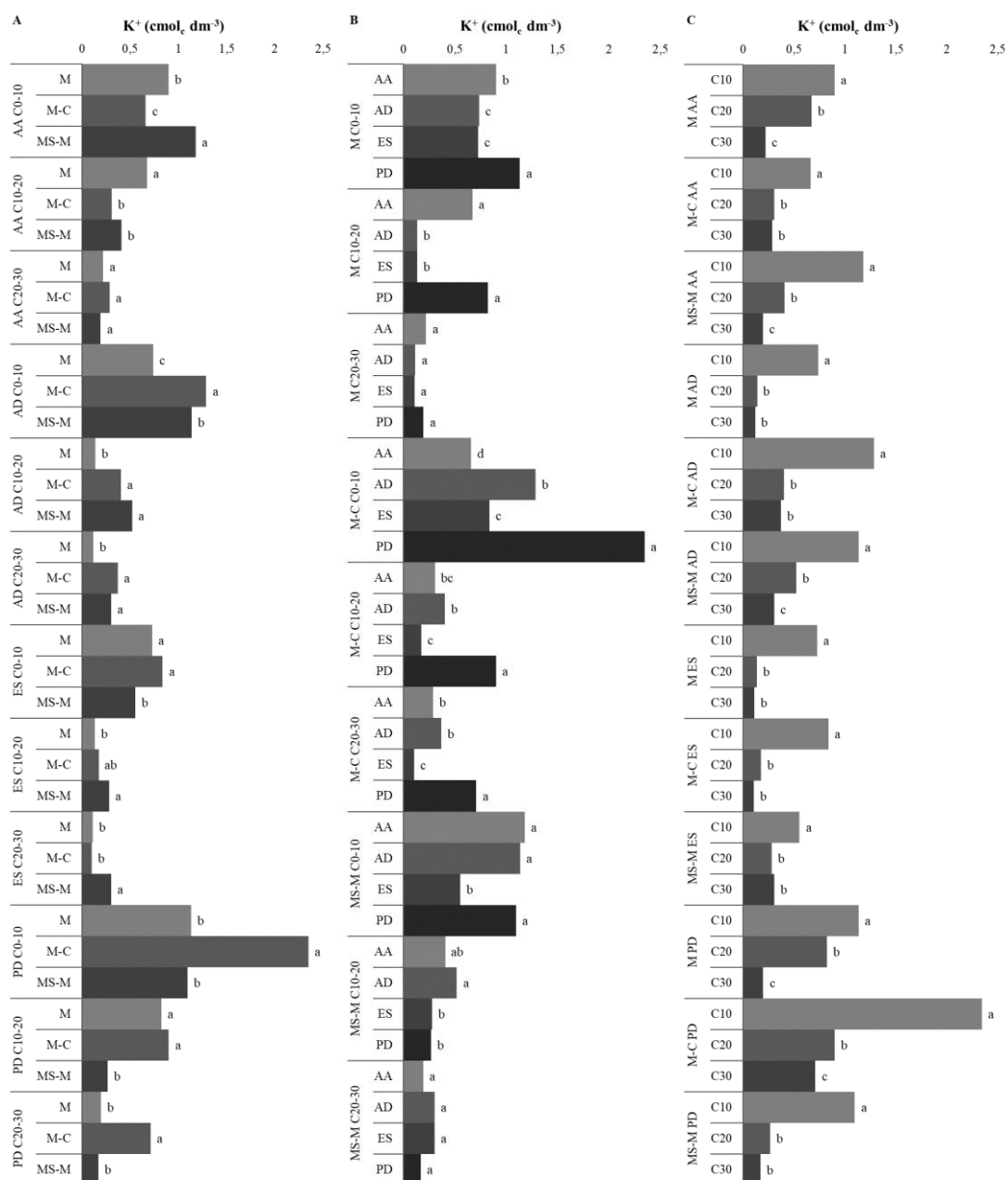


Figura 15. Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para potássio (K^+ cmol_c dm⁻³). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Resultados do teste Tukey ($p \geq 0,05$). Médias seguidas da mesma letra, na vertical, em cada interação, não diferem entre si. Dourados – MS, 2023.

De acordo com os resultados obtidos nos manejos de solo do consórcio marandu-crotalária, os teores de fósforo (P) apresentaram maiores valores na camada 0-10 cm (Figura 16). Isso indica que a concentração de fósforo foi maior nessa camada em comparação com as camadas mais profundas do solo. Essa distribuição de P mais elevado na camada superficial pode ser atribuída a alguns fatores relacionados aos manejos de solo adotado. Primeiramente a crotalária possui capacidade de fixar nitrogênio através das bactérias presentes nos nódulos, e essa fixação pode liberar quantidades significativas de P no solo, contribuindo para o aumento dos teores de P na camada superficial.

No manejo com escarificador, os teores de P foram maiores camadas de 0-10 e 10-20 cm, nos manejos de culturas com marandu e consórcio de marandu-crotalária. Isso nos sugere que escarificação contribuiu para o aumento dos níveis de fósforo nessas camadas específicas do solo. Ao romper as camadas compactadas, o escarificador pode ajudar a promover a incorporação dos nutrientes aplicados, favorecendo a sua distribuição nas de 10-20 cm. A escarificação pode melhorar aeração do solo, aumentando a atividade microbiana e a decomposição da matéria orgânica liberando fósforo para as plantas.

Os manejos de solo não incorporaram o P em camadas (Figura 16), o que pode ter ocorrido em função do recente revolvimento de solo, que pode ter favorecido a exposição do P a sítios de adsorção, reduzindo a sua disponibilidade no solo. As quantidades elevadas de óxi-hidróxidos de Fe e Al na fração argila presentes no solo do cerrado que são altamente intemperizados, contribui para grande afinidade do P por esses minerais, sendo assim, esse nutriente está sujeito a sofrer processos de adsorção específica, o que diminui a sua disponibilidade (PELUCO et al., 2015).

De acordo com a avaliação realizada nos manejos de culturas, nos diferentes manejos de solo como arado de aivecas, arado de discos e escarificador, os consórcios apresentaram maiores teores de fósforo na cama de 0-10 cm do solo. Esses resultados sugerem que a presença dessas culturas em consórcio promoveu uma maior disponibilidade de P na camada de 0-10 cm. Isso pode ser atribuído a diferentes fatores associados ao manejo e ao sistema radicular das plantas envolvidas.

A combinação de milho-marandu pode aumentar a ciclagem de nutrientes no sistema, por ser uma gramínea de crescimento vigoroso e contribuir com mais resíduos na superfície do solo, o que, pode aumentar a disponibilidade de fósforo em superfície. O estabelecimento do consórcio com *B. brizantha* pode ser uma alternativa para aumento da produção de biomassa e ciclagem de nutrientes (OLIVEIRA et al., 2019).

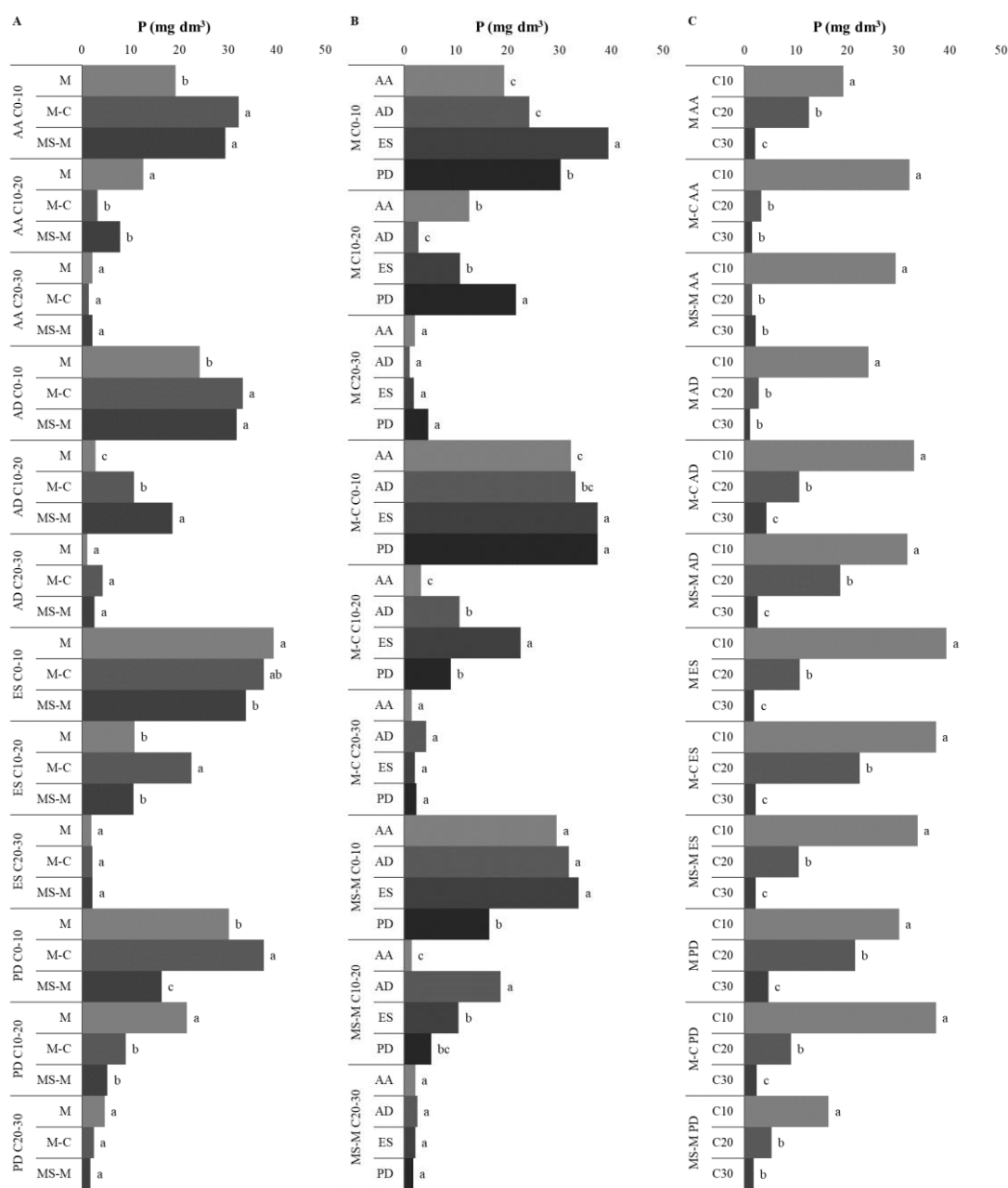


Figura 16. Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas de solo para fósforo ($P \text{ mg dm}^{-3}$). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Resultados do teste Tukey ($p \geq 0,05$). Médias seguidas da mesma letra, na vertical, em cada interação, não diferem entre si. Dourados – MS, 2023.

A ciclagem de nutriente libera de volta os nutrientes ao solo através do processo de decomposição dos resíduos vegetais, no caso do consórcio milho safrinha-marandu, a massa produzida pelas plantas do consórcio contribuiu para ciclagem P mantendo-o maiores valores na camada superficial de 0-10 cm.

O maior acúmulo de P observado no consórcio de marandu-crotalária, é associado a eficiência da crotalária em acumular macronutrientes na parte aérea. Avaliando a ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura, Pereira et al. (2017), verificaram que a crotalária apresenta eficiência no acúmulo P e na ciclagem deste nutriente. Na camada de 20-30 cm não houve diferença significativa no teor de P em função dos manejos de cultura nos manejos de solo e camadas.

A capacidade de troca de cátions (CTC) reflete a quantidade de cátions disponíveis no solo para as plantas. Ao avaliar a CTC em função dos diferentes manejos de solo nos consórcios marandu-crotalária e milho safrinha-marandu, foi constatado que o PD em ambos os consórcios apresentou maiores valores para esses atributos nas respectivas camadas 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm (Figura 17). Isso significa que o PD promoveu uma maior capacidade de troca de cátions nas diferentes profundidades do solo em comparação com os demais manejos de solo.

Essa maior CTC indica que os solos sob PD nesses consórcios possuem uma maior capacidade de reter e disponibilizar cátions essenciais para o crescimento das plantas. Além do mais, o PD está associado ao acúmulo de matéria orgânica e maior atividade biológica que envolve a manutenção desta na superfície do solo contribuindo para melhoria da CTC do solo.

O valor mais elevado da capacidade de troca de cátions (CTC), quando comparado com o valor de referência da análise química do solo, pode estar relacionado aos teores médios de Ca^{2+} e Mg^{2+} . Esses níveis mais altos desses cátions trocáveis contribuem para o aumento geral da CTC no consórcio marandu-crotalária ($16,9 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e marandu-milho safrinha ($15,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), resultando em valores médios de saturação de bases acima de 50%.

Esses resultados sugerem que o consórcio marandu-crotalária e milho safrinha-marandu foram capazes de proporcionar elevados teores de cátions trocáveis no solo, especialmente Ca^{2+} e Mg^{2+} . A alta CTC e saturação de bases acima de 50% são indicativos de que o solo apresenta boas condições de disponibilidade de nutrientes, o que

favorece o crescimento e a produtividade das culturas no consórcio marandu-crotalária e milho safrinha-marandu.

Nesse contexto, é possível concluir que os consórcios utilizados, exercem um impacto significativo na fertilidade do solo resultando na redução da acidez e no aumento os teores de matéria orgânica, Ca^{2+} e Mg^{2+} . Essa influência direta reflete-se positivamente na CTC e na saturação de bases (V%) especialmente quando comparado com sistema solteiro da marandu.

De forma geral, na avaliação dos diferentes manejos de culturas nos manejos de solo e camadas, os consórcios apresentaram maiores valores de capacidade de troca de cátions. Isso indica que os consórcios contribuíram para maior retenção e disponibilização de cátions essenciais. Ao avaliar o efeito dos diferentes manejos de culturas na química do solo, Miranda (2017) constatou que o consórcio milho-braquiária apresentou um valor mais elevado de capacidade de troca de cátions em comparação com cultivo do milho solteiro.

Por outro lado, Santana et al. (2018), ao analisarem os atributos químicos do solo, observaram que o SPD resultou em um maior acúmulo de Ca^{2+} e Mg^{2+} em relação ao sistema de plantio convencional. Esse acúmulo de nutrientes influenciou diretamente os maiores valores de CTC do solo. Esses resultados reforçam a importância dos diferentes manejos de culturas na modificação da química do solo e destacam os benefícios potenciais do consórcio e do PD para melhorar a fertilidade e a capacidade de nutrição do solo.

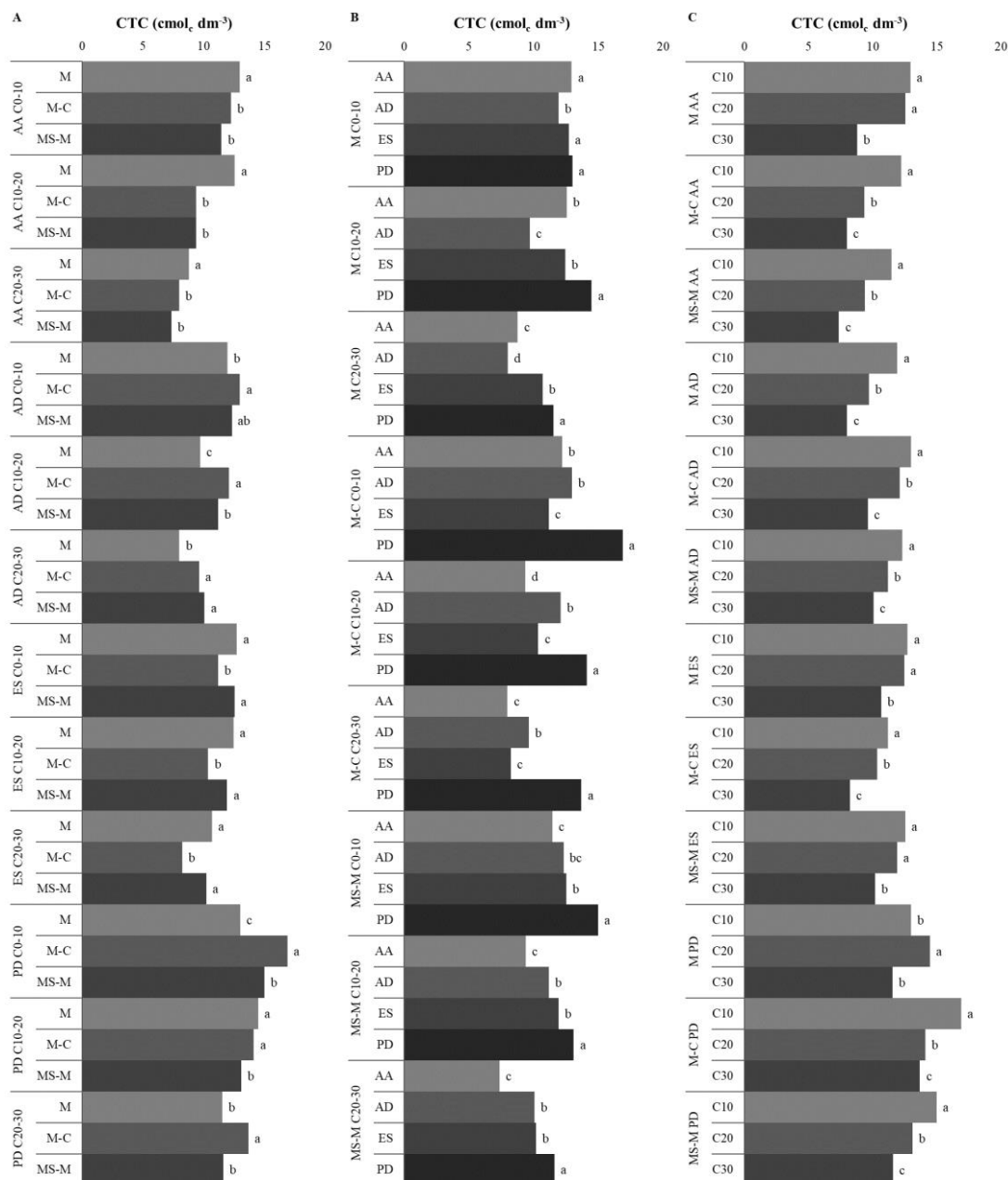


Figura 17. Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para capacidade de troca de cátions (CTC cmol_c dm⁻³). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Resultados do teste Tukey ($p \geq 0,05$). Médias seguidas da mesma letra, na vertical, em cada interação, não diferem entre si. Dourados – MS, 2023.

A saturação por bases (V%) na camada de 0-10 cm foi menor no manejo de solo com arado de aivecas no consórcio de marandu-crotalária (Figura 18). O arado de aivecas pode influenciar a distribuição e disponibilidade dos nutrientes. No caso do consórcio de marandu-crotalária, pode ter ocorrido uma maior demanda por nutrientes por parte das plantas, o que resultou em maior extração das bases do solo, diminuindo-a na camada superficial.

O manejo de solo com escarificador com cultivo da marandu solteira resultou em uma saturação por bases (V%) de 64% na camada de 0-10 cm. Já no manejo de solo com arado de aivecas com consórcio de milho safrinha-marandu a V% foi de 71,4% nessa mesma camada. Observa-se que a maioria dos manejos de solo na camada de 0-10 cm apresentou reação do calcário aplicado em superfície, resultando em uma elevação da saturação por bases acima de 50%, isso indica que o calcário teve efeito positivo na correção da acidez do solo nesta camada.

A saturação de base é um indicador importante da fertilidade do solo, pois está relacionado à disponibilidade de nutrientes essenciais para as plantas. Valores de V% adequado podem variar dependendo das culturas e das características do solo, no entanto, geralmente, os valores devem estar entre 50 e 80% para que a maioria das culturas apresente todo seu potencial produtivo (RONQUIM, 2010).

Na avaliação do V% em função dos manejos de culturas nos manejos de solo e camadas, observa-se na (Figura 18), que os consórcios em geral apresentaram maiores valores de V% em comparação cultivo solteira. Isso pode ser explicado pelo fato de que os consórcios normalmente envolvem a combinação de duas ou mais culturas, o que pode promover a interações benéficas no sistema. No caso dos consórcios, as diferentes espécies vegetais podem ter exigências nutricionais complementares, resultando em uma utilização mais eficientes dos nutrientes presentes no solo.

De acordo com Borghi e Crusciol (2007), a consorciação milho-braquiária, favorece a manutenção da fertilidade do solo com aumento nos teores de MO, macronutrientes, com reflexo na capacidade de troca de cátions e na saturação por bases (V%), quando comparado às áreas com cultivo solteiro do milho.

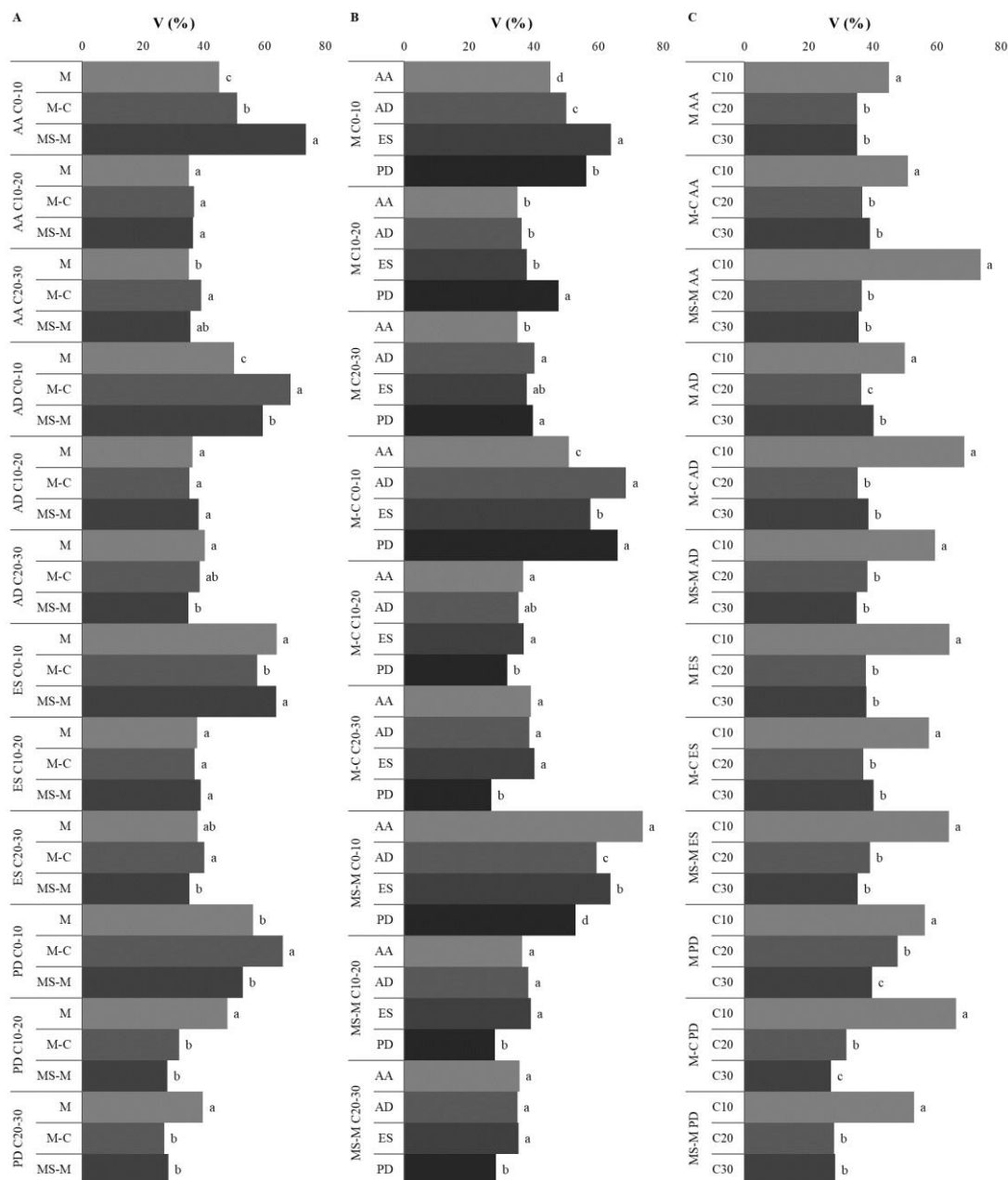


Figura 18. Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para saturação de bases (V%). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Resultados do teste Tukey ($p \geq 0,05$). Médias seguidas da mesma letra, na vertical, em cada interação, não diferem entre si. Dourados – MS, 2023.

A saturação por bases avaliada em camadas nos manejos de solo e de culturas, observa-se maior concentração de bases na camada de 0-10 cm. No entanto, os manejos de solo e as culturas avaliadas não aumentaram a V% em profundidade. Isso pode ser reflexo da maior reação do calcário em superfície, o que elevou a V% acima de 50% na maioria dos manejos de solo e culturas. Miranda (2015), encontrou maior valor da V% na camada superficial de 0-10 cm em manejos de culturas. Esse resultado pode ser atribuído aos resíduos vegetais e ainda, o curto espaço de tempo entre as aplicações de calcário e gesso e suas avaliações, devido à baixa disponibilidade hídrica no período.

De acordo com as Figuras 19 e 20, os manejos de solo em PD e arado de discos demonstraram maiores acúmulos de matéria orgânica e carbono orgânico total. No caso do consórcio marandu-crotalária, houve um aumento significativo nos níveis de matéria orgânica e carbono orgânico total em comparação com outros manejos de culturas. Já no caso do PD com marandu solteira, também houve acúmulo significativo de matéria orgânica e carbono orgânico total, mas menor valor. Esses resultados indicam que os manejos de solo em plantio e arado de discos foram mais eficientes na conservação e aumento dos níveis de matéria orgânica e carbono orgânico total no solo, principalmente quando utilizado o consórcio marandu-crotalária.

O PD promove a conservação da matéria orgânica do solo devido à sua cobertura por resíduos (folhas e caules) das culturas anterior, neste caso, o solo apresentava um teor de matéria orgânica considerado antes do início do experimento no manejo de PD (Quadro 1), então, é possível que tenha ocorrido um aumento, ou no mínimo, uma manutenção desse teor ao longo do tempo condução do experimento devido às práticas de manejo do solo e de culturas adotadas.

O acúmulo de matéria orgânica e carbono orgânico observados nos manejos de solo e de culturas consorciado milho safrinha-marandu e marandu-crotalária apresentaram maiores valores. Esses resultados podem estar associados ao consórcio de culturas, onde a combinação de plantas apresente uma relação carbono e nitrogênio C/N mais alta que as culturas individuais. Isso ocorre porque diferentes plantas apresentam diferentes teores de carbono e nitrogênio em suas partes vegetativas.

Uma relação C/N mais alta pode levar a decomposição mais lenta da MO, e contribuir para o acúmulo de MO e COT no solo ao longo tempo. Conforme Lorenzetti et al. (2023), os consórcios têm capacidade de produzir benefícios de médio a longo prazo, pois apresentam elevada relação C/N com maior permanência da palha por mais tempo.

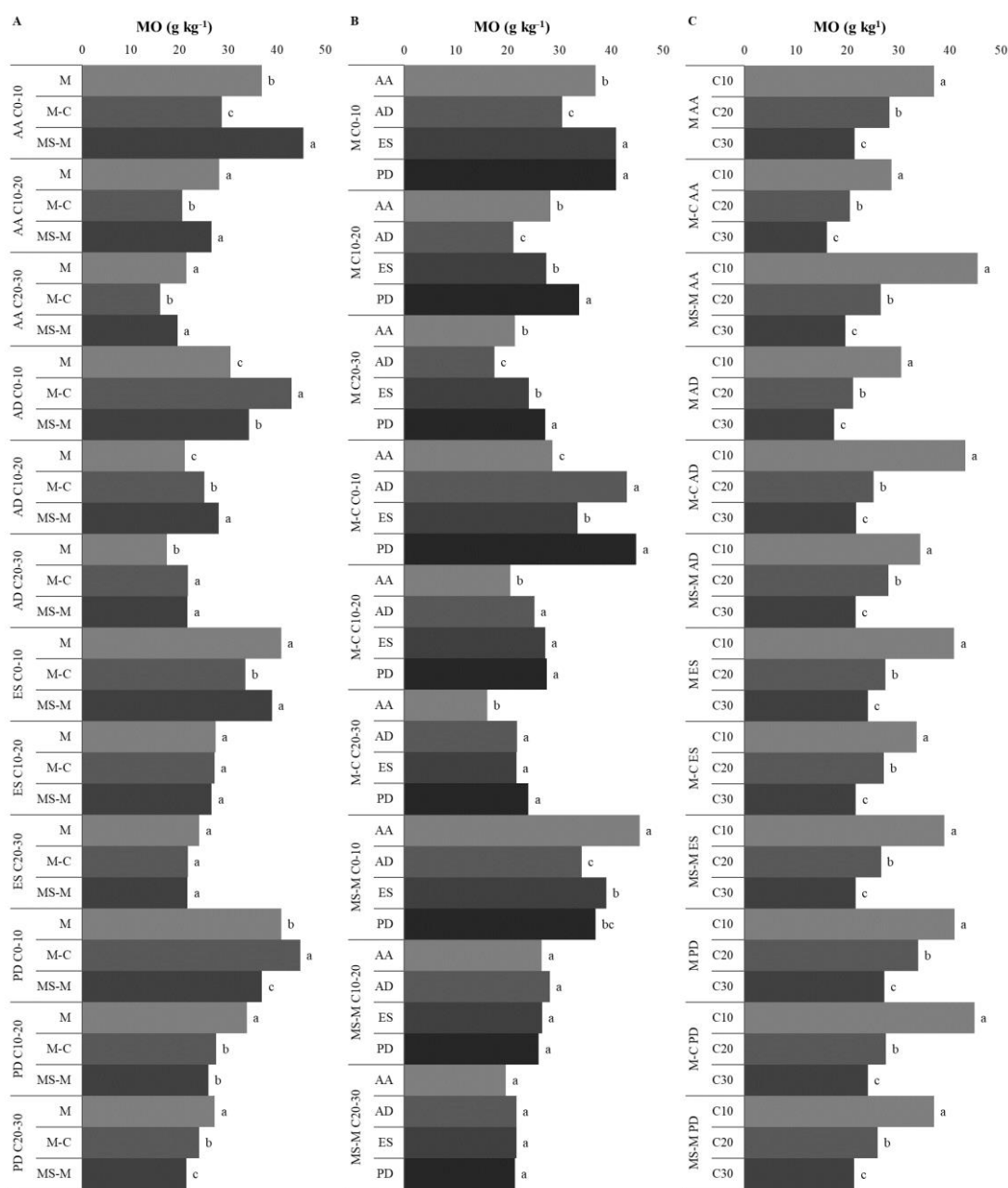


Figura 19. Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para matéria orgânica (MO). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Resultados do teste Tukey ($p \geq 0,05$). Médias seguidas da mesma letra, na vertical, em cada interação, não diferem entre si. Dourados – MS, 2023.

Nos manejos de solo com arado de aivecas, escarificador e PD, o consórcio de milho safrinha-marandu e o consórcio de marandu-crotalária no arado de aivecas, apresentaram maiores valores de matéria orgânica do solo. Esses resultados sugerem que a adoção desses consórcios pode ter contribuído para o aumento da matéria orgânica do solo. Avaliando os impactos dos manejos de solo na matéria orgânica, Castro et al. (2015), observaram que a introdução de uma cultura forrageira no sistema de cultivo na entressafra, contribuiu para aumento dos teores de matéria orgânica e a fração do carbono orgânico do solo.

O consórcio de milho safrinha-marandu é uma combinação de culturas em que o milho safrinha, uma cultura de ciclo curto, e a marandu que é uma espécie forrageira perene com boa produção de resíduos, e estas são semeadas logo após a colheita da soja. Essa combinação de culturas pode fornecer uma maior quantidade de resíduos vegetais ao solo, que contribui para o aumento da matéria orgânica. No caso da presença da crotalária em consórcio com a marandu, como a crotalária é uma leguminosa, e apresenta capacidade de fixar nitrogênio, sendo assim, os resíduos vegetais quando entram em decomposição favorece a formação da matéria orgânica.

O acúmulo de matéria orgânica observadas nas camadas superficiais do solo 0-10 cm, está relacionado ao maior aporte de resíduos das culturas de cobertura. Essa camada superficial recebe uma quantidade significativa de matéria orgânica proveniente da parte aérea, como folhas e caules. No entanto, conforme a profundidade de avaliação foi aumentando, a quantidade de resíduos vegetais diminuiu e atividade biológica também tende a reduzir. Portanto, é esperado que o acúmulo de matéria orgânica diminua à medida que se avança para camadas mais profunda do solo

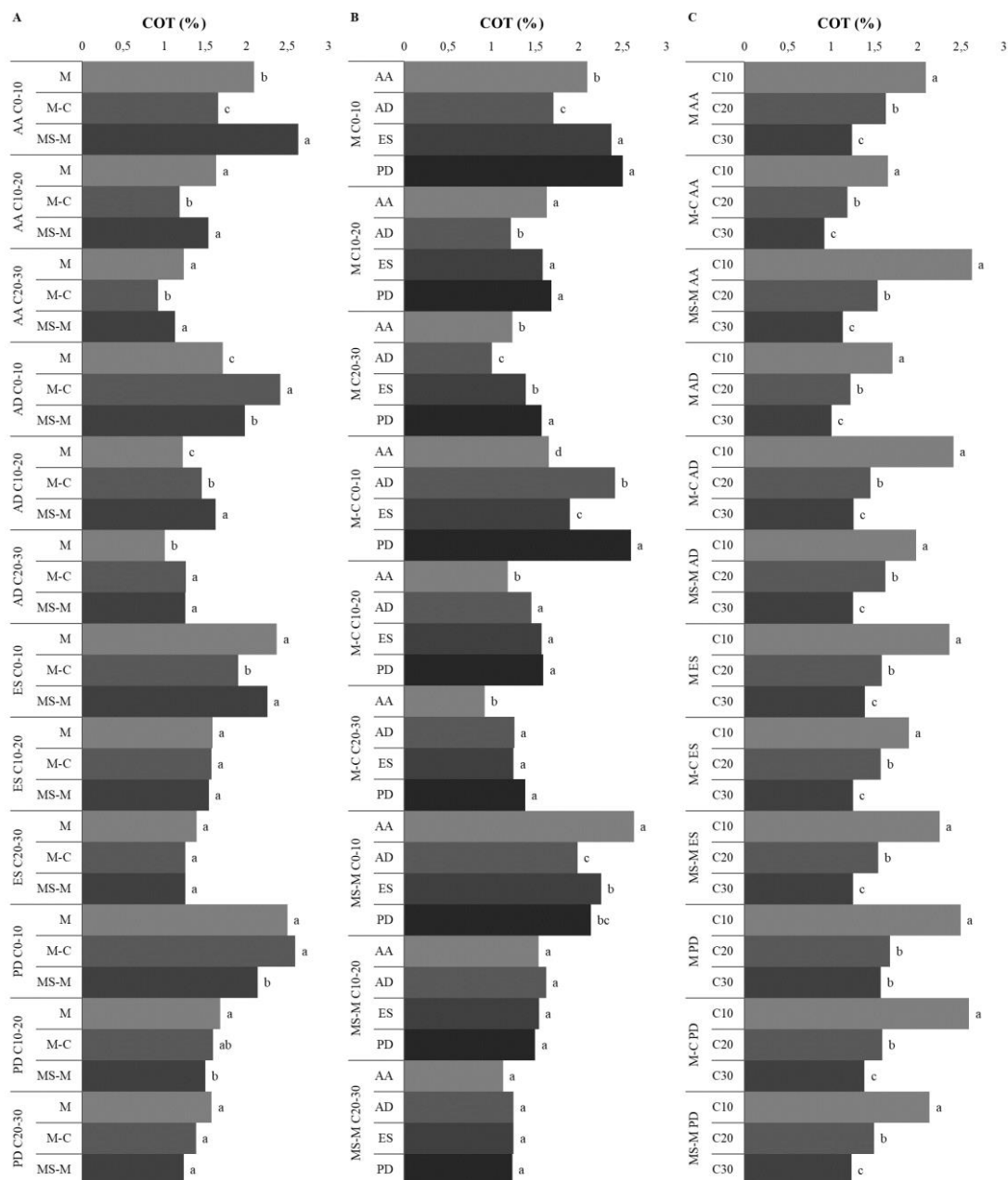


Figura 20. Interação entre os manejos de solo, manejo de culturas e camadas para carbono orgânico total (COT). A – Manejos de cultura nas camadas e manejos de solo, B – Manejos de solo nas camadas e manejo de culturas, e C – Camadas dentro de manejo de culturas e manejos de solo. AA – Arado aivecas, AD – Arado de disco, ES – Escarificador PD – Plantio direto. MS-M – Milho safrinha-marandu, M-C – Marandu-crotalária, M – Marandu. Resultados do teste Tukey ($p \geq 0,05$). Médias seguidas da mesma letra, na vertical, em cada interação, não diferem entre si. Dourados – MS, 2023.

4. CONCLUSÕES

O plantio direto demonstrou ser mais eficaz na manutenção da fertilidade do solo, promovendo maior capacidade de troca de cátions (CTC) nas diferentes profundidades. Os teores de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) foram mais elevados no sistema de plantio direto, contribuindo para uma maior CTC e saturação de bases (V%).

O consórcio milho safrinha-marandu apresentou impactos significativos nas propriedades físicas e químicas do solo, e isso proporcionou condições adequadas para o crescimento das culturas no ano subsequente.

O consórcio milho safrinha-marandu e marandu-crotalária se destacam na manutenção da porosidade e na redução da resistência do solo a penetração, com potencial para minimizar camadas compactadas.

O consórcio marandu-crotalária resultou em maiores teores de matéria orgânica (MO) e carbono orgânico total (COT), indicando a eficiência dessa prática na conservação e aumento desses atributos no solo.

Os consórcios marandu-crotalária e milho-marandu, em plantio direto, contribuem para a melhoria da fertilidade do solo e do sistema de produção.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, R. S.; STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Culturas de cobertura e qualidade física de um Latossolo em Plantio Direto, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 411-418, 2009.

AFSHAR, R. K.; CABOT, P.; IPPOLITO, J. A.; DEKAMIN, M.; REED, B.; DOYLE, H.; FRY, J. Corn productivity and soil characteristic alterations following transition from conventional to conservation tillage, **Soil and Tillage Research**, v. 220, p. 105-351, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105351>.

ALBUQUERQUE, A. W.; SANTOS, J. R.; FILHO, G. M.; REIS, L. S. Plantas de cobertura e adubação nitrogenada na produção de milho em sistema de Plantio Direto, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 7, p. 721-726, 2013.

BARROSO, G. R. P.; CARVALHO, J. O. M.; SANTOS, M. R. A.; RODRIGUES, M. D. G. R. Influência da adubação verde na melhoria dos atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Saber Científico**, v. 1, n. 2, 134-138, 2021.

BERTOLLO, A. M.; LEVIEN, R. Compactação do solo em Sistema de Plantio Direto na palha, **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 25, n. 3, p. 208-218, 2019. <https://orcid.org/0000-0002-4699-0738>

BENGOUGH, A. G.; MCKENZIE, B.; HALLETT, P.; VALENTINE, T. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal Experimental Botany**, v. 62, p. 59-68, 2011. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq350>

BORGHI, E.; CRUSCIOL, C. A. C. Produtividade de milho, espaçamento e modalidade de consorciação com *Brachiaria brizantha* em sistema Plantio Direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, 163-171. 2007.

BORGES, M. C. R. Z.; NOGUEIRA, K. B.; ROQUE, C. G.; BARZOTO, G. R. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade da soja em diferentes sistemas de preparo após o consórcio sorgo-*brachiaria*, **Acta Iguazu**, v. 9, n. 1, p. 1-10, 2020.

BROWN, V.; BARBOSA, F. T.; BERTOL, I.; MAFRA, Á. L.; MUZEKA, L. M. Efeitos no solo e nas culturas após vinte anos de cultivo convencional e semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 13, n. 1, p. 1-7. 2018. <https://doi.org/10.5039/agraria.v13i1a5501>

BROCH, D. L.; RANNO, S. K. **Fertilidade do solo, Adubação e Nutrição da Cultura da Soja**. Tecnologia de Produção: Soja e Milho 2012/2013. v. 2, n. 38. 2012.

CASTRO, G. S.; CRUSCIOL, C. A.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Management impacts on soil organic matter of tropical soils, **Vadose Zone Journal**, v. 14, n. 1, p. 1-8, 2015. <https://doi.org/10.2136/vzj2014.07.0093>

CARDOSO, J. V.; SPERAFICO, L. G. N.; JENSEN, T. V.; SCHIEBELBEIN, L. M.; MOREIRA, M. F. Influência na compactação de solo sobre efeito da ausência ou diferentes coberturas de solo. **Revista Scientia Rural**, v. 1, p. 1-24. 2022.

CARVALHO, C. A.; FERREIRA, R. L. F.; ANDRADE, R. A.; BRITO, R. S.; PEREIRA, T. C. R.; LIMA, T. J. L. Atributos físicos em solos cultivados com plantas de cobertura, **Scientia Naturalis**, v. 2, n. 1, p. 38-41, 2020.

COLOMBI, L. C.; TORRES, A.; WALTER, T.; KELLER, T. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – a vicious circle, **Science of Total Environment**, v. 626, p. 1026-1035, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.129>.

COLOMBI, T.; KELLER, T. Developing strategies to recover crop productivity after soil compaction - A plant eco-physiological perspective, **Soil and Tillage Research**, v. 191, p. 156-161, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.008>.

CHIODEROLI, C. A.; MELLO, L. M. M.; GRIGOLLI, P. J.; FURLANI, C. E. A.; SILVA, J. O. R.; CESARIN, A. L. Atributos físicos do solo e produtividade de soja em sistema de consórcio milho e braquiária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 1, n. 1, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000100005>

CRUSCIOL, C. A.; NASCENTE, A. S.; BORGHI, E.; SORATTO, R. P.; MARTINS, P. O. Improving soil fertility and crop yield in a tropical region with palisade grass cover crops, **Agronomy Journal**, v. 107, n. 6, p. 2271-2280, 2015.

DEPERON JÚNIOR, M. A.; NAGAHAMA, H. D. J.; OLSZEWSKI, N.; CORTEZ, J. W.; SOUZA, E. B. Influência de implementos de preparo e de níveis de compactação sobre atributos físicos do solo e aspectos agronômicos da cultura do milho. **Engenharia Agrícola**, v. 36, p. 367-376. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n2p367-376/2016>

FALLEIRO, R. M.; SOUZA, C. M.; SILVA, C. S. W.; SEDIYAMA, C. S.; SILVA, A. A.; FAGUNDES, J. L. Influência dos sistemas de preparo nas propriedades químicas e físicas do solo, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 1097-1104, 2003.

FIETZ, C. R.; FISCH, G. F. **O clima da região de Dourados – MS**. 2008.

FREITAS, L.; DE OLIVEIRA, I. A.; SILVA, L. S.; FRARE, J. C. V.; FILLA, V. A.; GOMES, R. P. Indicadores da qualidade química e física do solo sob diferentes sistemas de manejo, **Revista Unimar Ciências**, v. 26, n. 1-2, p. 8-25, 2017.

GAO, W.; HODGKINSON, K.; JIN, C. W.; WATTS, R. W.; ASHTON, J.; SHEN, T.; REN, I. C.; DODD, A.; BINLEY, A. L.; PHILLIPS, P.; HEDDEN, M. J.; HAWKESFORD, W. R. W. Deep roots and soil structure, **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 39, p. 1662-1668, 2016.

CECCON, G.; RIBEIRO, L. M.; ALVES, V. B.; VERONEZI, S. D.; MAKINO, P. A. **Consórcio milho-braquiária para cobertura permanente do solo**, 2014. In:

ENCONTRO NACIONAL DE PLANTIO DIRETO NA PALHA, 14, 2014, Goiânia. Sistema plantio direto: plantando água e alimentando o mundo. Bonito: Federação Brasileira de Plantio Direto e Irrigação, 2014. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/110221/1/Plantio-direto-consorcio-27.pdf>

CECCON, G.; SILVA, J. F.; MAKINO, P. A.; NETO, A. L. N. Consórcio milho-braquiária com densidades populacionais da forrageira no centro-sul do Brasil. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 17, n. 1, p. 157-167. 2018. <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v17n1p157-167>

JESUS DINIZ, A. P. M.; COSTA ARAGÃO, M.; EL-HUSNY, J. C.; PEREIRA, G. M.; HUNGRIA, L. C.; SILVA, B. S. N. Atributos químicos do solo sob sistema Plantio Direto como indicador de sustentabilidade ambiental. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 3130-3152. 2021.

JENSEN, J. L.; SCHJØNNING, P.; WATTS, C. W.; CHRISTENSEN, B. T.; MUNKHOLM, L. J. Short-term changes in soil pore size distribution: impact of land use: Impact of land use, **Soil and Tillage Research**, v. 199, p. 104597, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2020.104597>.

KAPPES, C.; ZANCANARO, L. Sistemas de consórcios de braquiária e de crotalárias com a cultura do milho, **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 14, n. 2, p. 219-234, 2015. <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v14n2p219-234>.

KRELING, B. E.; TONET, C.; CASSEL, J. L.; GYSI, T.; HENN, J. R.; DIERINGS, T. A.; CAMPOS, B. H. C.; CRUZ, S. M.; PIMENTA, B. D.; DOS SANTOS, D. B. Avaliação da atividade enzimática como uma promissora ferramenta indicadora da qualidade do solo, **Editora Científica Digital**, v. 1, n. 1, p. 527-541, 2022.

LIMA, L. B.; PETTER, F. A.; LEANDRO, W. M. Desempenho de plantas de cobertura sob níveis de compactação em Latossolo Vermelho de Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 1064-1071, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n11p1064-1071>

LENTH, R.; SINGMANN, H.; LOVE, J.; BUERKNER, P.; HERVE, M. emmeans: Estimated marginal means, aka Least-Squares Means. **R package version**, v. 1, n. 0, 2018.

LORENZETTI, J. G.; RODRIGUES, M. A.; PAIVA SOARES, A.; VIEIRA, C. R. Densidade de plantas e os efeitos nas características agronômicas, temperatura e umidade do solo em consórcio milho-braquiária. **Nativa**, v. 11, n. 1, p. 101-107. 2023. <https://doi.org/10.31413/nativa.v11i1.14024>

LOPES, S. J.; LÚCIO, A. D. C.; STORCK, L.; DAMO, H. P.; BRUM, B.; SANTOS, V. J. D. Relações de causa e efeito em espigas de milho relacionadas aos tipos de híbridos. **Ciência Rural**, v. 37, p. 1536-1542. 2007.

MACHADO, T. A.; MENDES, Í. N. M.; MORAES, E. R.; SOUSA, E. D. T. S. Modification of soil physical attributes as a function of subsoiling operations under

different managements. **Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental**, v. 27, n. 4, 293-299. 2023. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n4p293-299>

MELLO FRASCA, L. L.; SILVA, M. A.; REZENDE, C. C.; FARIA, D. R.; LANNA, A. C.; BRITO FERREIRA, E. P.; NASCENTE, A. S. Utilização de plantas de cobertura como alternativa de manejo sustentável. **Revista Científica Multidisciplinar**, v. 2, n. 7, p. 27571-27571, 2021. <https://doi.org/10.47820/recima21.v2i7.571>

MECHI, I. A.; SANTOS, A. L. S.; MAKINO, P. A.; FACHINELLI, R.; CECCON, G. **Produtividade do milho safrinha após anos de consórcio com *Brachiaria ruziziensis***, In: Seminário Nacional do Milho Safrinha, 13, 2015. Maringá, 30 anos de inovação em produtividade e qualidade, Maringá: ABMS, 2015.

MECHI, I. A.; DOS SANTOS, A. L. F.; FACHINELLI, R.; LEITE, E. M.; NARDI, J. W.; CECCON, G. **Efeito de anos de consórcio milho safrinha com braquiária sobre a produtividade da soja em sucessão**, In: XXXI Congresso Nacional de Milho e Sorgo: inovações mercados e segurança alimentar, 2016, Bento Gonçalves, **Anais...** Bento Gonçalves: CNMS, 2016.

MIRANDA, R. A. S. **Atributos químicos de um latossolo e produtividade de soja e milho em sistema de consórcio milho e *Brachiaria brizantha* cv. marandu em função de fontes de nitrogênio**. 2015. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2015.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; MASTROBERTI, A. A.; LEVIE, R.; LEITNER, D.; SCHNEPF, A. Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil, **Soil Tillage Research**, v. 200, p. 104611, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104611>

MOTTIN, M. C.; SEIDEL, E. P.; RIBEIRO, L. L. O.; PAN, R.; FEY, E.; ROSSET, J. S. Efeito do cultivo de milho consorciado com plantas de cobertura na produção de massa seca e nas propriedades físicas do solo. **Conjecturas**, v. 22, n. 9, p. 70-91. 2022. <https://doi.org/10.53660/CONJ-1422-AG13>

NASCENTE A. S.; CRUSCIOL, C. A. C.; COBUCCI T. The no-tillage system and cover crops - Alternatives to increase upland rice yield, **European Journal of Agronomy**, v. 45, p. 124-131, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.09.004>

NASCENTE, A. S.; LACERDA, M. C.; LANNA, A. C.; DE FILIPPI, M. C. C.; SILVA, D. M. Cover crops can affect soil attributes and yield of upland rice, **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n. 2, p. 176-184, 2016.

NASCENTE, A. S.; STONE, L. F. Cover crops as affecting soil chemical and physical properties and development of upland rice and soybean cultivated in rotation, **Rice Science**, v. 25, n. 6, p. 340-349, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsci.2018.10.004>.

PACHECO, L. P.; LEANDRO, W. M.; MACHADO, P. O. A.; ASSIS, R. L.; COBUCCI, T.; MADARI, B. E.; PETTER, F. A. Produção de fitomassa e acúmulo e liberação de nutrientes por plantas de cobertura na safrinha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 1, p. 17-25, 2011.

PACHECO, L. P.; MONTEIRO, M. M. S.; SILVA, R. F.; SOARES, L. S.; FONSECA, W. L.; NÓBREGA, J. C. A.; PETTER, F. A.; ALCÂNTARA NETO, F.; OSAJIMA, J. A. Produção de fitomassa e acúmulo de nutrientes por plantas de cobertura no cerrado piauiense, **Bragantia**, v. 72, n. 3, p. 237-246, 2013, <http://dx.doi.org/10.1590/brag.2013.041>.

PELUCO, R. C.; JOSÉ, M. J.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T. Mapeamento do fósforo adsorvido por meio da cor e da suscetibilidade magnética do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 3, p. 259-266, 2015. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000300010>

PEREIRA, A. P.; SCHOFFEL, A.; KOEFENDER, A.; CAMERA, J. N.; GOLLE, D. P.; HORN, R. C. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura de verão. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 40, n. 4, p. 799-807, 2017. <http://dx.doi.org/10.19084/RCA17065>

POMPEU, R.; SOUZA, H. A.; FARIAS, J. D. S.; BEZERRA, J.; FERNANDES, F.; PEREIRA, P.; RIELLA, J. Produção de biomassa, composição química e atributos químicos do solo do consórcio milho-leguminosas forrageiras na comunidade Boqueirão, Sobral – CE, **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento - Embrapa**, v. 12, n. 1, p. 1-21 2019.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v. 102, p. 242-254, 2009.

RIBEIRO, L. M.; CECCON, G.; MECCHI, I. A.; SANTOS, A. L. F.; MAKINO, P. A.; FACHINELLI, R. Produtividade da soja em sucessão a cultivos de outono-inverno, **Agrarian**, v. 11, n. 40, p. 120-131, 2018. <https://doi.org/10.30612/agrarian,v11i40,5379>

RIVERO HERRADA, M.; MOZENA LEANDRO, W.; FERREIRA, E. P. D. B. Leguminosas isoladas e consorciadas com milho em diferentes sistemas de manejo do solo no feijão orgânico, **Terra Latinoamericana**, v. 35, n. 4, p. 293-299, 2017.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para regiões tropicais**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 8. Campinas: Embrapa Centro Nacional de Pesquisa de Monitoramento por Satélite, 2010. 26p.

ROSABONI, V. M.; YANO, É. H.; TRINDADE, V. D. R.; SILVA, A. L. M.; SARAIVA, S. H. R. **Sistemas de manejo do solo contínuo para Plantio Direto de soja “Safrinha”**. XLVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA 2018.

R CORE TEAM. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: **R Foundation for Statistical Computing**. 2022. <https://www.R-project.org/>.

SALES, R. P.; PORTUGAL, A. F.; MOREIRA, J. A. A.; KONDO, M. K.; PEGORARO, R. F. Qualidade física de um Latossolo sob Plantio Direto e preparo convencional no semiárido. **Revista Ciência Agronômicas**, v. 47 n. 3, 429-438. 2016.

SALTON, J. C.; MERCANTE, F. M.; TOMAZI, M.; ZANATTA, J. A.; CONCENÇO, G.; SILVA, W. M.; RETORE, M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system, **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 70-79, 2014.

SARTOR, L. R.; ROMÃO, J.; SILVA, V. P.; CASSOL, L. C.; BRUN, E. J. Resistência mecânica do solo à penetração em sistema silvipastoril após onze anos de implantação. **Ciência Florestal**, v. 30, p. 231-241, 2020.

SANTANA, J.; LIMA, E.; KOMATSU, R.; SILVA, W.; RIBEIRO, M. I. Caracterização física e química de solo em sistemas de manejo Plantio Direto e convencional, **Enciclopédia Biosfera**, v. 15, n. 27, 2018. https://doi.org/10.18677/EnciBio_2018A26

SANTOS, A. L. F.; MECCHI, I. A.; RIBEIRO, L. M.; FACHINELLI, R.; LEITE, E. M.; CECCON, G. (2016). **Produtividade do milho safrinha em função de anos consecutivos de consórcio milho-braquiária**. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 31., 2016, Bento Gonçalves. Milho e sorgo: inovações, mercados e segurança alimentar: anais. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2016. 4 p.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. Á.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, 5 ed.**, Rio de Janeiro: Embrapa, 2018, 187 p.

SEIDEL, E. P.; GERHARDT, I. F. S.; CASTAGNARA, D. D.; NERES, M. A. Efeito da época e sistema de semeadura da *Brachiaria brizantha* em consórcio com o milho, sobre os componentes de produção e propriedades físicas do solo, **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 35, p. 55-66, 2014. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2014v35n1p55>

SILVA, F. C. S. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**, v. 627, Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.

SILVA, J. T.; SOUSA, R. O.; SCIVITTARO, W. B.; BUSS, G. L.; SILVA, J. B. **Emissões de metano no período de cultivo do arroz irrigado sob diferentes sistemas de preparo do solo**. In: X Reunião Sul-Brasileira de Ciência do Solo Fatos e Mitos em Ciência do Solo. Pelotas: p. 01-3. 2014.

SILVA, M. P.; ARF, O.; SÁ, M. E.; ABRANTES, F. L.; BERTI, C. L. F.; SOUZA, L. C. D. Plantas de cobertura e qualidade química e física de Latossolo Vermelho distrófico sob Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 12, n. 1, 60-67. 2017. <https://doi.org/10.5039/agraria.v12i1a5424>

SILVA, A. G.; ASSIS, R. L.; OLIVEIRA, C. A. A.; FERREIRA, C. J. B.; TEIXEIRA, I. R.; ALMEIDA, K. D. L.; CARMO, E. L. Variabilidade dos atributos físicos do solo e dinâmica da palhada em sistema integração lavoura-pecuária no cerrado. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 18, n. 3, p. 429-440, 2019. <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v18n3p429-440>

SILVA, T. S. **Organização da estrutura do solo em função de sistemas de preparo e de culturas**. 2020. 114 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul Faculdade de Agronomia, Porto Alegre, 2020.

SILVA, Y. K. L.; PARAGUASSU, M. E.; OLIVEIRA, T. F.; MELO, M. C.; CARVALHO FILHO, A.; GOD GOOD, P. I. Sistemas de preparo do solo e seus efeitos no desenvolvimento da cultura da soja. **Investigación Agraria**, v. 23 n. 2, p. 94-100. 2021. <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2021.diciembre.2302672>

SILVA, J. M.; ALMEIDA, C. X.; PENA, L. K.; JORGE, R. F.; DA SILVA, L. R.; DUARTE, I. R. G. Estimativa da macroporosidade e microporosidade em função de sistemas de manejo e plantas de cobertura em Latossolo Vermelho cultivado com soja, **Research, Society and Development**, v. 11, n. 3, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i3.26833>

SILVA, E. F. R. **Indicadores físicos do solo em cultivos de soja sobre palhada do consórcio milho e *Brachiaria brizantha* cv. Marandu no cerrado maranhense**, 2022. 35f. Trabalho de conclusão de curso, Agronomia, Universidade Federal do Maranhão, Chapadinha, MA. 2022.

SILVA, M. M. V. **Impacto da braquiária na qualidade de solo e na produtividade de milho safrinha e de soja**. 2022. 48 f. Dissertação (Mestrado), Fitotecnia, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" / USP, Piracicaba, SP, 2022.

SILVEIRA, P.; ZIMMERMANN, F. J. P.; SILVA, S. C. D.; CUNHA, A. A. D. Amostragem e variabilidade espacial de características químicas de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de preparo, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 10, p. 2057-2064, 2000. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000001000018>

SHINKAI, A. L. F.; YANO, É. H.; ROSABONI, V. M.; CASAGRANDE, R.; MARQUES, F. L. C.; RIBEIRO, J. A. Características produtivas da soja sobre sistemas integrados de produção do consórcio de gramíneas e leguminosas em modo de colheita do milho. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 6, p. 37700-37705. 2020.

STASINOPOULOS, M. D.; ROBERT A. R.; GILLIAN Z. H.; VLASIOS V.; FERNANDA B. 2017. **Flexible Regression and Smoothing: Using GAMLSS in r**. CRC Press.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. 6 ed. Porto Alegre: Artemed, 2017. 888p.

TANAKA, K. S.; CRUSCIOL, C. A.; SORATTO, R. P.; MOMESSO, L.; COSTA, C. H.; FRANZLUEBBERS, A. J.; JUNIOR, A. O.; CALONEGO, J. C. Nutrients released by *Urochloa* cover crops prior to soybean, **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 113, n. 1, p. 267-281, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10705-019-09980-5>

TEIXEIRA, R. B. **Influência de diferentes sistemas de preparo e plantas de cobertura nos atributos físico-químicos do solo e na produtividade de grãos da cultura da soja**.

2014. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Chapadão do Sul, 2014.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**, 3 ed. revisão e ampliada, Brasília, DF: Embrapa, 2017, 573 p.

TORRES, J. L. R.; NETTO, A. A.; SOUZA, Z. M.; DE ASSIS, R. L. Alterações causadas nos atributos físicos após preparo do solo com arado escarificador e enxada rotativa. **Magistra**, 27, v. 3, n. 4, p. 306-315. 2015.

VITÓRIA, E. L.; FERNANDES, H. C.; MARTINS TEIXEIRA, M.; CECON, P. R. Produção de matéria seca e índice de área foliar de forrageiras em diferentes manejos do solo. **Revista Engenharia na Agricultura-REVENG**, v. 20, n. 4, p. 311-319. 2012. <https://doi.org/10.13083/reveng.v20i4.311>

VERONESE, M.; FRANCISCO, E. A. B.; ZANCANARO, L.; ROSOLEM, C. A. Plantas de cobertura e calagem na implantação do sistema Plantio Direto. **Pesquisa agropecuária brasileira**, 47, 1158-1165. 2012.

WICKHAM, H. **Ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. Springer-Verlag New York. 2016. <https://ggplot2.tidyverse.org>.

WOLSCHICK, N. H.; BARBOSA, F. T.; BERTOL, I.; DOS SANTOS, K. F.; MUZEKA, L. M. Plantas de cobertura do solo e seus efeitos nas propriedades físicas e produtividade de soja e milho, **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 17, n. 3, p. 272-281, 2018.