

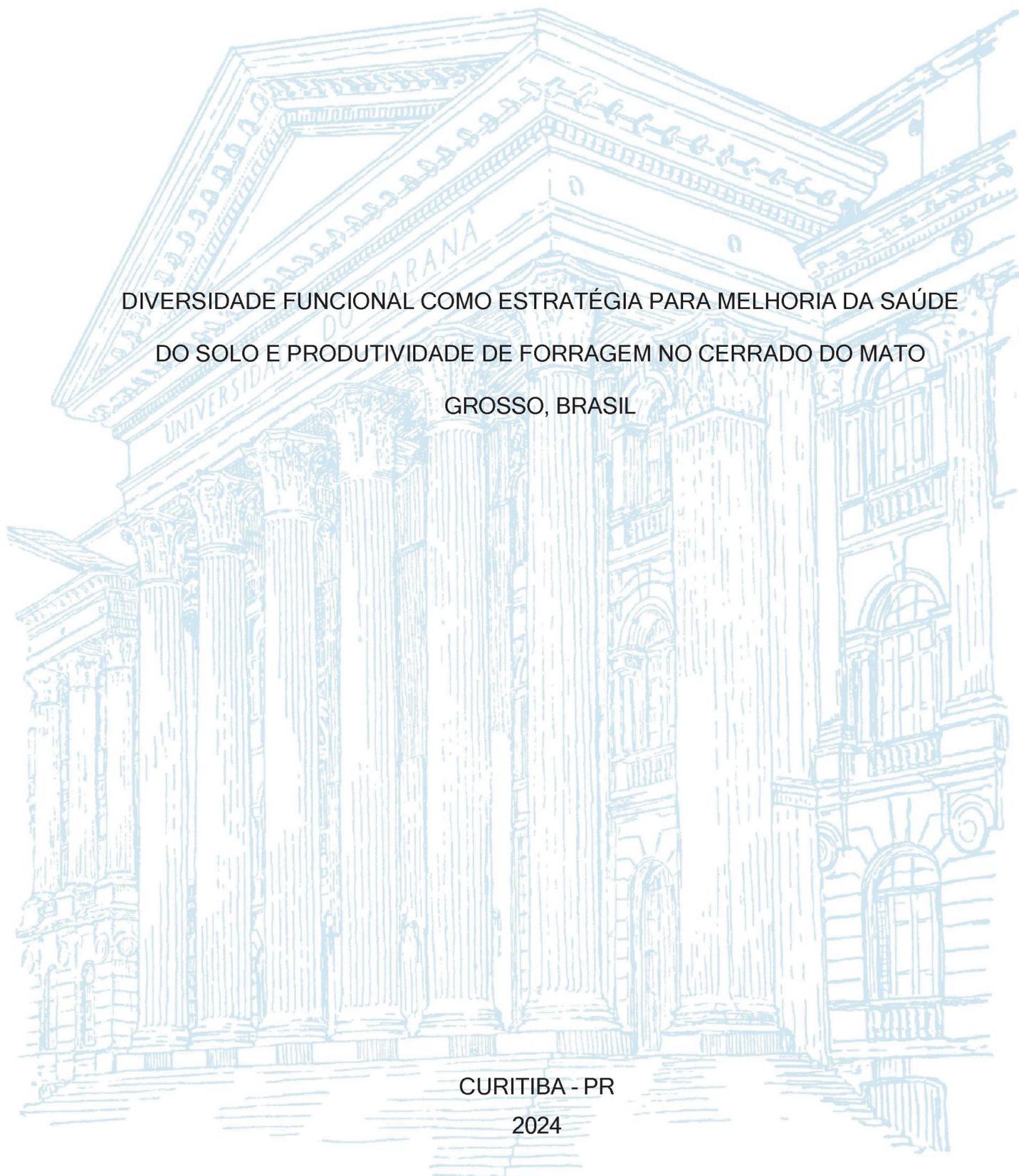
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

TANIKELY OLIVEIRA ALMEIDA

DIVERSIDADE FUNCIONAL COMO ESTRATÉGIA PARA MELHORIA DA SAÚDE
DO SOLO E PRODUTIVIDADE DE FORRAGEM NO CERRADO DO MATO
GROSSO, BRASIL

CURITIBA - PR

2024



TANIKELY OLIVEIRA ALMEIDA

DIVERSIDADE FUNCIONAL COMO ESTRATÉGIA PARA MELHORIA DA SAÚDE
DO SOLO E PRODUTIVIDADE DE FORRAGEM NO CERRADO DO MATO
GROSSO, BRASIL

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Agronomia, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Paulo César de Faccio Carvalho
Coorientadores: Prof. Dr. Edicarlos Damacena de Souza
Prof. Dr. Laércio Santos Silva

CURITIBA - PR

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

Almeida, Tanikely Oliveira

Diversidade funcional como estratégia para melhora da saúde do solo e produtividade de forragem no cerrado do Mato Grosso /
Tanikely Oliveira Almeida. – Curitiba, 2024.

1 recurso online: PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal).

Orientador: Prof. Dr. Paulo César de Faccio Carvalho

Coorientadores: Prof. Dr. Edicarlo Damacena de Souza e Prof. Dr. Laércio Santos Silva

1. Microorganismos do solo. 2. Enzimas. 3. Solos. 4. Solos - Agregação. I. Carvalho, Paulo César de Faccio. II. Souza, Edicarlo Damacena de. III. Silva, Laércio Santos. IV. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal). V. Título.

Bibliotecária: Telma Terezinha Stresser de Assis CRB-9/944



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO AGRONOMIA
(PRODUÇÃO VEGETAL) - 40001018031P8

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL) da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **TANIKELY OLIVEIRA ALMEIDA** intitulada: **DIVERSIDADE FUNCIONAL COMO ESTRATÉGIA PARA MELHORIA DA SAÚDE DO SOLO E PRODUTIVIDADE DE FORRAGEM NO CERRADO DO MATO GROSSO, BRASIL**, sob orientação do Prof. Dr. **PAULO CÉSAR DE FACCIÓ CARVALHO**, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 28 de Maio de 2024.

Assinatura Eletrônica

29/05/2024 10:53:53.0

PAULO CÉSAR DE FACCIÓ CARVALHO

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

29/05/2024 11:38:59.0

DAVI SANTOS TAVARES

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDONÓPOLIS)

Assinatura Eletrônica

29/05/2024 12:41:45.0

JOSE CARLOS BATISTA DUBEUX JUNIOR

Avaliador Externo (UNIVERSITY OF FLORIDA)

Rua dos Funcionários, 1540 - CURITIBA - Paraná - Brasil
CEP 80035-050 - Tel: (41) 3350-5601 - E-mail: pgapv@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 389248

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://siga.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 389248

À minha mãe, Deniuza, e ao meu esposo, Edicarlos, por todo amor!

Dedico

AGRADECIMENTOS

Sou imensamente grata a todas as pessoas que fizeram destes anos de estudos e muitas demandas um fardo mais leve de se carregar!

Agradeço a Deus por ter me fortalecido nos momentos mais difíceis e por me capacitar em todas as minhas incapacidades, pois achei que não iria conseguir. O Senhor é fiel em todo tempo!!! E por todas as bênçãos que me proporcionou até aqui!

Meus orientadores, Paulo César de Faccio Carvalho e Edicarlos Damacena de Souza, por serem acessíveis e me encorajar a viver um novo nível! Se um dia eu me tornar a metade do que vocês são eu já serei muito realizada. Obrigada por todo o carinho, por todas as conversas e esclarecimentos! Pelas oportunidades a mim confiadas. Eu aprendi muito, mesmo em momentos que me sentia desconfortável (falar em público) e despreparada. Minha eterna gratidão a vocês.

Ao meu esposo: Vida, olha só!!! a menina batendo asas... quem diria, não é mesmo? Se não fosse por você eu não conseguiria ter chegado nem na metade do caminho dessa jornada acadêmica tão árdua e cheia de desafios. Você é minha inspiração. Reconheço todo seu esforço e dedicação em me conduzir a um futuro jamais imaginado. Obrigada por tudo que fez por mim. Te Amo e agradeço a Deus por ter me confiado você!!

À minha Mãe. Depois de tantas lutas, hein dona Dê... Olha onde estamos... o Senhor te honrando novamente e essa conquista é sua também! A senhora é a mulher mais incrível que já conheci em toda minha vida. Dona de uma alegria contagiante. Tenho orgulho de ser sua filha. Te amo infinito!

À minha irmã: Gabi, obrigada por ter me dado o João Gabriel, que foi um renovo no meio de tantos desafios! Saiba que só cheguei até aqui por todo o apoio e incentivo de vocês! Obrigada por me encorajarem sempre, amo muito vocês.

Ao meu pai, Dionizio, que do jeito dele também está na torcida. Hoje completo 35 anos e ganhei meu primeiro presente dele, uma orquídea linda e ao mesmo tempo exótica. Segundo ele era diferente das iguais, bem como ele me vê!!!

Ao meu sogro, José Carlos, que sempre teve orgulho dos nossos feitos e incentivava todos os nossos projetos. Mesmo não assinando o próprio nome, por não ter a oportunidade de concluir seus estudos! Como ele diz: "vai fundo Tãini! Você é capaz, não para não!" Grata por todos os conselhos!

Agradeço ao Laercio por toda paciência do mundo e por se dedicar e compartilhar todo seu conhecimento, tornando os temas aqui apresentados de fácil entendimento. Muito obrigada, meu amigo!

Leticia, Andressa, Tiago, Bruna, Maria Eloá, Gabriela, Beatriz e a todos os integrantes do GPISI pela convivência nas coletas intermináveis e nos dias de laboratório até tarde. Vocês são acima da média!

Meu carinho aos professores, por todo o conhecimento compartilhado, principalmente ao Leandro, Mauro, Edicarlos, Anibal, Paulo, Rubia, Maria Aparecida e Alfredo. Vocês ampliaram a minha visão e me abriram um leque de possibilidades dentro da área de pesquisa!

Agradeço à UFPR, a UFR, a Agrisus, Aliança SIPA, Instituto Mato-grossense do Algodão e REM-MT por todo suporte durante a condução desse trabalho. Agradecimento especial à Fazenda Guarita, na pessoa do saudoso Joel Strobel (em memória) por ceder a área e nos dar todo o suporte no protocolo. Ao Everthon que contribuiu significativamente para que tudo isso acontecesse. E, a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para que esse momento acontecesse, muito obrigado!

“Não te mandei eu? Sê forte e corajoso; não temas, nem te espantes; porque o Senhor teu Deus é contigo, por onde quer que andares.” (Josué 1:9)

RESUMO

O aumento na diversidade funcional (DF) em sistemas de produção é uma alternativa para obter melhorias na saúde do solo e na produtividade agropecuária. No entanto, há uma escassez de informações que liguem o impacto da DF na estrutura, no componente microbiológico e no armazenamento de carbono (C) do solo, bem como na produtividade de forragem. Objetivou-se avaliar o efeito dos níveis de DF na produção de fitomassa aérea e massa de forragem, bem como a sua relação com os indicadores de saúde do solo de um Latossolo Vermelho distrófico no Cerrado de Mato Grosso, Brasil. Um experimento de campo foi realizado com delineamento em blocos casualizados, entre os anos de 2021 e 2023, este, incluiu cinco tratamentos, correspondentes aos níveis de DF: 1) DF muito baixa- *Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã (solteiro); 2) DF baixa - Piatã consorciado com *Vigna unguiculata* (feijão-caupi); 3) DF media - Piatã consorciado com feijão-caupi e trigo-mourisco (*Fagopyrum esculentum*); 4) DF alta - Piatã consorciado com feijão-caupi, trigo-mourisco e nabo-forrageiro (*Raphanus sativus*); 5) DF muito alta - Piatã consorciado com feijão-caupi, trigo-mourisco, nabo forrageiro e girassol (*Helianthus annuus*). Os níveis de DF em pastagem, em curto prazo, alteraram a massa de raízes das gramíneas sem prejuízos na produtividade das forrageiras. A DF muito alta aumentou significativamente o C da biomassa microbiana (130%), C orgânico total (19%), estabilidade de agregados do solo (60%) e do índice de manejo do C (IMC > 86%) comparado a DF muito baixa, sem clara influência no $C_{oclusos}$ aos agregados e na arilsulfatase. Os atributos de C orgânico total no solo ocorrem, preferencialmente, na forma de matéria orgânica particulada, por ser a fração mais sensível a alterações do manejo do solo. Os atributos C orgânico total, C orgânico p articulado, C da biomassa microbiana, quociente metabólico e quociente microbiano são sensíveis em demonstrar o impacto das DF na saúde do solo no curto prazo. Portanto, a DF mostra-se capaz de induzir melhorias na estrutura do solo, tornando-se saudável e garantindo assim um ambiente agrícola mais funcional, mesmo em curto prazo.

Palavras-chave: microrganismos do solo, índice de manejo carbono, enzimas do solo, agregação do solo.

ABSTRACT

The rise in functional diversity (FD) into production systems is an alternative to obtain improvements in soil health and agricultural productivity. However, there is a lack of information linking the impact of FD on soil structure, microbiological component and carbon (C) storage, also on forage productivity. The objective was to evaluate the effect of FD levels on the production of aerial and root phytomass of forage and its interrelation with quality-indicating attributes of a dystrophic Red Oxisol in the Cerrado of Mato Grosso, Brazil. A field experiment was carried out in a randomized block design with five treatments (FD levels). 1-*Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã (single); 2-Piatã intercropped with *Vigna unguiculata* (cowpea); 3-Piatã intercropped with cowpea and buckwheat (*Fagopyrum esculentum*); 4) Piatã intercropped with cowpea, buckwheat and forage turnip (*Raphanus sativus*); 5) Piatã intercropped with cowpea, buckwheat, forage turnip and sunflower (*Helianthus annuus*). In the short term, levels of FD in pasture altered the grass roots production without harming the forage crops productivity. Very high FD significantly increased microbial biomass carbon (130%), total organic carbon (19%), soil aggregate stability (60%) and carbon management index (CMI = 86%) compared to very low FD, with no clear influence on C aggregates and arylsulfatase. The total organic C attributes occur, ideally, in the form of particulate organic matter, since it is the most sensitive fraction to changes in soil management. The total organic C attributes, particulate organic C, microbial biomass C, metabolic quotient and microbial quotient are sensitive in demonstrating the positive impact of FD on soil quality in the short term. Therefore, FD is able of inducing improvements in the soil structure, making it healthy and thus guaranteeing a functional agricultural environment, even in the short term.

Keywords: soil health, carbon management index, soil enzymes, soil aggregation

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Localização da área experimental na Fazenda Guarita: a) Brasil, b) Estado do Mato Grosso, c) cidade de Rondonópolis. 26
- Figura 2 - Precipitação durante o período experimental de 01/12/21 a 31/12/2023 (dados da fazenda) no Cerrado de Mato Grosso, Brasil. 27
- Figura 3 - Massa seca de forragem de *Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã no primeiro e segundo ano do experimento em Latossolo Vermelho distrófico sob níveis diversidade funcional no Cerrado de Mato Grosso, Brasil 35
- Figura 4 - Raízes de plantas em consorcio sob níveis de diversidade funcional em um Latossolo Vermelho distrófico no Cerrado de Mato Grosso, Brasil. 35
- Figura 5 - Massa seca de raiz (A) e relação parte aérea/raízes (B) no primeiro e segundo ano do experimento em um Latossolo Vermelho distrófico sob níveis de diversidade funcional no Cerrado do Mato Grosso, Brasil 38
- Figura 6 – Carbono orgânico total (A) e carbono orgânico particulado (B), na camada de 0-10 cm, em um Latossolo Vermelho distrófico sob níveis de diversidade funcional no Cerrado do Mato Grosso, Brasil. 40
- Figura 7 - Índice de manejo de carbono do solo (IMC), na camada de 0-10 cm, em um Latossolo Vermelho distrófico sob níveis de diversidade funcional no Cerrado do Mato Grosso, Brasil. 41
- Figura 8 - Carbono da biomassa microbiana (CBM), na camada 0 – 10 cm, de um Latossolo Vermelho distrófico sob níveis de diversidade funcional no Cerrado do Mato Grosso, Brasil. 41
- Figura 9 - Regressão entre diâmetro médio ponderado dos agregados do solo e relação fitomassa/raiz (A), diâmetro médio ponderado dos agregados do solo e volume de raiz (B), diâmetro médio ponderado dos agregados do solo e tamanho de agregados > 2mm (C), tamanho de agregados ($\theta > 2$ mm) e volume de raiz da das forrageiras (D) em um Latossolo Vermelho distrófico sob níveis de diversidade funcional no Cerrado do Mato Grosso, Brasil 43
- Figura 10 - Relações entre as diversidades funcionais e os parâmetros vegetais, atividades enzimáticas e propriedades do solo com base na análise de componentes principais em um Latossolo vermelho distrófico sob pastagem no Cerrado do Mato Grosso, Brasil. 44

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Atributos químicos e granulométricos do solo na camada 0-20 cm do Latossolo Vermelho distrófico antes da instalação do experimento, no município de Rondonópolis, Mato Grosso, Brasil | 28 |
| Tabela 2 - Valores médios de comprimento, diâmetro médio e volume de raízes na fase pastagem sob níveis de diversidade funcional em um Latossolo Vermelho distrófico no Cerrado do Mato Grosso, Brasil..... | 36 |
| Tabela 3 - Distribuição do tamanho dos agregados na fase pastagem em um Latossolo Vermelho distrófico sob níveis de diversidade funcional no Cerrado do Mato Grosso, Brasil..... | 37 |
| Tabela 4 - Distribuição de carbono ocluso em diferentes classes de agregados, na camada de 0-10 cm, em um Latossolo Vermelho distrófico sob níveis de diversidade funcional no Cerrado do Mato Grosso, Brasil..... | 37 |
| Tabela 5 - Atividade microbiológica do solo na fase pastagem sob níveis de diversidade funcional em um Latossolo Vermelho distrófico no Cerrado do Mato Grosso, Brasil..... | 42 |

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

SIPA - Sistema integrado de produção agropecuária

PD - Plantio direto

MOS - Matéria orgânica do solo

CBM - Carbono da biomassa microbiana

NBM - Nitrogênio da biomassa microbiana

RB - Respiração basal

qCO_2 - Quociente metabólico

$qMIC$ - Quociente microbiano

COT - Carbono orgânico total

DF - Diversidade funcional

C - Carbono

N - Nitrogênio

CO_2 - Dióxido de carbono

MOP - Matéria orgânica particulada

DFMB - Diversidade funcional muito baixa

DFB - Diversidade funcional baixa

DFM - Diversidade funcional média

DFA - Diversidade funcional alta

DFMA - Diversidade funcional muito alta

PVC - Pontos de valor cultural

RBS - Respiração basal do solo

COP - Carbono orgânico particulado

IMC - Índice de manejo de carbono

DMP - Diâmetro médio ponderado de agregados

CV - Coeficiente de variação

ACP - Análise de componentes principais

CP1 - Componente principal 1

CP2 - Componente principal 2

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO GERAL | 16 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA | 19 |
| 2.1 DIVERSIDADE FUNCIONAL: CONCEITO E APLICAÇÃO..... | 19 |
| 2.2 INDICADORES DE SAÚDE DO SOLO..... | 20 |
| 2.3 DIVERSIDADE FUNCIONAL EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO | 23 |
| 3.2 MATERIAL E MÉTODOS | 26 |
| 4.3 RESULTADOS | 34 |
| 3.4 DISCUSSÃO | 44 |
| 3.5 CONCLUSÕES | 49 |
| 3.6 REFERÊNCIAS..... | 50 |

1 INTRODUÇÃO GERAL

Os sistemas de produção agropecuários no Brasil são caracterizados por baixa diversidade de espécies cultivadas, em que se predomina monoculturas na primeira e segunda safra (Nogueira et al., 2023), e que tem levado os solos à degradação em seus atributos químicos, físicos e biológicos. No ano agrícola 22/23 a cultura da soja, cultivada na primeira safra, representou cerca 44,2 milhões de hectares no Brasil (IBGE, 2023). Já na segunda safra de 2023, as culturas predominantes foram o milho e o algodão com área estimada de 17,0 e 1,7 milhões de hectares, respectivamente (IBGE, 2023).

Essas culturas são cultivadas solteiras e o sistema de produção atual não tem permitido a rotação de culturas ou cultivos consorciados, por serem altamente especializados. Com isso, a monocultura resulta em severas perdas da diversidade funcional (DF) e diminui a biodiversidade dos agentes reguladores dos serviços ecossistêmicos do solo, principalmente os microrganismos (Teixeira et al., 2021; Tian et al., 2023). Isso motiva a adoção de sistemas agrícolas mais diversificados, especialmente na segunda safra, por ser uma época com grandes riscos de perdas em produtividade das culturas devido a condições climáticas específicas em ambiente tropical, como no Cerrado. Surge a possibilidade da adoção de sistemas integrados de produção agropecuária com uma fase pastagem mais resiliente a essas intempéries e com potencial de ser mais diversa, com a premissa de consorciar diferentes espécies de plantas objetivando tornar o ambiente mais funcional (Franco et al., 2020; Davi et al., 2022).

A DF é um conceito inicialmente utilizado na ecologia e refere-se à variação nos atributos funcionais dos organismos que influenciam o funcionamento do ecossistema. Esta temática aborda como diferentes traços funcionais dos

organismos contribuem para os diversos processos ecológicos como a ciclagem de nutrientes, produtividade primária e decomposição (Tilman, 2001). Na DF os efeitos complementares de nichos ecológicos são aprimorados devido às diferenças nos hábitos e na fitomassa aérea e radicular, gerando sistemas de produção mais dinâmicos acima e abaixo do solo (Yang et al., 2019). Do ponto de vista agrônomo, é possível obter efeitos da DF nos sistemas de produção com o incremento de espécies de diferentes famílias, tanto animal como vegetal, de forma a contribuir com aporte contínuo de resíduos, vegetais e animais, com diferentes qualidades, pela diversificação de parte aérea, raízes e exsudatos (Gould et al., 2016; 2016; Chen et al., 2020), além de promover alterações no funcionamento do solo. Essa contribuição da DF impacta diretamente a saúde do solo, dada a possibilidade de incremento da matéria orgânica com seus efeitos nas esferas físicas, químicas e biológicas do ecossistema solo (Bierza et al., 2023).

A diversificação e quantidade de raízes estimula a produção de exsudatos, os quais melhoram a estrutura física do solo ao unir as partículas minerais e orgânicas, formando agregados maiores e estáveis (Rillig et al., 2015). Outro mecanismo de agregação ocorre pelas interações simbióticas entre raízes, fungos e bactérias, que liberam exsudatos, principalmente exopolissacarídeos (Rillig et al., 2017; Cania et al., 2019). O crescimento favorecido das hifas de fungos micorrízicos ao estruturar o solo, melhoram a absorção de nutrientes pelas plantas e a manutenção do C ocluso nos agregados (Li et al., 2020). Todos esses mecanismos são artifícios biológicos que ajudam na formação de agregados, no armazenamento de C orgânico e na resistência do solo à erosão (Leifheit et al., 2013).

O solo estruturado fornece um habitat ideal para os microrganismos. No entanto, a baixa DF dos sistemas agrícolas modernos leva ao declínio da

diversidade microbiana, marcada pela redução nos processos de mineralização/ciclagem de nutrientes, perda da fertilidade e maior estresse microbiológico (Dalton et al., 2015). Em contrapartida, reduções no quociente metabólico (qCO_2) são alcançadas com o aumento da DF, indicando maior eficiência metabólica no consumo de C pelos microrganismos do solo (Steinauer et al., 2016; Davi et al., 2022; Camargo et al., 2024). O aumento do C da biomassa microbiana (CBM) está associado à estabilidade de agregados, reforçando o papel crucial dos organismos no sequestro de C, visto que até 3% do carbono orgânico total do solo provém do CBM (Dilly et al. 2003). Portanto, as melhorias físicas e microbiológicas construídas pela DF otimizam o reservatório de C no solo, e podem contribuir para menores emissões de CO_2 nas extensivas áreas agrícolas.

Diante das inúmeras contribuições da DF no ambiente agrícola, ainda há questões a serem esclarecidas. Por exemplo, não se sabe até que nível de combinações de espécies de plantas é possível para obter o máximo benefício solo-planta, uma vez que não está claro se o aumento da DF altera o crescimento de raízes e a produtividade de forragem. O objetivo com esse estudo é avaliar o efeito dos níveis da DF na produtividade de fitomassa aérea e massa radicular, bem como sua relação com atributos do solo em um Latossolo Vermelho distrófico no Cerrado de Mato Grosso, Brasil.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 DIVERSIDADE FUNCIONAL: CONCEITO E APLICAÇÃO

A Diversidade Funcional (DF) em ecologia é definida pelas variações nas características funcionais entre organismos em uma comunidade ou ecossistema (Tilman et al., 1997). Ou seja, como as diferentes características das espécies, tal como tamanho, forma e comportamento alimentar, contribuem para os processos ecológicos essenciais como a ciclagem de nutrientes, a produtividade e a estabilidade dos ecossistemas. Diferente da diversidade de espécies, que contabiliza o número de espécies presentes, a DF tem foco nas diversas funções ecológicas que estas espécies desempenham no ambiente (Nunes-Neto e Moreno, 2014).

Estudos sobre DF são fundamentais para a gestão e conservação de ecossistemas. Eles mostram como a redundância funcional — a existência de múltiplas espécies que desempenham funções ecológicas semelhantes — e a diversidade nas respostas ecológicas contribuem para a resiliência dos ecossistemas. Naeem e Wright (2003) enfatizam que ecossistemas com alta DF têm maior capacidade de recuperação frente a perturbações ambientais. Além disso, características funcionais específicas das espécies podem estar correlacionadas com propriedades do ecossistema, sugerindo que a manipulação dessas características pode ser uma estratégia eficaz para influenciar positivamente a funcionalidade do ecossistema (Petchey et al., 2004; McGill et al., 2006; Petchey & Gastón 2006; Villegger et al., 2008).

A DF em sistemas agrícolas pode ser utilizada com o objetivo de incorporar práticas que mimetizam processos naturais (Odum, 1969). Uma maior DF pode potencializar serviços ecossistêmicos essenciais, como polinização e controle biológico de pragas (Hooper et al., 2000; Janzen et al., 2021), além de conduzir a uma maior estabilidade produtiva e à redução na dependência de insumos agrícolas (Dubeux et. al 2007).

A avaliação do impacto da DF em sistemas agrícolas, especialmente em relação à saúde do solo e à produtividade, é crucial para otimizar práticas de manejo sustentáveis (Gurr et al., 2016; Barbieri et al., 2019). A DF influencia diretamente processos do solo, como a decomposição de matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes, por meio da promoção de uma comunidade mais diversificada de

organismos decompositores e fixadores de nitrogênio (Maron et al., 2011; Bardgett e van der Putten, 2014). Este aumento na DF pode melhorar a eficiência no uso de recursos do sistema, diminuir a necessidade de fertilizantes químicos e aprimorar a estrutura do solo, o que por sua vez, aumenta a resiliência das culturas às variações climáticas e às pragas (Tilman, 1999; Ptanik et al., 2008; Marquard et al., 2009). A integração de práticas agrícolas que fomentam a DF, incluindo a rotação de culturas, o uso de consórcios entre plantas e o mínimo revolvimento do solo, pode resultar em melhorias significativas na saúde do solo, na retenção de água e na biodiversidade do solo, contribuindo para a sustentabilidade a longo prazo dos sistemas agrícolas (Mäder et al., 2002; Brussaard et al., 2007).

Para avaliar efetivamente o impacto da DF em sistemas agrícolas, é essencial adotar abordagens integrativas que combinem medições de características funcionais das espécies presentes, a estrutura da comunidade biológica do solo e os processos do solo relacionados à produtividade agrícola e à sustentabilidade ambiental (Luck et al., 2009; Bello et al., 2010; Lavorel et al., 2013). Estudos que avaliam a atividade microbiológica e bioquímica do solo, a matéria orgânica e a agregação são fundamentais para entender como as interações entre diferentes espécies influenciam os processos do solo e, conseqüentemente, a funcionalidade do ecossistema (Cornwell et al., 2008; Kunstler et al., 2016).

A integração da DF nas práticas de manejo agrícola oferece não apenas a melhoraria da saúde do solo e da produtividade das culturas, mas também contribui para a resiliência dos ecossistemas agrícolas diante das mudanças ambientais e desafios futuros. Os avanços na compreensão e medição da DF oferecem uma oportunidade revolucionária para a ecologia e a agricultura, sendo uma área de estudo que certamente moldará o futuro da pesquisa ecológica e agrícola.

2.2 INDICADORES DE SAÚDE DO SOLO

O solo é um recurso essencial para a sustentabilidade dos ecossistemas e a produção agrícola. Avaliar a saúde do solo é crucial para garantir o uso adequado e a conservação desses recursos. Diversos indicadores têm sido propostos para avaliar a saúde do solo, sendo os mais destacados aqueles relacionados à matéria orgânica do solo (MOS), à atividade microbiológica e bioquímica, e a agregação (Doran e Zeiss, 2000). Estes indicadores provaram ser eficazes para monitorar a

saúde do solo e responder a diversas práticas de manejo, incluindo aquelas associadas à DF (Lichtfouse et al., 2009).

Indicadores de saúde do solo são fundamentais para compreender a saúde e a funcionalidade dos ecossistemas terrestres (Ritz et al., 2009). O monitoramento regular desses atributos é crucial para direcionar práticas de manejo sustentável e assegurar a conservação dos recursos do solo (Singer et al., 1996). Eles oferecem uma perspectiva holística da saúde e fertilidade do solo, possibilitando a implementação de práticas que promovam e melhorem a saúde do solo em longo prazo (Doran e Parkin, 1994). No contexto agrícola, a compreensão desses indicadores é vital para a tomada de decisões relacionadas ao manejo do solo (Karlen et al., 1997), especialmente com o surgimento dos conceitos de agricultura sustentável e regenerativa, onde a precisão na interpretação desses indicadores se torna imprescindível (Vezzani e Mielniczuk, 2009).

Recentemente, a relevância da DF para a saúde do solo tem sido amplamente reconhecida na literatura científica e tem implicações diretas na dinâmica e funcionalidade dos solos (Díaz e Cabido, 2001). Solos com alta DF são frequentemente mais resilientes a perturbações (Cadotte et al., 2011), visto que uma gama diversificada de organismos funcionalmente distintos contribui para uma ciclagem de nutrientes mais eficiente, melhorando indicadores como carbono (C) e nitrogênio (N) total, bem como a biomassa microbiana (BM). Essa eficiência resulta da complementaridade entre as funções desempenhadas por diferentes organismos, o que potencializa a capacidade do solo de se recuperar de desequilíbrios (Martinez-Garcia et al., 2018).

A MOS, um componente vital para a saúde e a fertilidade do solo, composta por restos de plantas, animais, microrganismos e substâncias sintetizadas por estes, atua como um reservatório de nutrientes para as plantas, melhora a estrutura do solo e a capacidade de retenção de água, e influencia a diversidade e a atividade dos organismos no solo (Bashir et al., 2021; Hussain et al., 2023). Esta matéria orgânica é um indicador chave da saúde do solo, refletindo sua capacidade de sustentar a vida vegetal e manter o equilíbrio ecológico.

O fracionamento granulométrico da MOS, que separa essa matéria em diferentes frações baseadas no tamanho das partículas (Roscoe e Machado, 2002), é essencial para compreender a sua dinâmica no solo, incluindo decomposição, mineralização e contribuição para a estrutura do solo. Esse processo geralmente

resulta na divisão da MOS em frações como a matéria orgânica particulada (MOP), que está protegida dentro de agregados do solo, e a matéria orgânica associada a minerais.

A análise das diversas frações da MOS revela informações valiosas sobre a QS. Por exemplo, uma alta proporção de MOP pode indicar um solo recentemente enriquecido com matéria orgânica fresca ou em estágio inicial de decomposição (Souza et al., 2010). Cada fração desempenha um papel distinto na saúde do solo; as frações mais lábeis contribuem significativamente para a ciclagem de nutrientes de curto prazo (Witzgall et al., 2021), enquanto as mais estáveis ajudam a formar a estrutura do solo, influenciando sua capacidade de retenção de água e resistência à erosão (Roscoe e Machado, 2002).

No contexto do solo, a interação entre plantas e os microrganismos é importante para o funcionamento do ecossistema. Exsudatos radiculares, que são compostos orgânicos liberados pelas raízes das plantas, variam significativamente entre as espécies (Williams et al., 2022) e influenciam a biomassa microbiana do solo. A DF das comunidades vegetais resulta na liberação de uma gama variada de compostos, que podem favorecer uma ampla diversidade de microrganismos, potencializando assim a resiliência da comunidade microbiana a distúrbios (Williams et al., 2022; Vives-Peris et al., 2020).

O C e o N da biomassa microbiana (BM) são indicadores dinâmicos que refletem tanto a atividade quanto a composição da comunidade microbiana do solo (Laroca et al., 2021). Eles são reconhecidos como indicadores sensíveis às mudanças na QS (Camargo et al., 2024), atuando como reservatórios transitórios de nutrientes e influenciam a dinâmica do C e do N no solo, o que desempenha um papel fundamental na sustentabilidade agrícola (Bertola et al., 2021). Além disso, a BM é crucial para a decomposição da matéria orgânica, a ciclagem de nutrientes e a formação de agregados estáveis (Ling-Mao et al., 2021), com variações nos teores de C e N da BM indicando potenciais alterações nas funções ecológicas e na saúde do solo.

Características físicas ligadas à DF das plantas, como a profundidades e a arquitetura radicular, também impactam diretamente a BM. Plantas com sistemas radiculares distintos podem criar uma variedade de nichos microbianos no perfil do solo, e influenciam a quantidade e a diversidade de microrganismos (Vives-Peris et al., 2020). Essas características podem modificar a aeração do solo, a

disponibilidade de água e nutrientes e até a temperatura do solo, fatores essenciais para a saúde e diversidade microbiana. Além disso, a capacidade de algumas plantas formarem simbioses específicas, como as leguminosas com bactérias fixadoras de nitrogênio, pode amplificar a presença e atividade desses microrganismos simbióticos, beneficiando a BM do solo (Pires et al., 2021). Contudo, em certas situações, uma alta DF pode induzir competição entre microrganismos, reduzindo potencialmente a BM (Kuzakov e Xu, 2013; Moreau et al., 2015).

A atividade enzimática no solo desempenha um papel catalisador em vários processos bioquímicos, essenciais para a decomposição da MOS e a ciclagem de nutrientes (Dlugosz et al., 2022). Enzimas são produzidas por microrganismos, plantas e animais em resposta a necessidades específicas do ambiente (Soong et al., 2020), e suas atividades são indicativas da funcionalidade e resiliência do solo frente a perturbações. Alterações na atividade enzimática refletem mudanças na saúde do solo e na sua capacidade de sustentar a produção vegetal (Bogati et al., 2022). As enzimas, como a beta-glicosidase e a arilsulfatase, são fundamentais na transformação de compostos orgânicos complexos em formas mais simples, disponíveis para as plantas e microrganismos (Blonska et al., 2021; Pires et al., 2022; Ma et al., 2020; Santana et al., 2021). A beta-glicosidase é responsável pela hidrólise de glicosídeos, liberando açúcares simples e desempenhando uma função chave na mineralização e ciclagem do carbono no solo (Pires et al., 2022). Por sua vez, a arilsulfatase atua na liberação de enxofre e compostos orgânicos, fornecendo uma fonte essencial de enxofre para plantas (Camargo et al., 2024).

A relação entre a DF e a atividade enzimática do solo tem sido profundamente investigada, destacando-se pelo seu potencial em elucidar mecanismos ecológicos e biogeoquímicos complexos (Barbosa et al., 2023). A DF influencia diretamente a atividade de enzimas-chave envolvidas na decomposição e ciclagem da MOS (Gonçalves, 2022), potencializando a eficiência e resiliência desses processos, o que resulta em um solo mais saudável e produtivo.

2.3 DIVERSIDADE FUNCIONAL EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO

A crescente compreensão da complexa inter-relação entre a DF e a produtividade agrícola tem moldado o pensamento científico contemporâneo em relação ao manejo sustentável das culturas (Carmona et al., 2020). A DF envolve a variedade de características das plantas e suas respectivas funções nos

ecossistemas, e influencia diretamente a produtividade, a estabilidade e a resiliência das culturas agrícolas. Nesse mesmo contexto, a combinação de diferentes funcionalidades vegetais pode otimizar o uso dos recursos disponíveis, resultando em uma melhor eficiência produtiva. Por outro lado, vale destacar que a eficácia da DF em potencializar a produtividade agrícola pode ser influenciada por diversos fatores, incluindo o tipo de cultura, as práticas de manejo e as condições edafoclimáticas (Maitra et al, 2021). Assim, as estratégias de manejo agrícola devem considerar a especificidade de cada contexto para maximizar os benefícios associados à DF.

Na evolução das práticas agrícolas a importância da diversificação dos sistemas agrícolas como ferramenta para aumentar a produtividade vem sendo reconhecida (citação). A diversificação dos cultivos pode incrementar a estabilidade e resiliência do sistema frente a adversidades bióticas e abióticas (Bijlwan et al., 2024). Sistemas diversificados podem reduzir a incidência de pragas e doenças, e minimizar a necessidade de insumos químicos, potencializando a atividade biológica do solo e contribuindo para a promoção da saúde vegetal (Zhang et al., 2020; Van der Werf e Bianchi, 2022).

A DF tem sido objeto de estudo intensivo, principalmente pela sua relação direta com a sustentabilidade e produtividade desses sistemas. Uma maior diversidade de plantas pode resultar em incrementos na produção vegetal devido ao fornecimento mais equilibrado de nutrientes, além de desempenhar um papel importante no sequestro de carbono, na regulação hídrica, na promoção da biodiversidade (Tilman et al., 1997; Chen et al., 2019; Fahad et al., 2022). Essa DF também pode promover um ambiente desfavorável para patógenos específicos, favorecendo o equilíbrio biológico (Van der Werf e Bianchi, 2022).

A DF pode levar a uma maior eficiência no uso de recursos. Diferentes espécies utilizam recursos de maneiras complementares, o que pode reduzir a competição intraespecífica e aumentar a produtividade total do sistema. Por exemplo, plantas com sistemas radiculares de diferentes profundidades podem explorar água e os nutrientes mais eficientemente, resultando em um uso mais eficaz dos fertilizantes. Os ecossistemas agrícolas com uma ampla gama de traços funcionais tendem a ser mais resilientes a eventos extremos, como secas, inundações e ondas de calor (Van der Werf e Bianchi, 2022).

A DF também promove serviços ecossistêmicos essenciais para a produção agrícola a longo prazo, como a ciclagem de nutrientes, a conservação do solo e a polinização (Petchey e Gastón 2006; Villegger et al., 2008), reduzindo a dependência de insumos químicos e aumentando a saúde do solo. Em pastagens, a DF pode desempenhar um papel crucial na determinação do aumento de produtividade, exibindo maior resiliência a perturbações e potencializando a produção primária de parte aérea, crucial para o suporte à produção animal e à manutenção da biodiversidade (Li e Jiang, 2021).

As raízes desempenham um papel fundamental na manutenção da estrutura do solo (Hartmann e Six, 2023). Maiores sistemas radiculares contribuem para uma maior porosidade e agregação do solo (Bodner et al., 2021), o que melhora a infiltração de água, reduz a erosão e aumenta a retenção de água. Além disso, a decomposição de raízes de diferentes arquiteturas e profundidades pode contribuir para a formação de MOS (Cotrufo e Lavellee, 2022), essencial para a manutenção da fertilidade do solo a longo prazo. Variações nos exsudados radiculares entre diferentes espécies de plantas podem atrair e selecionar comunidades microbianas específicas, afetando a decomposição da MOS, a ciclagem de nutrientes e até mesmo a supressão de patógenos do solo (Williams et al., 2022). A maior concentração de biomassa radicular nas camadas superficiais em sistemas de cultivo com o mínimo revolvimento do solo, reforça a importância de se adotar práticas de manejo que promovam a DF, como a rotação de culturas e o mix de plantas, para garantir a qualidade do solo e a produtividade da lavoura (Davi et al., 2022; Camargo et al., 2023; Nogueira et al., 2024).

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido em uma área experimental pertencente à Fazenda Guarita, localizada no município de Rondonópolis, Mato Grosso, Brasil (latitude 16°33'54" S, longitude 54°41'08" W e altitude de 227 metros; Figura 1a-c). O clima da região, segundo a classificação climática de Köppen, é do tipo Aw, com inverno seco entre maio e setembro e um período chuvoso de outubro a abril (Alvares et al., 2013), apresentando uma temperatura média do ar de 26,1 °C e uma precipitação pluviométrica de 1436 mm (Figura 2). O solo da área experimental está classificado como Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa (505 g kg⁻¹ de areia, 75 g kg⁻¹ de silte e 420 g kg⁻¹ de argila) no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (Santos et al., 2018) correspondendo a classe Oxisol no Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014).

Figura 1 - Localização da área experimental na Fazenda Guarita: a) Brasil, b) Estado do Mato Grosso, c) cidade de Rondonópolis.

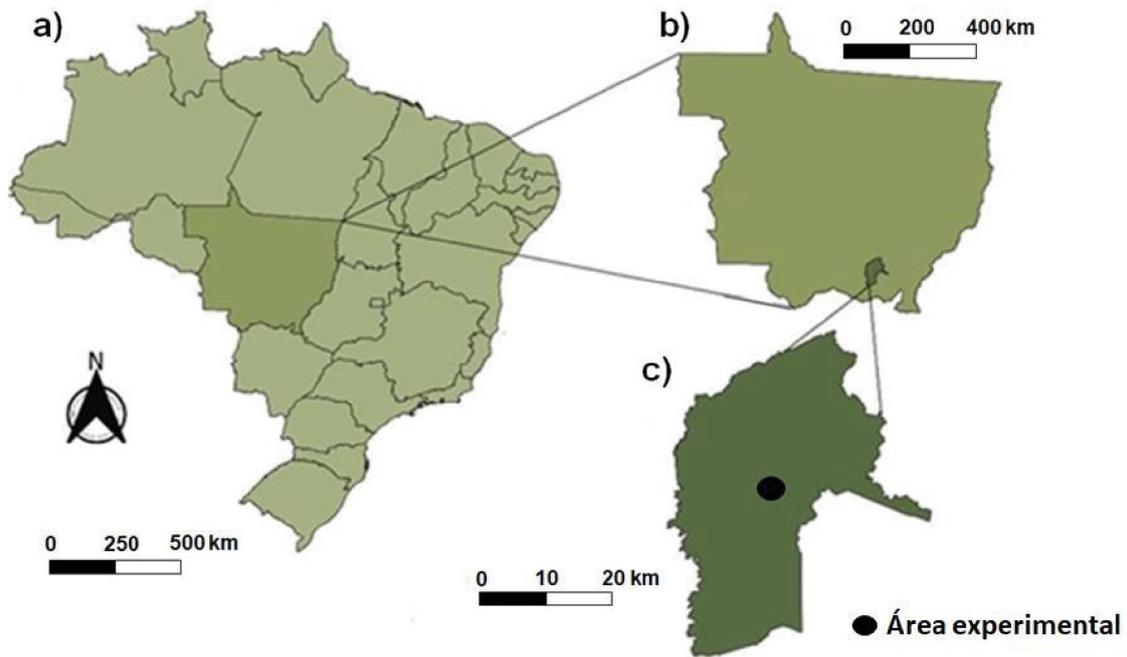
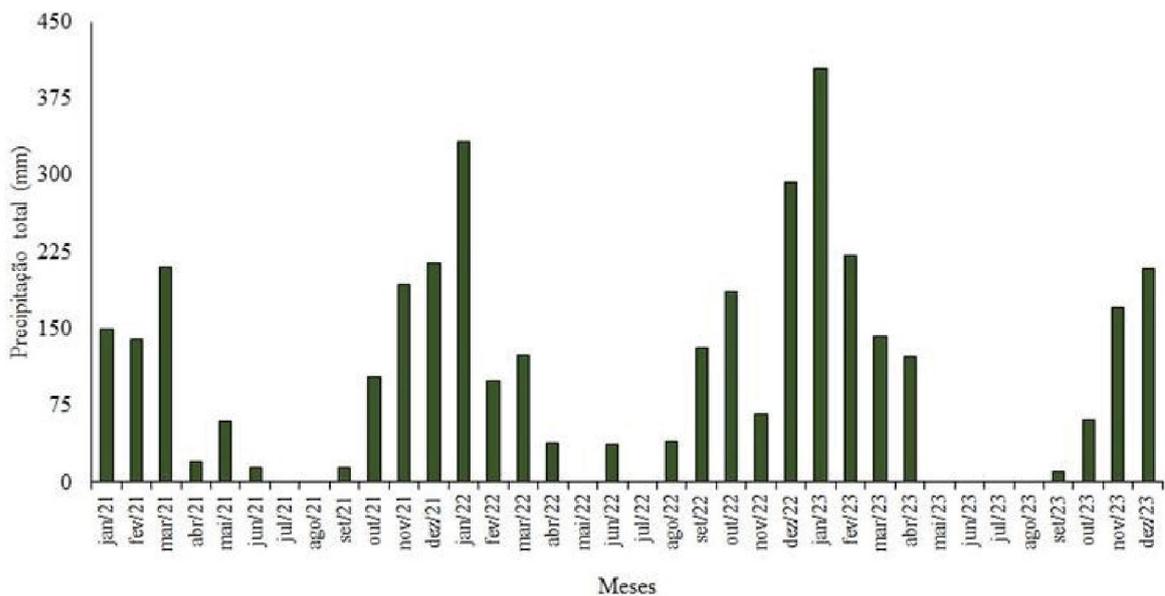


Figura 2 - Precipitação durante o período experimental de 01/12/21 a 31/12/2023 (dados da fazenda) no Cerrado de Mato Grosso, Brasil.



Historicamente, a área estava destinada à pecuária por mais de vinte anos, recebia calagem e adubação de forma esporádica. Em outubro de 2021 previamente a implantação do atual protocolo experimental, realizou-se a amostragem de solo na

camada 0-20 cm para fins de caracterização. Os atributos químicos do solo são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Atributos químicos e granulométricos do solo na camada 0-20 cm do Latossolo Vermelho distrófico antes da instalação do experimento, no município de Rondonópolis, Mato Grosso, Brasil.

| Camada | pH | P | K | Ca | Mg | Al | H+Al | CTC | MOS | V |
|--------|-----|--------------------------|----|---|-----|-----|------|-----|--------------------|------|
| cm | | --mg dm ⁻³ -- | | -----cmol _c dm ⁻³ ----- | | | | | g kg ⁻¹ | % |
| 0-20 | 5,4 | 13,7 | 59 | 1,6 | 1,0 | 0,2 | 3,6 | 6,4 | 29,8 | 43,3 |

CTC: capacidade de troca catiônica a pH 7,0; MOS: matéria orgânica do solo; V: saturação por bases.

3.2. Procedimento e delineamento experimental

O experimento de campo foi constituído por quinze unidades experimentais de 12 m² (3 × 4 m) totalizando 180 m². O primeiro ciclo do experimento teve início em dezembro de 2021, em que foram realizadas duas operações de gradagem, com aradora e niveladora para homogeneizar o solo. O delineamento experimental adotado foi de blocos casualizados, com três repetições. Os tratamentos consistiram em níveis crescentes de diversidade funcional (DF), considerada em função do número de diferentes famílias de plantas cultivadas em consórcio (Anexo 1), especificados como: 1) Diversidade funcional muito baixa (DFMB) - gramínea solteira (*Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã – família *Poaceae*,) com 950 pontos de valor cultural por ha; 2) Diversidade funcional baixa (DFB) - gramínea consorciada com feijão-caupi (*Vigna unguiculata* BRS Tumucumaque - família *Fabaceae*, 8 kg ha⁻¹); 3) Diversidade funcional média (DFM) gramínea consorciada com feijão-caupi e trigo mourisco (*Fagopyrum esculentum* - família *Poligonaceae*, 7 kg ha⁻¹); 4) Diversidade funcional alta (DFA) - gramínea consorciada com feijão-caupi, trigo mourisco e nabo forrageiro (*Raphanus sativus* – família *Cruciferae*, 3 kg ha⁻¹); 5) Diversidade funcional muito alta (DFMA) - gramínea consorciada com feijão-caupi,

trigo mourisco, nabo forrageiro e girassol (*Helianthus annuus* L.- família *Asteraceae*, 4 kg ha⁻¹). A taxa de semeadura estabelecida para a gramínea foi obtida com base em estudos anteriores que abordou o efeito da taxa de semeadura da gramínea em consórcios com as mesmas espécies estudadas (Gussi, 2023). Com isso, foi definido que a taxa de semeadura da gramínea em consórcios múltiplos deve ser aumentada para, no mínimo, 850 PVC ha⁻¹.

A semeadura da gramínea e das demais espécies foram realizadas manualmente devido tamanho das parcelas (podendo ser usado facilmente em larga escala, semeado a lanço) com 20 linhas por parcela e espaçamento de 20 cm entre linhas (Anexo 2). O cálculo utilizado para definir as taxas de semeadura foi baseado no número de plantas por metro quadrado, peso de mil sementes, germinação e pureza das espécies, conforme as especificações do fornecedor. Durante a condução do experimento, não foi realizada nenhuma adubação nas parcelas. Contudo, houve controle de insetos, principalmente cupins, utilizando-se inseticida à base de fipronil quando necessário, com a dosagem recomendada pelo fabricante.

As culturas permaneceram combinadas com a gramínea até completar seu ciclo. Após esse período, a gramínea permaneceu solteira durante 2022, e em janeiro de 2023 foi realizada a semeadura das culturas de consorcio novamente, configurando assim o segundo ano do experimento.

3.3. Estimativa da Produtividade da Forragem

As alturas dos tratamentos foram monitoradas semanalmente usando um bastão graduado em centímetros (“sward stick”) (Barthram; e Alcock, 1985), com dez pontos medidos por unidade experimental. O critério para o corte da forragem foi estabelecido pela altura média de 50 cm da gramínea, com variação de 5 cm (45 a

55 cm). Foram realizados cortes de forragem nos meses de janeiro, fevereiro e maio de 2022 e em fevereiro, março e maio de 2023.

Para estimar a massa de forragem foram alocados em dois pontos por unidade experimental molduras metálicas com dimensão de 0,5 × 0,5 m (0,25 m²). Dentro dessas molduras foi colhida toda a forragem acima de 24 cm de altura e o último corte foi realizado rente ao solo. A produtividade da forragem foi calculada somado a massa obtida em cada corte. Após os cortes, todas as unidades experimentais foram roçadas a 25 cm de altura, mantendo o resíduo na parcela. As amostras para quantificação da massa seca da forragem foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 55°C, até peso constante. Posteriormente, foram pesadas para obtenção do peso seco e convertido em produtividade de forragem por hectare.

3.4. Amostragem do Solo

Para análise dos atributos de solo as amostras foram coletadas em maio de 2023 (coincidiu com a primeira coleta de forragem), na camada 0-10 cm, na linha de semeadura, com quatro pontos por parcela. Parte das amostras foram secas ao ar, peneiradas (< 2 mm) e armazenadas até a realização das análises. As amostras de solo destinadas às determinações dos atributos microbiológicos e bioquímicos foram acondicionadas em sacos de plástico e armazenadas sob refrigeração (4 °C), com início da análise imediatamente após a coleta.

3.5. Análises laboratoriais

Os teores de carbono da biomassa microbiana (CBM) foram determinados conforme o método de fumigação-extração descrito por Vance et al. (1987). A respiração basal do solo (RBS) foi obtida pelo método da incubação (Jenkinson e

Powlson, 1976), quantificando-se o CO₂ evoluído durante 72 horas de incubação aeróbia após a coleta do solo, capturado com solução de NaOH a 0,05 mol L⁻¹ e titulada com HCl (Alef e Nannipieri, 1995). A partir da relação entre a respiração basal e o carbono da biomassa microbiana obteve-se o quociente metabólico ($q\text{CO}_2$) (Anderson e Domsch, 1993) e o quociente microbiano ($q\text{MIC}$) pela razão entre o CMB e o carbono orgânico total (Sparling e West, 1988). Quanto a análise enzimática do solo, determinou-se a β -glicosidase (Eivazi e Tabatabai, 1988) e a arilsulfatase (Tabatabai e Bremner, 1970).

O fracionamento físico granulométrico da matéria orgânica foi realizado com amostras de terra fina seca ao ar segundo Cambardella e Elliot (1992). E os teores de carbono orgânico total (COT) e particulado (COP), proveniente do fracionamento, foram determinados por combustão via seca em analisador elementar Perkin Elmer, modelo 2400. O cálculo do índice de manejo do carbono (IMC) foi efetuado a partir da proposta original de Blair et al. (1995) com as adaptações de Diekow (2005), que considera o COP como representando a fração lábil do COT e o carbono orgânico associado aos minerais (que é representado pela diferença entre o COT e o COP) como não lábil.

3.6. Estabilidade de agregados

A estabilidade de agregados foi realizada em agosto de 2023, para esta coleta em específico o solo deveria estar úmido para facilitar a retirada da amostra. Como passamos por um período de estiagem usamos garrafas pets de dois litros gotejando a noite anterior para que o ponto de coleta estivesse úmido e assim facilitaria a coleta que usamos amostras de solo da camada 0-10 cm coletadas na linha de semeadura, com dois pontos por parcela. No dia anterior à coleta, os pontos

de coleta foram umedecidos para facilitar a coleta dos agregados. Foram coletados monolitos de solo indeformados nas dimensões 10 cm × 10 cm × 10 cm. As amostras foram envolvidas em filme plástico e acondicionadas em caixas plásticas visando o transporte sem impacto na estrutura do solo. Em seguida as amostras foram fracionadas por pontos de fraqueza, secas ao ar e removidos materiais vegetais e fragmentos indesejáveis.

A distribuição do tamanho dos agregados foi determinada por peneiramento via úmido (Embrapa, 2017), resultando nas classes de agregados (mm): > 4,75; 2,0 – 1,0; 1,0 – 0,5; 0,5 – 0,25; 0,25 – 0,125 e <0,125. As peneiras foram operadas por 15 minutos a 30 rpm em movimento vertical. O peso seco dos solos retidos em cada peneira foi determinado após passar em estufa a 105 °C por 24 h. Em seguida foi determinado o diâmetro médio ponderado dos agregados do solo (DMP), conforme a equação abaixo:

$$DMP = \sum (x_i \cdot y_i)$$

Onde x_i é o tamanho médio das classes de agregados (em mm), e y_i é a proporção de cada classe de tamanho agregado (em grama) em relação à amostra total.

3.7. Avaliação de Raízes

Em fevereiro de 2022 e março de 2023, no momento do primeiro corte de forragem, foram realizadas coletas para avaliação de raízes. O solo foi coletado em quatro pontos por unidade experimental usando uma sonda de 10 cm de diâmetro e 20 cm de profundidade, sendo dois pontos na linha e dois na entrelinha das culturas. Após a coleta, as amostras foram imediatamente armazenadas em sacos plásticos e enviadas para beneficiamento no laboratório (Anexo 3).

As amostras coletadas foram separadas com auxílio de pinça e lupa com aumento de 5x. O solo que ainda se manteve agregado foi rompido manualmente para possibilitar a coleta de raízes. Posteriormente, as raízes foram colocadas em um frasco com 80 ml de solução hidróxido de sódio (NaOH) $1,0 \text{ mol L}^{-1}$, agitadas por duas horas. Em seguida foram lavadas em água corrente usando uma peneira de 1,0 mm. Após a lavagem, as raízes foram armazenadas em recipientes contendo solução alcoólica (30%) até o momento do processamento.

As raízes de cada amostra foram avaliadas quanto ao comprimento total, volume e diâmetro médio. Para tal, utilizou-se o scanner Epson Expression 10000 XL para a obtenção das imagens, programado para resolução de 600 ppi. Neste scanner, as raízes ficaram imersas em água, e o scanner possui um duplo feixe de luz (inferior e superior), favorecendo a melhor qualidade das imagens obtidas. As imagens foram processadas pelo software *Winrhizo Arabidopsis* 2012b (Regent Instruments, Canada Inc.). Por fim, as amostras de raízes foram secas em estufa de circulação forçada de ar a $55 \text{ }^\circ\text{C}$, até peso constante, pesadas e os valores apresentados em massa seca de raízes por hectare (kg ha^{-1}). Com os dados de massa seca de parte aérea e massa seca de raízes foi calculado a relação parte aérea/raízes.

3.8 Análise de dados

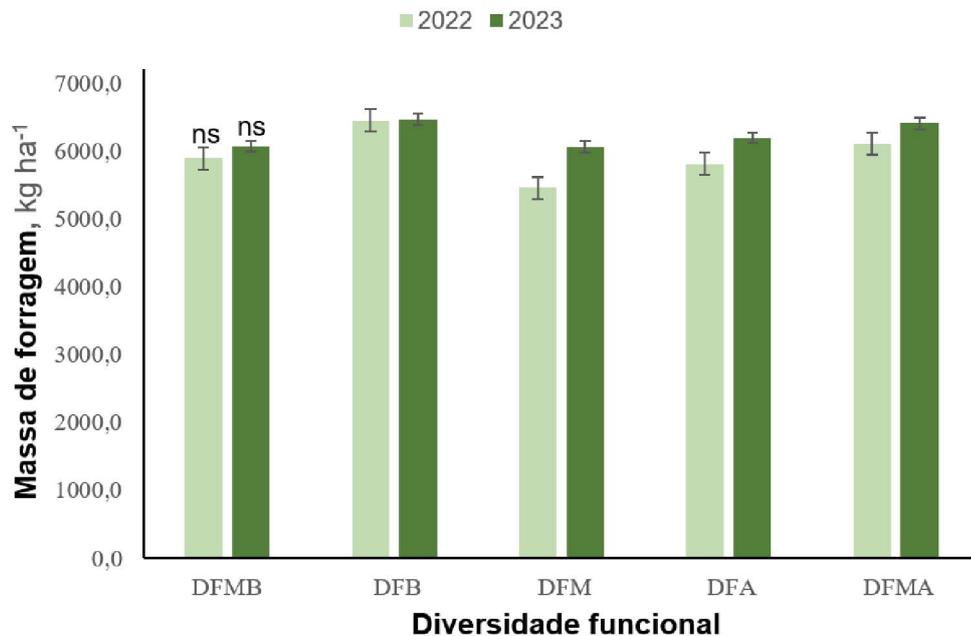
Os resultados foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk) e análise de variância (ANOVA). Quando significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Adotou-se o coeficiente de variação (CV) para classificar as propriedades em baixo ($\text{CV} < 12 \%$), médio (CV de 12 a 24 %) e alto ($\text{CV} > 24 \%$) (Warrick e Nielsen, 1980). Para compreender o efeito da DF no

solo e produtividade das culturas, recorreu-se à análise multivariada de componentes principais (ACP). A execução da ACP demandou inicialmente a padronização dos dados originais para média zero e variância unitária ($\mu = 0$, $\sigma = 1$) (Jeffers, 1978). A escolha do número de componentes principais baseou-se nos autovalores > 1 , que somaram uma variância acumulada $> 50\%$. Todas as análises foram processadas no software Statistica 7 (Statsoft, 2004).

4.3 RESULTADOS

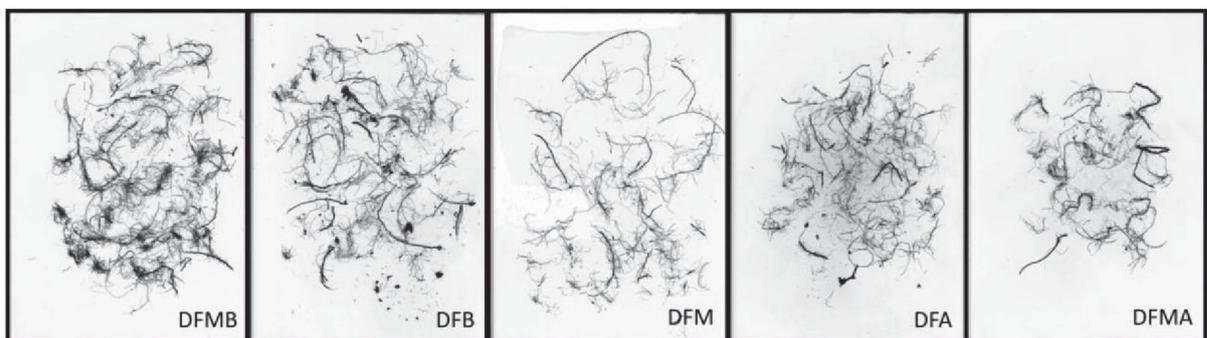
A massa seca total de forragem não foi afetada pela DF no primeiro e segundo ano (safra/2022 e safra/2023), com média de 5941 e de 6239 kg ha⁻¹, respectivamente (Figura 3). O comprimento de raízes na safra 2023 e o diâmetro médio de raízes em ambas as safras foram significativamente alterados pelas DF (Tabela 2 e Figura 4). A DFMB beneficiou o comprimento de raízes no segundo ano, com um aumento de 73% em relação aos demais níveis de DF. A mesma tendência foi observada para o volume de raízes ($\approx 2,3$ a $3,6$ cm³ - 2022; $\approx 1,9$ a $3,9$ cm³ - 2023), onde na DFMB foram identificados os maiores incremento frente às demais DF em ambas as safras.

Figura 3 - Massa seca de forragem de *Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã no primeiro e segundo ano do experimento em Latossolo Vermelho distrófico sob níveis de diversidade funcional no Cerrado de Mato Grosso.



Muito baixa diversidade (DFMB), baixa diversidade (DFB), média diversidade (DFM), alta diversidade (DFA) e muito alta diversidade (DFMA). ns = não significativo.

Figura 4 - Raízes de plantas em consórcio sob níveis de diversidade funcional em um Latossolo Vermelho distrófico no Cerrado de Mato Grosso.



Muito baixa diversidade (DFMB), baixa diversidade (DFB), média diversidade (DFM), alta diversidade (DFA) e muito alta diversidade (DFMA).

Tabela 2 - Comprimento, diâmetro médio e volume de raízes na fase pastagem sob níveis de diversidade funcional, na camada de 20 cm de profundidade em um Latossolo Vermelho distrófico no Cerrado do Mato Grosso.

| Diversidade funcional | Comprimento | | Diâmetro médio | | Volume de raiz | |
|-----------------------|----------------------|---------|--------------------|--------------------|----------------------------|--------|
| | 2022 | 2023 | 2022 | 2023 | 2022 | 2023 |
| | -----cm----- | | -----mm----- | | -----cm ³ ----- | |
| DFMB | 3895,0 ^{ns} | 4400,3a | 0,34 ^{ns} | 0,34 ^{ns} | 3,58a | 3,94a |
| DFB | 3262,7 | 2399,1b | 0,31 | 0,33 | 2,38b | 2,02b |
| DFM | 2936,2 | 2850,0b | 0,31 | 0,34 | 2,60b | 2,70ab |
| DFA | 3034,1 | 2557,9b | 0,31 | 0,31 | 2,31b | 1,93b |
| DFMA | 3021,3 | 2365,4b | 0,30 | 0,33 | 2,60b | 2,46ab |

ns = não significativo. Médias seguidas de mesmas letras nas colunas, não diferem entre si no teste de Tukey a 5% de probabilidade. Muito baixa diversidade (DFMB), baixa diversidade (DFB), média diversidade (DFM), alta diversidade (DFA) e muito alta diversidade (DFMA).

Em média, no primeiro ano, a massa seca de raízes e a relação parte aérea/raízes não foram influenciadas pelos níveis de DF (Figura 5A e B), onde foi registrado média de 1133 kg ha⁻¹ e 5,7, respectivamente. Já no segundo ano (safra 2023), um aumento de 77% (2840 kg ha⁻¹) na DFMB de massa de raízes em relação à DFMA (1605 kg ha⁻¹) foi registrado. Notou-se relação positiva entre fitomassa da forragem e a razão parte aérea/raízes na safra/2022 ($R^2= 0,47$) e safra/2023 ($r= 0,65$), com maior contribuição da DFMA em virtude da maior relação parte aérea/raízes produzida, ≈ 3 vezes, superior à DFMB (Figura 5B).

Os efeitos da DF foram mais acentuados na classe de agregados do solo com $\emptyset > 2,0$ mm (\emptyset = diâmetro; Tabela 3), sendo de 61 e 198% superior na DFMA comparado aos níveis intermediários (DFB, DFM e DFA) e ao menor nível DF (DFMB), respectivamente. A DFMA apresentou menores porcentagens nas demais classes de agregados, exceto para agregados com \emptyset entre 2,0-1,0 e $\emptyset < 0,125$ mm

que não foram influenciados pela DF. O DMP seguiu a mesma tendência da maior classe de agregados com a DFMA ($\emptyset = 1,7$ mm) se destacando em relação à DFMB ($\emptyset = 0,9$ mm). O DMP foi fortemente alterado pela produção de fitomassa aérea, mostrando-se superior ao efeito do sistema radicular (Figura 8 A), sem efeitos aparentes da DF no C ocluso aos agregados (Tabela 4).

Tabela 3 - Distribuição do tamanho dos agregados na fase pastagem (2023), em um Latossolo Vermelho distrófico sob níveis de diversidade funcional no Cerrado do Mato Grosso.

| Diversidad e funcional | Classes de agregados | | | | | | DMP |
|---------------------------|----------------------|--------------------|---------|----------|------------|--------------------|-------|
| | 4,75-2,0 | 2,0-1,0 | 1,0-0,5 | 0,5-0,25 | 0,25-0,125 | <0,125 | |
| | ----- mm----- | | | | | | |
| DFMB | 16,0c | 10,1 ^{ns} | 9,6ab | 15,7ab | 31,6a | 16,7 ^{ns} | 0,9c |
| DFB | 33,9b | 7,0 | 6,3ab | 10,7ab | 27,0ab | 14,8 | 1,3b |
| DFM | 25,8b | 12,1 | 11,4a | 21,0a | 16,9b | 12,4 | 1,2bc |
| DFA | 29,4b | 11,0 | 10,0ab | 12,9ab | 23,8ab | 12,7 | 1,3b |
| DFMA | 47,7a | 6,9 | 4,9b | 7,9b | 24,4ab | 8,2 | 1,7a |

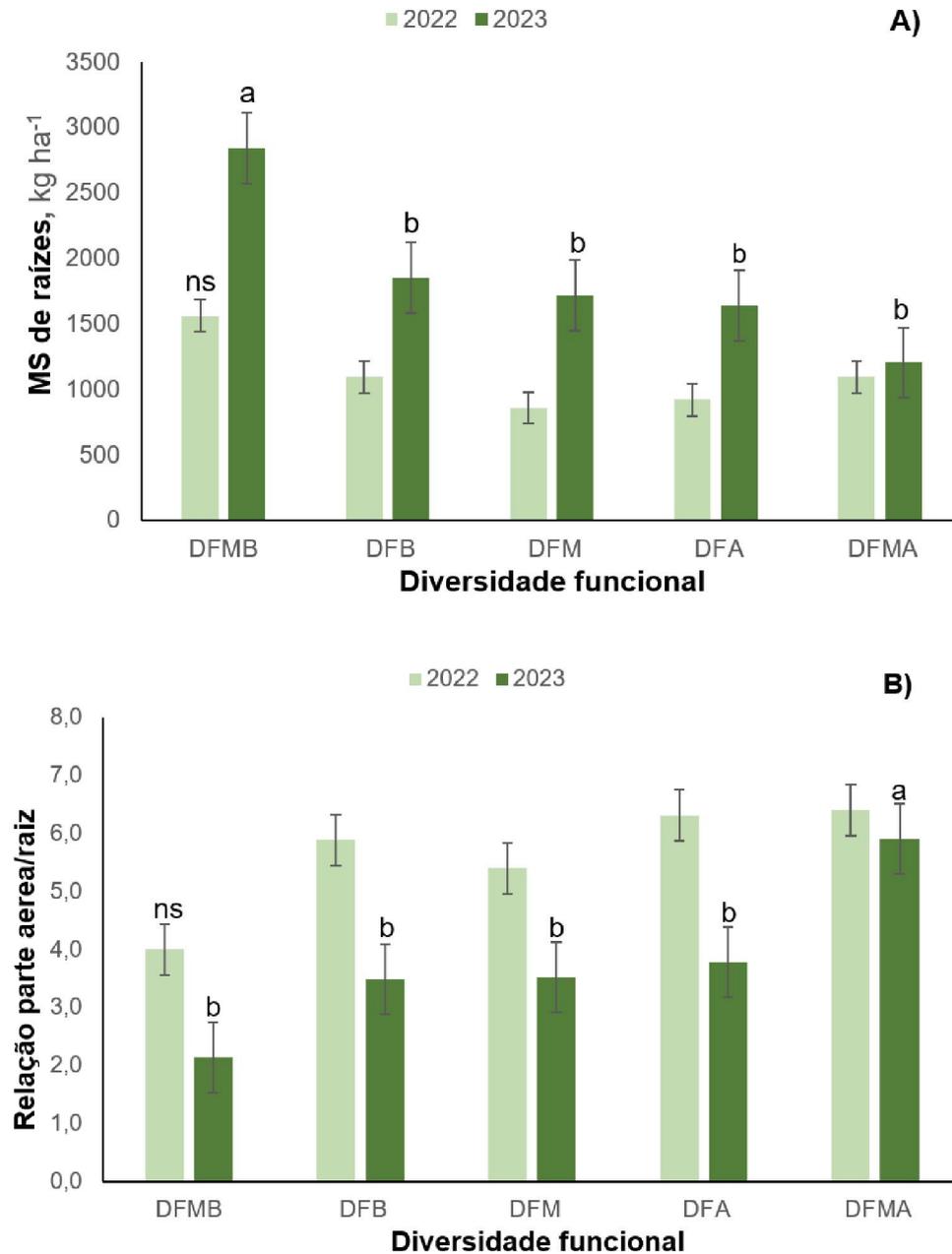
ns = não significativo. Médias seguidas de mesmas letras nas colunas, não diferem entre si no teste de Tukey a 5% de probabilidade. Muito baixa diversidade (DFMB), baixa diversidade (DFB), média diversidade (DFM), alta diversidade (DFA) e muito alta diversidade (DFMA).

Tabela 4 - Distribuição de carbono ocluso em diferentes classes de agregados, na camada de 0-10 cm, em um Latossolo Vermelho distrófico sob níveis de diversidade funcional no Cerrado do Mato Grosso.

| Diversidade funcional | Classes de agregados (mm) | | | | | |
|--------------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 4,75-2,0 | 2,0-1,0 | 1,0-0,5 | 0,5-0,25 | 0,25-0,125 | <0,125 |
| | ----- g kg ⁻¹ ----- | | | | | |
| DFMB | 12,8 ^{ns} | 14,1 ^{ns} | 13,5 ^{ns} | 10,7 ^{ns} | 10,2 ^{ns} | 17,2 ^{ns} |
| DFB | 14,2 | 13,7 | 15,1 | 12,3 | 8,8 | 17,2 |
| DFM | 15,4 | 14,5 | 15,3 | 11,3 | 8,6 | 15,5 |
| DFA | 13,3 | 11,6 | 15,8 | 11,0 | 9,6 | 14,6 |
| DFMA | 12,5 | 14,7 | 15,9 | 10,5 | 8,1 | 16,1 |

ns = não significativo. Médias seguidas de mesmas letras nas colunas, não diferem entre si no teste de Tukey a 5% de probabilidade. Muito baixa diversidade (DFMB), baixa diversidade (DFB), média diversidade (DFM), alta diversidade (DFA) e muito alta diversidade (DFMA).

Figura 5 - Massa seca de raiz (A) e relação parte aérea/raízes (B) no primeiro e segundo ano do experimento em um Latossolo Vermelho distrófico sob níveis de diversidade funcional no Cerrado do Mato Grosso.

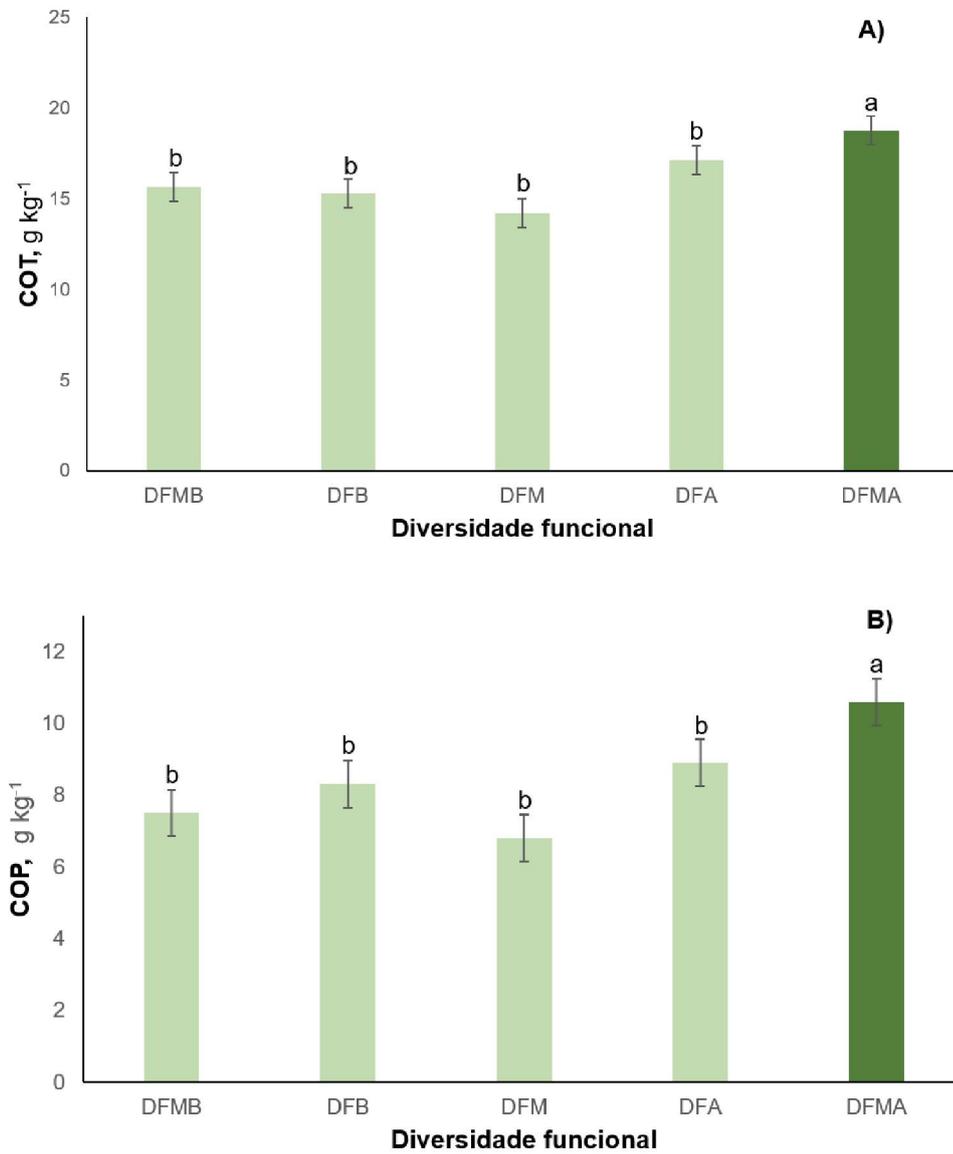


Médias seguidas de mesmas letras nas colunas, não diferem entre si no teste de Tukey a 5% de probabilidade. ns = não significativo. Muito baixa diversidade (DFMB), baixa diversidade (DFB), média diversidade (DFM), alta diversidade (DFA) e muito alta diversidade (DFMA).

Houve alterações expressivas nos teores de COT (14,2 – 17,2 g kg⁻¹) e no COP (7,5 – 10,6 g kg⁻¹), representando um incremento de 20% para o COT e 41% para COP na DFMA em comparação a DFMB (Figura 6 A e B). O mesmo ocorreu para o CBM (225,8 – 490,3 mg C kg⁻¹ de solo), em que a incorporação de C vinculado ao componente microbiológico foi 83% mais elevada na DFMA em comparação a DFMB (Figura 7). Por outro lado, o índice de manejo do carbono (IMC), com valores > 100%, revelou ter havido impacto positivo das DF no estoque de C, frisando a melhor qualidade do C na DFMA, em que o IMC superou em 86% o sistema de referência, a DFMB (IMC = 100%) (Figura 7).

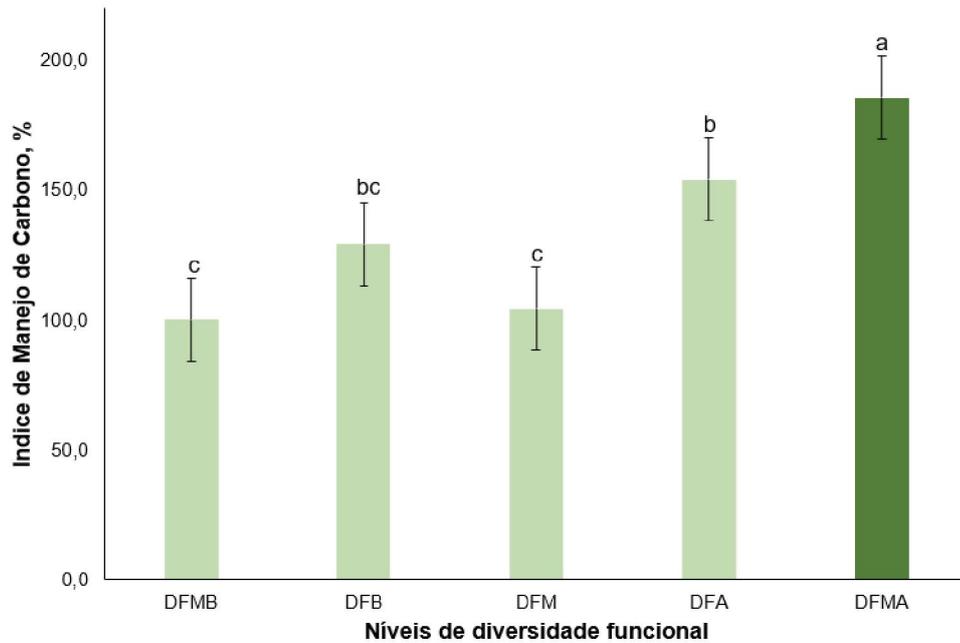
Houve efeito significativo da DF no $q\text{CO}_2$, com menores registros na DFMA (7,7 mg C-CO₂ mg⁻¹ CBM h⁻¹ × 10⁻³) e os maiores na DFMB (18,6 mg C-CO₂ mg⁻¹ CBM h⁻¹ × 10⁻³) (Tabela 5), representando um aumento de 141% na emissão de CO₂ por unidade de biomassa microbiana em relação à DFMA. Mudanças significativas ocorreram também para o $q\text{MIC}$, com um aumento de 100% na DFMA em comparação à DFMB. A atividade das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase, atestou sensibilidade apenas da β -glicosidase ao impacto da DF, com acréscimo de 52% na DFMA em relação à DFMB.

Figura 6 – COT - Carbono orgânico total (A) e COP - Carbono orgânico particulado (B), na camada de 0-10 cm, em um Latossolo Vermelho distrófico sob níveis de diversidade funcional no Cerrado do Mato Grosso.



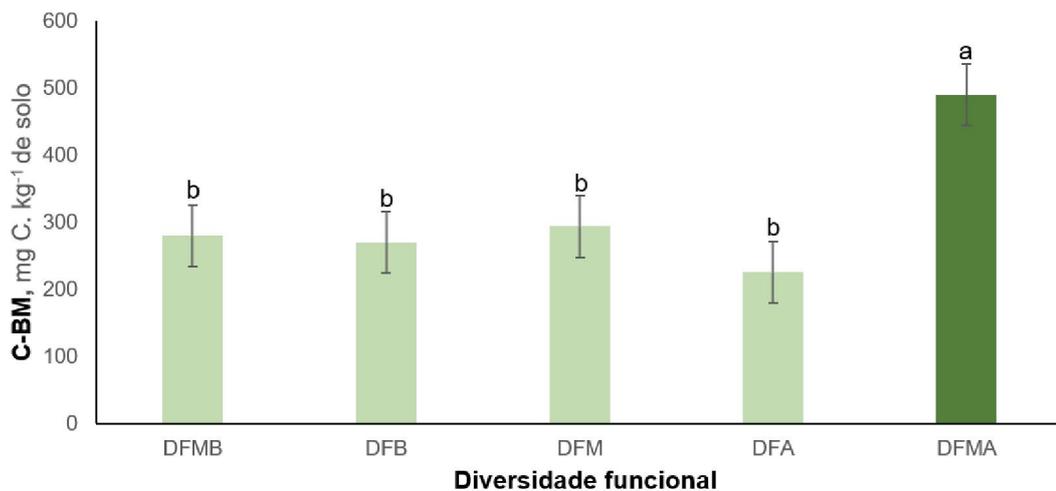
Médias seguidas de mesmas letras nas barras, não diferem entre si no teste de Tukey a 5% de probabilidade. Muito baixa diversidade (DFMB), baixa diversidade (DFB), média diversidade (DFM), alta diversidade (DFA) e muito alta diversidade (DFMA).

Figura 7 - Índice de manejo de carbono (IMC) do solo, na camada de 0-10 cm, em um Latossolo Vermelho distrófico sob níveis de diversidade funcional no Cerrado do Mato Grosso.



Médias seguidas de mesmas letras não diferem entre si no teste de Tukey a 5% de probabilidade. Muito baixa diversidade (DFMB), baixa diversidade (DFB), média diversidade (DFM), alta diversidade (DFA) e muito alta diversidade (DFMA).

Figura 8 - Carbono da biomassa microbiana (CBM), na camada 0 – 10 cm, de um Latossolo Vermelho distrófico sob níveis de diversidade funcional no Cerrado do Mato Grosso.



Médias seguidas de mesmas letras nas barras, não diferem entre si no teste de Tukey a 5% de probabilidade. Muito baixa diversidade (DFMB), baixa diversidade (DFB), média diversidade (DFM), alta diversidade (DFA) e muito alta diversidade (DFMA).

Tabela 5 - Atividade microbiológica do solo na fase pastagem sob níveis de diversidade funcional em um Latossolo Vermelho distrófico no Cerrado do Mato Grosso.

| Diversidade funcional | $q\text{CO}_2$ | $q\text{Mic}$ | β -glicosidase | Arilsufatase |
|-----------------------|--|---------------|---|--------------------|
| | (mg C CO_2 mg^{-1} C-BM h^{-1}) $\times 10^{-3}$ | % | ----- μg <i>p</i> -nitrofenol g^{-1} solo h^{-1} ----- | |
| DFMB | 18,6a | 1,3c | 318,5b | 63,2 ^{ns} |
| DFB | 15,3ab | 1,7b | 487,3a | 76,6 |
| DFM | 11,9b | 1,7bc | 482,5a | 68,8 |
| DFA | 17,4ab | 1,3c | 367,1ab | 82,3 |
| DFMA | 7,7c | 2,6a | 484,8a | 84,5 |

ns = não significativo. Médias seguidas de mesmas letras nas colunas, não diferem entre si no teste de Tukey a 0,05 de probabilidade. Muito baixa diversidade (DFMB), baixa diversidade (DFB), média diversidade (DFM), alta diversidade (DFA) e muito alta diversidade (DFMA).

Os resultados da análise de componentes principais (Figura 10A e B) explicaram 56,7% da variabilidade dos dados (34,0% na CP1 e 22,7% na CP2) e 54,9% (sendo 38,3% na CP1 e 16,7% na CP2), com o efeito da DF nos atributos de saúde do solo discriminado em três agrupamentos. Os parâmetros relacionados às raízes e a baixa estabilidade dos agregados ($\theta > 0,125$ mm) claramente definiram a DFMB. Maiores perda de CO_2 foram confirmadas pelos maiores valores de $q\text{CO}_2$, RBS e fitomassa da forragem nas diversidades DFB, DFM e DFA. Por sua vez, o COT, COP, C_{occluso} , maior estabilidade de agregados ($\theta > 2$ mm) e DMP indicaram o impacto da DFMA na construção de um solo mais funcional.

Figura 9 - Regressão entre diâmetro médio ponderado dos agregados do solo e relação fitomassa/raiz (A), diâmetro médio ponderado dos agregados do solo e volume de raiz (B), diâmetro médio ponderado dos agregados do solo e tamanho de agregados > 2mm (C), tamanho de agregados ($\theta > 2 \text{ mm}$) e volume de raiz da das forrageiras (D) em um Latossolo Vermelho distrófico sob níveis de diversidade funcional no Cerrado do Mato Grosso.

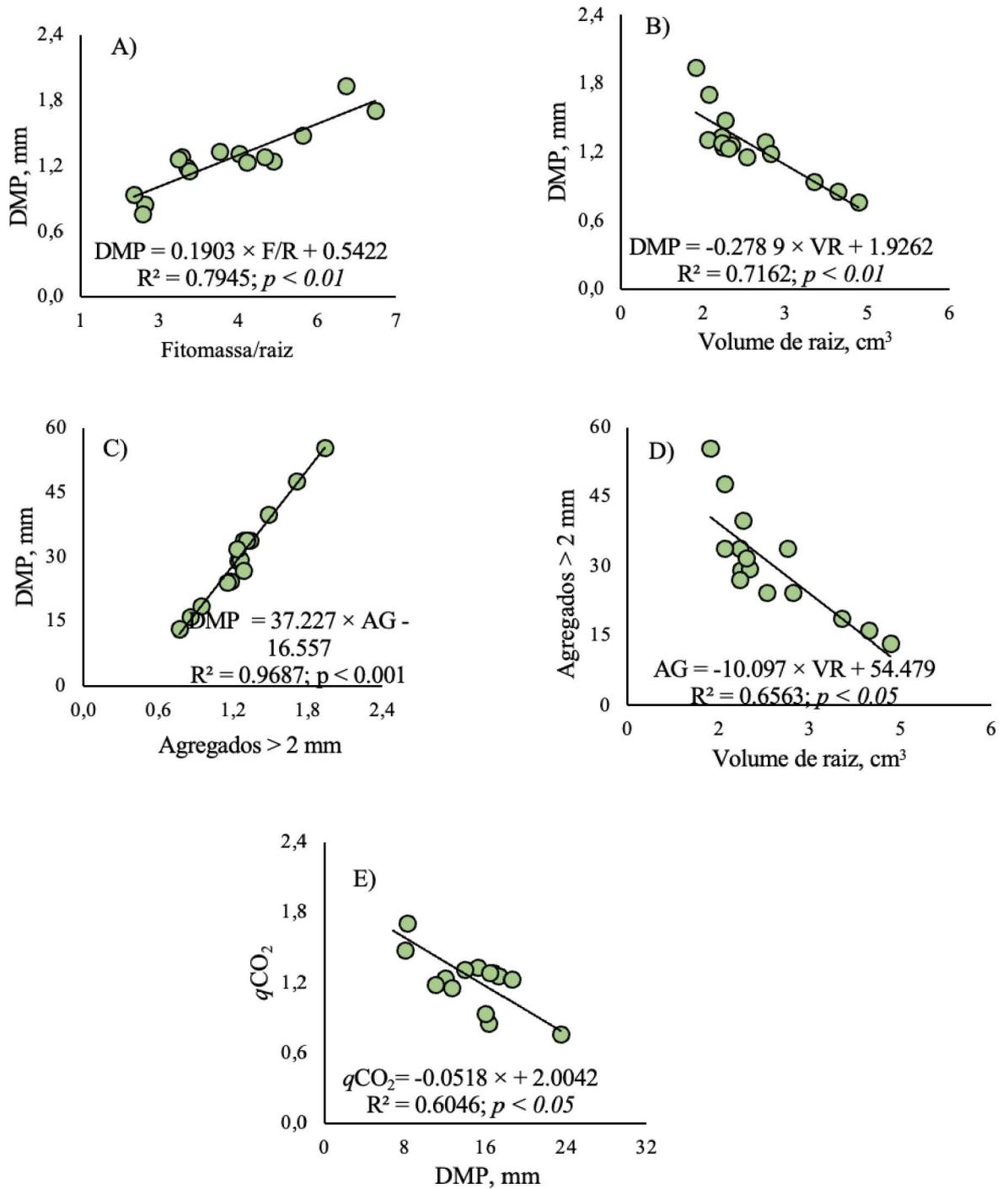
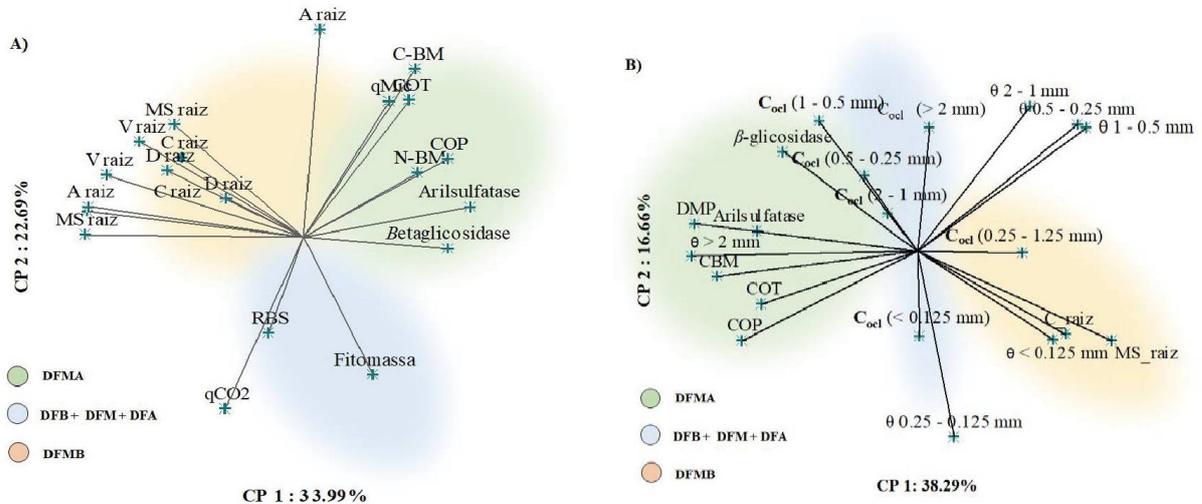


Figura 10 - Relações entre as diversidades funcionais e os parâmetros vegetais, atividades enzimáticas e propriedades do solo com base na análise de componentes principais em um Latossolo vermelho distrófico sob pastagem no Cerrado do Mato Grosso.



θ: classes de agregados, DMP: diâmetro médio ponderado de agregado, C_{ocl}: carbono ocluído no agregado, CBM: carbono da biomassa microbiana, C raiz: comprimento de raiz, MS raiz: massa de raiz das forrageiras. DFMB (muito baixa diversidade), DFB (baixa diversidade), DFM (média diversidade), DFA (alta diversidade) e DFMA (muito alta diversidade).

3.4 DISCUSSÃO

Em curto prazo, melhorias na saúde do solo e parâmetros associados às raízes foram possíveis com o aumento da DF. Todavia, a competição interespecífica por água, espaço, luz e nutrientes induzidas por plantas de porte alto e rápido crescimento como trigo mourisco, girassol e feijão caupi pode suprimir as espécies de crescimento mais lento (ex., *nabo forrageiro* e *piatã*) (Assefa e Ledin, 2001; Griffith et al., 2011; Sadeghpour et al., 2013), o que impediu maiores produtividades de forragem na DFMA. Todavia, a não diferenciação da produtividade de forragem entre as diferentes diversidades funcionais, e o aumento da saúde do solo, fortalecem o uso de consórcios entre espécies de plantas como uma alternativa sustentável para substituir a monocultura de pastagens tradicionais ou em sistemas integrados de produção agropecuária. Além de possibilitar um incremento na

biodiversidade e no funcionamento do ecossistema, evidenciado também em outros estudos (Putten et al., 2013; Ikoyi et al., 2023).

Embora não haja diferença para produtividade de fitomassa, as raízes foram as mais afetadas pelas maiores DF, com aumento no comprimento (safra 2023) e volume de raízes (safra 2022/2023) no cultivo solteiro das gramíneas na DFMB. Nesse sistema, a competição por nutrientes, água e espaço no solo é reduzida, permitindo um crescimento livre das raízes (Urigoiti et al., 2022), por outro lado, na diversidade funcional muito alta, a competição entre as espécies pode forçar o crescimento radicular em profundidades superiores as analisadas neste trabalho. Assim, examinar as características funcionais abaixo do solo é útil para avaliação precoce do impacto do manejo na saúde do solo e perturbações na rizosfera que podem comprometer a absorção de água e nutrientes e a produtividade de parte aérea.

As diferenças na parte aérea e nas raízes se deram em função do tempo de estabelecimento da DF. A maior relação parte aérea/raízes na DFMA resultou em melhorias na produção de parte aérea na safra/2023, pois no segundo ano a DF estava mais bem estabelecida. A abundância de massa seca diversificada na DFMA suscita maior acúmulo de material orgânico e ciclagem de nutrientes, tornando os solos na DFMA mais propícios para as culturas em sucessão (Davi et al., 2022). Em suma, maior massa de raízes na DFMB resultou do baixo efeito competitivo, enquanto a maior relação parte aérea/raízes indicou um efeito compensatório, com alocação preferencial de recursos para nutrição de um maior componente de exportação na DFMA.

A agregação do solo desempenha um papel fundamental na manutenção da qualidade física do solo (Eisenhauer et al., 2018). De fato, as maiores classes de

agregados ($\theta > 2,0$ mm) associado à maior DF foram atribuídas à maior geração de resíduos orgânicos pela biomassa vegetal, exsudatos deixados pelas raízes (Cania et al., 2019) e pelas forças mecânicas oriundas do emaranhado de raízes, especialmente de raízes finas e mais diversificadas, conforme verificou-se na DFMA (Rillig et al., 2017; Kang et al., 2023). Logo, o emaranhado de raízes finas otimizou a estabilidade mecânica dos agregados, outrora também observado por Gould et al. (2016).

A maior DF está relacionada com o armazenamento de C orgânico no solo, e a razão mais provável para isto é que a DF afeta a produtividade das plantas e, portanto, a quantidade de C do solo (Spohn et al., 2023). Essa afirmativa parece ser válida para resposta de longo prazo, haja vista que, na ocasião deste estudo, as DF não alteraram o C_{occluso} . Ainda assim, os teores de C dentro dos agregados não podem ser negligenciados, pois representa o histórico de uso do solo (Lange et al., 2015). Além disso, a incorporação ou a alteração do C em solo argiloso não é tão fácil devido à alta estabilidade de agregados em solo argiloso, conferindo taxas lentas de decomposição da matéria orgânica em virtude da taxa reduzida de difusão de oxigênio dentro dos agregados (Umer e Rajab, 2012; Merino et al., 2015).

Ao confrontar o efeito da DF, sobretudo na DFMA, para os teores de COT e COP com a ausência de efeito significativo no C dentro dos agregados, nas diferentes classes de diâmetro, inferiu-se que o C_{occluso} representou a fração estabilizada associada à fração mineral (Merino et al., 2015; Berryman et al., 2020). Trata-se da fração de C dificilmente alterada pelo manejo agrícola e não acessada pelos microrganismos em curto prazo (Li et al., 2020). Portanto, o C_{occluso} representa a resistência do solo argiloso às perdas de C. A quantidade de C_{occluso} estabilizada por associações minerais geralmente aumenta com a cobertura vegetal (Jílková et

al., 2021), e é possível que, a longo prazo, a DFMA suporte teores mais altos desta fração.

As deposições contínuas dos resíduos orgânicos acima e abaixo do solo ocasionadas pela DF, tornaram a DFMA um sítio de acúmulo de C no solo, evidenciado pelos maiores teores de COT, COP e CBM. O COP é a fração mais lábil da matéria orgânica, compreendido como um eficiente indicador do manejo adotado (Camargo et al., 2022). O aumento desta fração junta com o COT sinalizou que a DF foi capaz de alterar a reserva e a ciclagem de nutrientes já em curto prazo (2 anos ?), o que aumenta a capacidade produtiva do solo, por devolver grande parte dos nutrientes extraídos pela cultura mais rapidamente (Davi et al., 2022). O COT e COP foram uma resposta direta das entradas de novo C, depositados por restos culturais superficiais e subsuperficiais, como a palhada, raízes mortas e exsudatos radiculares.,

O aumento do COT acompanhado pelo COP demonstrou que a DF altera os níveis e a qualidade da MOS. Aliás, tal comportamento evidenciou que o acúmulo de C orgânico no solo ocorre, preferencialmente, na forma de matéria orgânica particulada, que é a fração mais sensível a alterações no manejo do solo (Silva et al., 2022). Realmente, os valores mais altos do IMC na DFMA indicaram maior labilidade do C neste sistema, provavelmente porque esta diversidade é uma fonte considerável de C orgânico (Gandariasbeitia et al., 2022) e produz quantidade expressiva de biomassa acima do solo, que serve de alimento para os microrganismos (Shu et al., 2021).

Numa relação de causa efeito, a DF atuou como condicionador biológico da estrutura do solo, beneficiando os microrganismos aeróbicos, vista que o aumento do DMP resulta em maior espaço poroso e difusão de gases (Umer e Rajab, 2012).

Assim, o decréscimo do $q\text{CO}_2$ com o aumento do DMP significou maior eficiência da comunidade microbiológica na fixação de CO_2 em solo bem estruturado. Geralmente, valores de $q\text{CO}_2$ mais baixos indicam maior eficiência metabólica (Chen et al., 2018). Logo, a regressão inversa para DMP e $q\text{CO}_2$ ratificou as classes de tamanho de agregados do solo como unidades estruturais reguladoras da renovação do C, ou seja, dos produtos metabolizados pelos microrganismos do solo.

Os intervalos nos valores de $q\text{CO}_2$ e $q\text{MIC}$ nas diferentes DF destacam a complexa interação entre as espécies de plantas e a atividade microbiana nos ambientes agrícolas (Franco et al., 2020). Um $q\text{CO}_2$ 141% maior na DFMB em relação a DFMA, indicou maiores taxas de potenciais perdas de C para atmosfera, com um maior nível de estresse da biomassa microbiana e condições desfavoráveis à saúde do solo, tornando-o menos sustentável (Schmidt et al., 2011). O solo exposto acarreta a rápida degradação da MOS, estocando menos C na DFMB. Portanto, os níveis de DF influenciaram a atividade microbiana, corroborando os resultados de outros estudos (Franco et al., 2020; Davi et al., 2022).

O $q\text{CO}_2$ diminuindo com o aumento do $q\text{MIC}$ significou maior eficiência na utilização do C como substrato pela comunidade microbiológica do solo na DFMA, dada maior oferta de COT. O C fixado ao tecido microbiológico atenua as perdas de CO_2 por consumir mais C para crescimento populacional (Kallenbach et al., 2015; Buckeridge et al., 2022; Spohn et al., 2023). Assim, o contraste entre $q\text{CO}_2$ e $q\text{MIC}$ além de suscitar uma população microbiológica saudável, indicou um potencial otimizado de sequestro de C pelo solo, em longo prazo, já que o C da biomassa microbiana pode representar de 1 a 4% do COT do solo (Dilly et al. 2003; Abreu et al., 2020). O maior reservatório de C claramente observado na DFMA, dada maior

eficiência significativa no uso de C, torna esse sistema estratégico na redução de gases do efeito estufa.

Para a atividade da enzima β -glicosidase, significativamente mais alta nos solos com mais de uma espécie de planta em consórcio, não se pode assumir que o sistema mais diversificado promove maior atividade dessa enzima, haja vista pequenas diferenças entre os níveis de DF. Aliás, em todas as DF os valores médios da atividade β -glicosidase estavam acima da faixa de valores recomendados, que é $> 225 \mu\text{g } p\text{-nitrofenol } \text{g}^{-1} \text{ solo } \text{h}^{-1}$, para a região do Cerrado Brasileiro (Mendes et al., 2018; Franco et al., 2020). Isso mostra que a β -glicosidase, assim como a ariulsultase, não foram totalmente eficientes para detectar alterações promovidas pelos sistemas de cultivo, neste estudo.

Os valores de C no solo se elevaram devido ao estímulo da DF sob a decomposição e a estabilização de compostos orgânicos. O que se espera de um cultivo complexo é o estabelecimento de relações que estimulem os processos microbianos e as funções ecossistêmicas desempenhadas pelos microrganismos do solo, na tentativa de garantir um ambiente mais funcional. Espera-se que as descobertas com esta investigação orientem a aplicação de sistemas complexos e o desenvolvimento de políticas para o sequestro de carbono em pastagens e o manejo sustentável de sistemas agropecuários, frente a uma vasta área de pastagens degradadas em escala global (49%) e nacional (78%) (Deng et al., 2023; Polidoro et al., 2021).

3.5 CONCLUSÕES

Os níveis de DF em pastagem, em curto prazo, alteraram a massa de raízes das gramíneas sem prejuízos na produtividade das forrageiras.

A DF muito alta contribui para o aumento do carbono da biomassa microbiana, carbono orgânico total, estabilidade de agregados do solo e do índice de manejo do carbono comparado a DF muito baixa, sem clara influência das DF no $C_{occluso}$ aos agregados e na arilsulfatase.

O acúmulo do carbono orgânico total no solo ocorre, preferencialmente, na forma de matéria orgânica particulada, por ser a fração mais sensível a alterações do manejo do solo.

Os atributos carbono orgânico total, carbono orgânico particulado, carbono da biomassa microbiana, quociente metabólico e quociente microbiano são sensíveis em captar o impacto positivos da DF na saúde do solo, indicando que a DF muito alta é eficiente para a promoção das melhorias na estrutura e na saúde do solo, e garantindo assim um ambiente agrícola mais funcional e sustentável já em curto prazo.

3.6 REFERÊNCIAS

- ABREU, L. H. G.; de FREITAS, I. C.; SANTANA, P. H. L.; de ALMEIDA BARBOSA, D. L.; SANTOS, L. D. T.; SANTOS, M. V.; FRAZÃO, L. A. Variation in soil carbon, nitrogen and microbial attributes within a silvopastoral system in the Brazilian Cerrado. *Agroforestry Systems*, v. 94, p. 2343-2353, 2020.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Z.*, v. 22, p. 711-728, 2013.
- ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient of CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental condition, such as pH, on the microbial of forest soil. *Soil Biology & Biochemistry*, v. 25, n. 3, p. 393- 395, 1993.
- ASSEFA, G.; LEDIN, I. Effect of variety, soil type and stabilization on the establishment, growth, forage yield, quality and voluntary intake by cattle of oats and

- vetches cultivated in pure stands and mixtures. *Anim. Feed Sci. Technol.*, v. 92, p. 95-111, 2001. doi: 10.1016/S0377-8401(01)00242-5.
- ATKIN, O. K.; BLOOMFIELD, K. J.; REICH, P. B.; et al. Global Variability in Leaf Respiration in Relation to Climate, Plant Functional Types, and Leaf Traits. *New Phytologist*, v. 206, p. 614-636, 2015.
- BARBIERI, P.; PELLERIN, S.; SEUFERT, V.; NESME, T. Changes in Crop Rotations Would Impact Food Production in an Organically Farmed World. *Nature Sustainability*, v. 2, p. 378-385, 2019.
- BARDGETT, R. D.; VAN DER PUTTEN, W. H. Belowground Biodiversity and Ecosystem Functioning. *Nature*, v. 515, p. 505-511, 2014.
- BASHIR, O.; et al. Soil Organic Matter and Its Impact on Soil Properties and Nutrient Status. In: DAR, G. H.; BHAT, R. A.; MEHMOOD, M. A.; HAKEEM, K. R. (eds). *Microbiota and Biofertilizers*. Vol. 2, Cham: Springer, 2021, p. 103-121.
- BELLO, F.; LAVOREL, S.; DIAZ, S.; et al. Towards an Assessment of Multiple Ecosystem Processes and Services via Functional Traits. *Biodiversity and Conservation*, v. 19, p. 2873-2893, 2010.
- BERRYMAN, E.; ET AL. Carbono do Solo. In: POUYAT, R.; PAGE-DUMROESE, D.; PATEL-WEYNAND, T.; GEISER, L. (eds) *Solos florestais e pastagens dos Estados Unidos sob condições variáveis*. Springer, Cham, 2020.
- BERTOLA, M.; FERRARINI, A.; VISIOLI, G. Improvement of Soil Microbial Diversity through Sustainable Agricultural Practices and Its Evaluation by -Omics Approaches: A Perspective for the Environment, Food Quality, and Human Safety. *Microorganisms*, v. 9, 1400, 2021.
- BIERZA, W.; WOŹNIAK, G.; KOMPAŁA-BĄBA, A.; MAGURNO, F.; MALICKA, M.; CHMURA, D.; PIOTROWSKA-SEGET, Z. The Effect of Plant Diversity and Soil Properties on Soil Microbial Biomass and Activity in a Novel Ecosystem. *Sustainability*, v. 15, n. 6, 4880, 2023.
- BIJLWAN, A.; RANJAN, R.; KUMAR, M.; et al. Managing Crop Adaptation to Changing Environment. In: KUMAR, N.; SINGH, H. (eds). *Plant Functional Traits for Improving Productivity*. Singapore: Springer, 2024.
- BLAIR, G. J.; LEFROY, R. D. B.; LISE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Aust. J. Agric. Res.*, v. 46, p. 1459-1466, 1995.

- BŁOŃSKA, E.; PIASZCZYK, W.; STASZEL, K.; LASOTA, J. Enzymatic Activity of Soils and Soil Organic Matter Stabilization as an Effect of Components Released from the Decomposition of Litter. *Applied Soil Ecology*, v. 157, 2021.
- BODNER, G.; MENTLER, A.; KEIBLINGER, K. Plant Roots for Sustainable Soil Structure Management in Cropping Systems. In: RENGEL, Z.; DJALOVIC, I. (eds). *The Root Systems in Sustainable Agricultural Intensification*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2021.
- BOGATI, K.; WALCZAK, M. The Impact of Drought Stress on Soil Microbial Community, Enzyme Activities, and Plants. *Agronomy*, v. 12, 189, 2022.
- BROOKES, P. C.; LANDMAN, A.; PRUDEN, B.; JENKINSON, D. S. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct stabilized method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biol.*, v. 17, p. 837-842, 1985.
- BRUSSAARD, L.; DE RUITER, P. C.; BROWN, G. G. Soil Biodiversity for Agricultural Sustainability. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 121, p. 233-244, 2007.
- BUCKERIDGE, K. M.; CREAMER, C.; WHITAKER, J. Deconstructing the microbial necromass continuum to inform soil carbon sequestration. *Functional Ecology*, v. 36, n. 6, p. 1396-1410, 2022.
- CADOTTE, M. W.; CARSCADDEN, K.; MIROTCHEV, N. Beyond Species: Functional Diversity and the Maintenance of Ecological Processes and Services. *Journal of Applied Ecology*, v. 48, p. 1079-1087, 2011.
- CAMARGO, T. A.; DENARDIN, L. G. O.; PEREIRA PACHECO, L.; et al. Plant Diversity and Cattle Grazing Affecting Soil and Crop Yield in Tropical Sandy Soils. *Archives of Agronomy and Soil Science*, v. 69, p. 2053-2064, 2023.
- CARMONA, C. P.; GUERRERO, I.; PECO, B.; et al. Agriculture Intensification Reduces Plant Taxonomic and Functional Diversity across European Arable Systems. *Functional Ecology*, v. 34, p. 1448-1454, 2020.
- CHEN, X.; CHEN, H. Y. H.; CHEN, C.; et al. Effects of Plant Diversity on Soil Carbon in Diverse Ecosystems: A Global Meta-Analysis. *Biological Reviews*, v. 95, p. 167- 183, 2020.
- CORNWELL, W. K.; CORNELISSEN, J. H. C.; AMATANGELO, K.; et al. Plant Species Traits are the Predominant Control on Litter Decomposition Rates within Biomes Worldwide. *Ecology Letters*, v. 11, p. 1065-1071, 2008.
- COTRUFO, M. F.; LAVALLEE, J. M. Chapter One - Soil Organic Matter Formation, Persistence, and Functioning: A Synthesis of Current Understanding to Inform its

- Conservation and Regeneration. In: SPARKS, D. L. (ed.). *Advances in Agronomy*, v. 172, 2022.
- CRUZ, L. G.; BASTIDAS, A. T. C.; SUÁREZ, L. R.; SALAZAR, J. C. S. Microbial properties of soil in different coverages in the Colombian Amazon. *Floresta e Ambiente*, v. 26, e20171051, 2019.
- CUSSI T. G. Diversidade funcional e taxa de semeadura da gramínea forrageira: produção e qualidade de forragem; Dissertação de mestrado; Universidade Federal de Rondonópolis – MT Programa de Pós-graduação em Zootecnia, 2023.
- DADALTO, J. P.; FERNANDES, H. C.; TEIXEIRA, M. M.; CECON, P. R.; MATOS, A. T. D. Sistema de preparo do solo e sua influência na atividade microbiana. *Engenharia Agrícola*, v. 35, p. 506-513, 2015.
- DAVI, J. E.; NOGUEIRA, B. K.; GASQUES, L. R.; DALLA CÔRT, A. S.; CAMARGO, T. A. D.; PACHECO, L. P.; SOUZA, E. D. Diversified production systems in sandy soils of the Brazilian Cerrado: nutrient dynamics and soybean productivity. *Journal of Plant Nutrition*, v. 1, p. 1-18, 2022.
- DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D. P.; KÖGEL-KNABNER, I. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilisation. *Plant Soil*, v. 268, p. 319-328, 2005.
- DILLY, O.; BLUME, H. P.; SEHY, U.; JIMENEZ, M.; MUNCH, J. C. Variation of stabilized, microbial and biologically active carbon and nitrogen in soil under contrasting land use and agricultural management practices. *Chemosphere*, v. 52, p. 557-569, 2003.
- Dubeux, J.C.B., Sollenberger, L.E., Mathews, B.W., Scholberg, J.M., Santos, H.Q., 2007. Nutrient cycling in warm-climate grasslands. *Crop Sci.* 47, 915-928. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.09.0581>.
- DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and Assessing Soil Quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Eds.). *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Madison: SSSA, v. 1, cap. 1, p. 3-21, 1994.
- DORAN, J. W.; ZEISS, M. R. Soil Health and Sustainability: Managing the Biotic Component of Soil Quality. *Applied Soil Ecology*, v. 15, p. 3-11, 2000.
- EISENHAUER, N.; HINES, J.; ISBELL, F.; VAN DER PLAS, F.; HOBBIÉ, S. E.; KAZANSKI, C. E.; LEHMANN, A.; LIU, M.; LOCHNER, A.; RILLIG, M. C.; VOGEL,

- A.; WORM, K.; REICH, P. B. Plant diversity maintains multiple soil functions in future environments. *Elife*, v. 7, e41228, 2018.
- FAHAD, S.; CHAVAN, S. B.; CHICHAGHARE, A. R.; et al. Agroforestry Systems for Soil Health Improvement and Maintenance. *Sustainability*, v. 14, 14877, 2022.
- FRANCO, A. J.; SILVA, A. P. V.; SOUZA, A. B. S.; OLIVEIRA, R. L.; BATISTA, E. R.; SOUZA, E. D.; SILVA, A. O.; CARNEIRO, M. A. C. Plant diversity in integrated crop-livestock systems increases the soil enzymatic activity in the short term. *Pesquisa Agropecuaria Tropical*, v. 50, E64026, 2020.
- FUHRER, J. Agroecosystem Responses to Combinations of Elevated CO₂, Ozone, and Global Climate Change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 97, p.1-20, 2003.
- GANDARIASBEITIA, M.; LÓPEZ-PÉREZ, J. A.; JUARISTI, B.; LARREGLA, S. Casca de Semente de Girassol como Subproduto Promissor para Tratamentos de Biodesinfestação do Solo e Melhoria da Fertilidade em Culturas Protegidas de Alface. *Frente. Sustentar. Sistema Alimentar*, v. 6, 901654, 2022.
- GOMIERO, T. Soil Degradation, Land Scarcity, and Food Security: Reviewing a Complex Challenge. *Sustainability*, v. 8, 281, 2016.
- GOULD, I. J.; QUINTON, J. N.; WEIGELT, A.; DE DEYN, G. B.; BARDGETT, R. D. A diversidade das plantas e as características das raízes beneficiam as propriedades físicas essenciais para o funcionamento do solo nas pastagens. *Ecologia Cartas*, v. 19, p. 1140-1149, 2016.
- GRIFITH, A. P.; EPPLIN, F. M.; FUHLENDORF, S. D.; GILLEN, R. A comparison of perennial polycultures and monocultures for producing biomass for biorefinery feedstock. *Agron. J.*, v. 103, p. 617-627, 2011.
- GURR, G. M.; LU, Z.; ZHENG, X.; et al. Multi-Country Evidence that Crop Diversification Promotes Ecological Intensification of Agriculture. *Nature Plants*, v. 2, p. 1-5, 2016.
- HAN, S.; DELGADO-BAQUERIZO, M.; LUO, X.; et al. Soil Aggregate Size- Dependent Relationships between Microbial Functional Diversity and Multifunctionality. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 154, 2021.
- HARTMANN, M.; SIX, J. Soil Structure and Microbiome Functions in Agroecosystems. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 4, p. 4-18, 2023.

- HOOPER, D. U.; DANGERFIELD, J. M.; BRUSSAARD, L.; et al. Interactions between Above- and Belowground Biodiversity in Terrestrial Ecosystems: Patterns, Mechanisms, and Feedbacks. *Bioscience*, v. 50, p. 1049-1061, 2000.
- HUSSAIN, A.; BASHIR, H.; ZAFAR, S.; et al. The Importance of Soil Organic Matter (SOM) on Soil Productivity and Plant Growth. *Biological and Agricultural Sciences Research Journal*, v. 2023, n. 1, 2023.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. Rio de Janeiro. (2023). Disponível em: [link]. Acesso em: 24 abr. 2024.
- IKOYI, I.; GRANGE, G.; FINN, J. A.; BRENNAN, F. P. Plant diversity enhanced nematode-based soil quality indices and changed soil nematode community structure in intensively-managed agricultural grasslands. *European Journal of Soil Biology*, v. 118, 103542, 2023.
- JANZEN, H. H.; JANZEN, D. W.; GREGORICH, E. G. The 'Soil Health' Metaphor: Illuminating or Illusory? *Soil Biology and Biochemistry*, v. 159, 108167, 2021.
- JEFFERS, J. N. R. An introduction to system analysis: With ecological applications. London: Edward Arnold, 1978.
- JENKINSON, D. S.; POWLSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil-I. Fumigation with chloroform. *Soil Biology & Biochemistry*, v. 8, n. 3, p. 167-177, 1976.
- JÍLKOVÁ, V.; DEVETTER, M.; BRYNDOVÁ, M.; HÁJEK, T.; KOTAS, P.; LULÁKOVÁ, P.; MACEK, P. Carbon sequestration related to soil physical and chemical properties in the high Arctic. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 35, n. 9, 2021.
- KALLENBACH, C. M.; GRANDY, A. S.; FREY, S. D.; DIEFENDORF, A. F. Microbial physiology and necromass regulate agricultural soil carbon accumulation. *Soil Biology & Biochemistry*, v. 91, p. 279-290, 2015. doi: 10.1016/j.soilbio.2015.09.005.
- KARLEN, D. L.; MAUSBACH, M. J.; DORAN, J. W.; et al. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (a Guest Editorial). *Soil Science Society of American Journal*, v. 61, p. 4-10, 1997.
- KLINK, S.; KELLER, A. B.; WILD, A. J.; et al. Stable Isotopes Reveal that Fungal Residues Contribute More to Mineral-Associated Organic Matter Pools than Plant Residues. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 168, 2022.

- Kuzyakov, Y., & Xu, X. (2013). Competition between roots and micro-organisms for nitrogen: Mechanisms and ecological relevance. *NewPhytologist*, 198, 656-669. <https://doi.org/10.1111/nph.12235>
- UNSTLER, G.; FALSTER, D.; COOMES, D. A.; et al. Plant Functional Traits Have Globally Consistent Effects on Competition. *Nature*, v. 529, p. 204-207, 2016.
- LANGE, M.; EISENHAUER, N.; SIERRA, C. A.; BESSLER, H.; ENGELS, C.; GRIFFITHS, R.; GLEIXNER, G. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. *Nature communications*, v. 6, n. 1, 6707, 2015.
- LAVOREL, S. Plant Functional Effects on Ecosystem Services. *Journal of Ecology*, v. 101, p. 4-8, 2013.
- LI, B. V.; JIANG, B. Responses of Forest Structure, Functions, and Biodiversity to Livestock Disturbances: A Global Meta-Analysis. *Global Change Biology*, v. 27, p. 4745-4757, 2021.
- LICHTFOUSE, E.; NAVARRETE, M.; DEBAEKE, P.; et al. Agronomy for Sustainable Agriculture: A Review. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 29, p. 1-6, 2009.
- LUCK, G. W.; HARRINGTON, R.; HARRISON, P. A.; et al. Quantifying the Contribution of Organisms to the Provision of Ecosystem Services. *Bioscience*, v. 59, p. 223-235, 2009.
- MA, W.; LI, G.; WU, J.; XU, G.; WU, J. Response of Soil Labile Organic Carbon Fractions and Carbon-Cycle Enzyme Activities to Vegetation Degradation in a Wet Meadow on the Qinghai-Tibet Plateau. *Geoderma*, v. 377, 2020.
- MÄDER, P.; FLIESSBACH, A.; DUBOIS, D.; et al. Soil Fertility and Biodiversity in Organic Farming. *Science*, v. 296, p. 1694-1697, 2002.
- MAITRA, S.; HOSSAIN, A.; BRESTIC, M.; et al. Intercropping – A Low Input Agricultural Strategy for Food and Environmental Security. *Agronomy*, v. 11, 343, 2021.
- MAO, L.; TANG, L.; YE, S.; WANG, S. Soil Organic C and Total N as well as Microbial Biomass C and N Affect Aggregate Stability in a Chronosequence of Chinese Fir Plantations. *European Journal of Soil Biology*, v. 106, 2021.
- MARON, J. L.; MARLER, M.; KLIRONOMOS, J. N.; CLEVELAND, C. C. Soil Fungal Pathogens and the Relationship between Plant Diversity and Productivity. *Ecology Letters*, v. 14, p. 36-41, 2011.

- MARQUARD, E.; WEIGELT, A.; TEMPERTON, V. M.; et al. Plant Species Richness and Functional Composition Drive Overyielding in a Six-Year Grassland Experiment. *Ecology*, v. 90, p. 3290-3302, 2009.
- MCGILL, B. J.; ENQUIST, B. J.; WEIHER, E.; WESTOBY, M. Rebuilding Community Ecology from Functional Traits. *Trends in Ecology & Evolution*, v. 21, p. 178-185, 2006.
- MERINO, C.; NANNIPIERI, P.; MATUS, F. Soil carbon controlled by plant, microorganism, and mineralogy interactions. *Journal of soil science and plant nutrition*, v. 15, n. 2, p. 321-332, 2015.
- NAEEM, S.; WRIGHT, J. P. Disentangling Biodiversity Effects on Ecosystem Functioning: Deriving Solutions to a Seemingly Insurmountable Problem. *Ecology Letters*, v. 6, p. 567-579, 2003.
- NOGUEIRA, B. K. A.; SILVA, L. S.; GASQUES, L. R.; et al. Spatial Variability of Potassium and Agricultural Productivity in Sandy Loam Soil with Rock Dust under Functional Diversity in the Brazilian Cerrado. *J Soil Sci Plant Nutr*, 2024.
- NUNES-NETO, N.; MORENO, A.; EL-HANI, C. N. Function in Ecology: An Organizational Approach. *Biology & Philosophy*, v. 29, n. 1, p. 123-141, 2014.
- ODUM, E. P. The Strategy of Ecosystem Development: An Understanding of Ecological Succession Provides a Basis for Resolving Man's Conflict with Nature. *Science*, v. 164, p. 262-270, 1969.
- PETCHEY, O. L.; GASTON, K. J. Functional Diversity: Back to Basics and Looking Forward. *Ecology Letters*, v. 9, p. 741-758, 2006.
- PETCHEY, O. L.; HECTOR, A.; GASTON, K. J. How Do Different Measures of Functional Diversity Perform? *Ecology*, v. 85, p. 847-857, 2004.
- PIOTROWSKA-DŁUGOSZ, A.; DŁUGOSZ, J.; FRĄC, M.; GRYTA, A.; BREZABORUTA, B. Enzymatic Activity and Functional Diversity of Soil Microorganisms along the Soil Profile – A Matter of Soil Depth and Soil-Forming Processes. *Geoderma*, v. 416, 2022.
- PIRES, G. C.; DENARDIN, L. G. O.; SILVA, L. S.; et al. System Fertilization Increases Soybean Yield Through Soil Quality Improvements in Integrated Crop- Livestock System in Tropical Soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 22, p. 4487-4495, 2022.
- PIRES, G. C.; DE LIMA, M. E.; ZANCHI, C. S.; DE FREITAS, C. M.; DE SOUZA, J. M. A.; DE CAMARGO, T. A.; PACHECO, L. P.; WRUCK, F. J.; CARNEIRO, M. A. C.;

- KEMMELMEIER, K.; et al. Arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of soybean in integrated crop livestock systems with intercropping in the pasture phase. *Rhizosphere*, v. 17, 100270, 2021.
- PTACNIK, R.; SOLIMINI, A. G.; ANDERSEN, T.; et al. Diversity Predicts Stability and Resource Use Efficiency in Natural Phytoplankton Communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 105, p. 5134-5138, 2008.
- RILLIG, M. C.; AGUILAR-TRIGUEROS, C. A.; BERGMANN, J.; VERBRUGGEN, E.; VERESOGLOU, S. D.; LEHMANN, A. Plant root and mycorrhizal fungal traits for understanding soil aggregation. *New Phytol.*, v. 205, p. 1385-1388, 2015.
- RILLIG, M. C.; MULLER, L. A. H.; LEHMANN, A. Soil aggregates as massively concurrent evolutionary incubators. *ISME J.*, v. 11, p. 1943-1948, 2017. doi: 10.1038/ismej.2017.56.
- RITZ, K.; BLACK, H. I. J.; CAMPBELL, C. D.; et al. Selecting the Biological Indicators for Monitoring Soils: A Framework for Balancing Scientific and Technical Opinion to Assist Policy Development. *Ecological Indicators*, v. 9, p. 1212-1221, 2009.
- ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. A. Fracionamento Físico do Solo em Estudos da Matéria Orgânica. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2002. 86 p.
- SADEGHPUR, A.; JAHANZAD, E.; ESMAEILI, A.; HOSSEINI, M.; HASHEMI, M. Forage yield, quality and economic benefit of intercropped barley and annual medic in semi-arid conditions: additive series. *Field Crops Res.*, v. 148, p. 43-48, 2013. doi: 10.1016/j.fcr.2013.03.021.
- SANTANA, M. M.; DIAS, T.; GONZALEZ, J. M.; CRUZ, C. Transformation of Organic and Inorganic Sulfur—Adding Perspectives to New Players in Soil and Rhizosphere. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 160, 2021.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. Sistema brasileiro de classificação de solos, 5th edn. Embrapa, Brasília, 2018.
- SHU, X.; ZOU, Y.; SHAW, L. J.; TODMAN, L.; TIBBETT, M.; SIZMUR, T. Cover crop residue diversity enhances microbial activity and biomass with additive effects on microbial structure. *Soil Research*, v. 60, n. 4, p. 349-359, 2021.
- SILVA, L. S.; SANTOS LAROCA, J. V.; COELHO, A. P.; GONÇALVES, E. C.; GOMES, R. P.; PACHECO, L. P.; C. L. Does grass-legume intercropping change soil

- quality and grain yield in integrated crop-livestock systems? *Applied Soil Ecology*, v. 170, 104257, 2022.
- SINGER, M. J.; WARKENTIN, B. P. Soil in an Environmental Context: An American Perspective. *Catena*, v. 27, p. 179-189, 1996.
- SINGH, N. R.; KUMAR, D.; HANDA, A. K.; et al. Land Use Effect on Soil Organic Carbon Stocks, Microbial Biomass, and Basal Respiration in Bundelkhand Region of Central India. *Agricultural Research*, v. 11, p. 454-464, 2022.
- SOIL SURVEY STAFF. *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC, 2014.
- SOONG, J. L.; FUCHSLUEGER, L.; MARAÑÓN-JIMENEZ, S.; et al. Microbial Carbon Limitation: The Need for Integrating Microorganisms into Our Understanding of Ecosystem Carbon Cycling. *Global Change Biology*, v. 26, p. 1953-1961, 2020.
- SOUSA D. M. G.; LOBATO E. Cerrado: Correção do solo e adubação. Embrapa informação tecnológica. Brasília-DF, 2004.
- SOUZA, E. D. D.; COSTA, S. E. V. G. A.; ANGHINONI, I.; et al. Biomassa Microbiana do Solo em Sistema de Integração Lavoura-Pecuária em Plantio Direto, Submetido a Intensidades de Pastejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 79-88, 2010.
- SPOHN, M.; BAGCHI, S.; BIEDERMAN, L. A.; et al. The positive effect of plant diversity on soil carbon depends on climate. *Nat Commun*, v. 14, 6624, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42340-0>.
- TEDESCO, M.; et al. *Análises de solo, plantas e outros materiais*. 2 ed. rer. e ampl. Porto Alegre: Departamento de Solos, 1995.
- TIAN, Q.; ZHANG, X.; YI, H.; LI, Y.; XU, X.; HE, J.; HE, L. Plant diversity drives soil carbon sequestration: Evidence from 150 years of vegetation restoration in the temperate zone. *Frontiers in Plant Science*, v. 14, 1191704, 2023.
- TILMAN, D. The Ecological Consequences of Changes in Biodiversity: A Search for General Principles. *Ecology*, v. 80, p. 1455-1474, 1999.
- TILMAN, D.; KNOPS, J.; WEDIN, D.; REICH, P.; RITCHIE, M.; SIEMANN, E. The Influence of Functional Diversity and Composition on Ecosystem Processes. *Science*, v. 277, p. 1300-1302, 1997.
- UMER, M. I.; RAJAB, S. M. Correlation between aggregate stability and microbiological activity in two Russian soil types. *Eurasian journal of soil science*, v. 1, n. 1, p. 45-50, 2012.

- URGOITI, J.; et al. No complementarity no gain—Net diversity effects on tree productivity occur once complementarity emerges during early stand development. *Ecol. Lett.*, v. 25, p. 851-862, 2022.
- VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; BARDGETT, R. D.; VAN STRAALLEN, N. M. The Unseen Majority: Soil Microbes as Drivers of Plant Diversity and Productivity in Terrestrial Ecosystems. *Ecology Letters*, v. 11, p. 296-310, 2008.
- VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; KLIRONOMOS, J. N.; URSIC, M.; et al. Mycorrhizal Fungal Diversity Determines Plant Biodiversity, Ecosystem Variability, and Productivity. *Nature*, v. 396, p. 69-72, 1998.
- VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; SCHEUBLIN, T. R. Functional Traits in Mycorrhizal Ecology: Their Use for Predicting the Impact of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities on Plant Growth and Ecosystem Functioning. *New Phytologist*, v. 174, p. 244-250, 2007.
- VAN DER WERF, W.; BIANCHI, F. Options for Diversifying Agricultural Systems to Reduce Pesticide Use: Can We Learn from Nature? *Outlook on Agriculture*, v. 51, p. 105-113, 2022.
- VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.*, v. 19, p. 703-707, 1987.
- VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma Visão sobre Qualidade do Solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p. 743-755, 2009.
- VILLÉGER, S.; MASON, N. W. H.; MOUILLOT, D. New Multidimensional Functional Diversity Indices for a Multifaceted Framework in Functional Ecology. *Ecology*, v. 89, p. 2290-2301, 2008.
- VIVES-PERIS, V.; DE OLLAS, C.; GÓMEZ-CADENAS, A.; MUÑOZ, E.; VICENTE, O. Root Exudates: From Plant to Rhizosphere and Beyond. *Plant Cell Reports*, v. 39, p. 3-17, 2020.
- WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.), *Applications of Soil Physics*. Academic Press, New York, pp. 319-344, 1980.
- WILLIAMS, A.; LANGRIDGE, H.; STRAATHOF, A. L.; et al. Root Functional Traits Explain Root Exudation Rate and Composition across a Range of Grassland Species. *Journal of Ecology*, v. 110, p. 21-33, 2022.

WITZGALL, K.; VIDAL, A.; SCHUBERT, D. I.; et al. Particulate Organic Matter as a Functional Soil Component for Persistent Soil Organic Carbon. *Nature Communications*, v. 12, p. 4115, 2021.

YU, Z.; ZHENG, Y.; ZHANG, J.; et al. Importance of Soil Interparticle Forces and Organic Matter for Aggregate Stability in a Temperate Soil and a Subtropical Soil. *Geoderma*, v. 362, 2020.

ZHANG, J.; VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; ZHANG, F.; BENDER, S. F. Soil Biodiversity and Crop Diversification are Vital Components of Healthy Soils and Agricultural Sustainability. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, v. 7, p. 236, 2020.

ANEXO 1

Anexo 1 – Imagens da área experimental, plantas utilizadas e parcelas do experimento localizada na Fazenda Guarita em Rondonópolis/MT.



ANEXO 2

Anexo 2 – Imagens de implantação do experimento com a temática de diversidade funcional em sistemas pastoris localizada na Fazenda Guarita em Rondonópolis/MT.



ANEXO 3

Anexo 3 – Imagens de análises de raízes do experimento com a temática de diversidade funcional em sistemas pastoris localizada na Fazenda Guarita em Rondonópolis/MT.



