



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DOUTORADO EM AGRONOMIA**

CAMILA DIAS PINAFFI

**ADUBAÇÃO NITROGENADA MINERAL E FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE N EM
SISTEMAS DE PRODUÇÃO PASTAGEM-SOJA**

Presidente Prudente - SP
2021



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DOUTORADO EM AGRONOMIA**

CAMILA DIAS PINAFFI

**ADUBAÇÃO NITROGENADA MINERAL E FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE N EM
SISTEMAS DE PRODUÇÃO PASTAGEM-SOJA**

Tese apresentada à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade do Oeste Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Agronomia – Área de concentração: Produção Vegetal.

Orientador: Carlos Henrique dos Santos

Presidente Prudente - SP
2021

631.84
P645a

Pinaffi, Camila Dias.

Adubação nitrogenada mineral e fixação biológica de N em sistemas de produção pastagem-soja / Camila Dias Pinaffi. – Presidente Prudente, 2021.
149 f.: il.

Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade do Oeste Paulista – Unoeste, Presidente Prudente, SP, 2021.

Bibliografia.

Orientador: Carlos Henrique dos Santos.

1. Sistema de Semeadura Direta. 2. Integração Lavoura-pecuária. 3. Atividade Biológica. 4. Emissão de CO₂. 5. Volatilização de NH₃. 6. Eficiência do uso do N. 7. Atividade Fisiológica. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "ADUBAÇÃO NITROGENADA MINERAL E FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE N EM SISTEMA DE PRODUÇÃO PASTAGEM-SOJA"

AUTOR(A): CAMILA DIAS PINAFFI

ORIENTADOR(A): Carlos Henrique dos Santos

Aprovado(a) como parte das exigências para obtenção do título de DOUTOR em AGRONOMIA

Área de Concentração PRODUÇÃO VEGETAL, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Fábio Fernando de Araújo

UNOESTE - Universidade do Oeste Paulista / Presidente Prudente (SP)

Prof. Dr. José Eduardo Creste

UNOESTE - Universidade do Oeste Paulista / Presidente Prudente (SP)

Prof. Dr. João Domingos Rodrigues

IB/UNESP - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho / Botucatu (SP)

Prof. Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues

Instituto Federal Goiano / Rio Verde (GO)

Prof. Dr. Carlos Henrique dos Santos

UNOESTE - Universidade do Oeste Paulista / Presidente Prudente (SP)

Presidente Prudente, 02 de Março de 2021.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, por serem minha base, meu alicerce, meus exemplos de vida, dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me sustentado e estar à frente da minha vida.

Aos meus pais, Lourival Pinaffi e Fátima Pinaffi, por todo amor e educação que me dedicaram e por me apoiarem na concretização de mais um sonho. Ao meu pai, um grande exemplo de produtor rural, agradeço ainda pela sua essencial colaboração na coleta de dados deste trabalho e ensinamentos do campo passados durante esta jornada. Incluo aqui, a minha irmã, Beatriz Pinaffi, por também representar um grande exemplo na minha vida, por me ajudar e me incentivar na busca dos meus sonhos. Eu amo vocês!

Ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Henrique dos Santos, por estar comigo desde a graduação, contribuindo valiosamente para minha formação acadêmica, profissional e pessoal, sendo uma grande inspiração para mim. Agradeço pela oportunidade, confiança, dedicação, competência, amizade e colaboração na realização de mais um estudo.

Aos alunos da graduação do curso de Agronomia e Engenharia Ambiental e Sanitária da UNOESTE que tanto me ajudaram nas coletas em campo, avaliações e análises laboratoriais. Vocês foram peças chave deste trabalho. Muito obrigada!

Aos funcionários laboratórios do Bloco Q e da Fazenda Experimental da Universidade que deram todo o suporte necessário.

Ao meu namorado André Vinícius Fadin Lima, por estar sempre ao meu lado, pelo apoio na realização dos meus objetivos, por me ouvir, aconselhar e me ajudar.

Aos grandes amigos que o programa de pós-graduação em Agronomia me proporcionou. Flávia Mignacca, Carol Honorato, Bruna Coelho, Marcello Statello, Carol Cabral, Viviane Cacefo e Ana Carolina Moreira, agradeço muito a vocês por compartilharmos momentos de descontração, alegria, estudos. Vocês tornaram essa etapa da minha vida mais leve e feliz.

Agradeço, enfim, a todos aqueles que me apoiaram durante esta etapa.

Este trabalho foi realizado como parte do NUCLEUS: um centro virtual de pesquisa para oferecer maior eficiência do uso de nitrogênio por meio de uma abordagem de sistemas integrados solo-planta para o Reino Unido e o Brasil. Financiado no Brasil pela FAPESP - Fundação de Pesquisa de São Paulo [Bolsa

2015/50305-8], FAPEG - Fundação de Pesquisa de Goiás [Bolsa 2015-10267001479], e FAPEMA - Fundação de Pesquisa do Maranhão [Bolsa RCUK-02771/16] e no Reino Unido por BBSRC/Newton Fund [BB/N013201/1]. Agradeço à Fundação Agrisus - Agricultura Sustentável (Proc. PA 2511/18) pelo apoio financeiro.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – (Brasil) CAPES – Código de Financiamento 001.

*“Consagre ao Senhor tudo o que você faz,
e os seus planos serão bem-sucedidos.”*

Provérbios 16:3

RESUMO

Adubação nitrogenada mineral e fixação biológica de N em sistemas de produção pastagem-soja

Sistemas integrados associados com manejos de adubação e fixação biológica de N são de grande importância para ciclagem de nutrientes, refletindo no aumento de produtividade das culturas e conservação do solo. O objetivo do estudo foi avaliar a influência do sistema de integração lavoura-pecuária com consórcio de leguminosas e adubação nitrogenada na pastagem, nas características químicas e microbiológicas do solo, e parâmetros fisiológicos da planta. O experimento foi conduzido em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico argilúvico, com delineamento em blocos casualizados, com quatro tratamentos: capim mombaça (*Panicum maximum* cv. Mombaça), com aplicação de nitrogênio (M+N); capim mombaça, sem aplicação de nitrogênio (M-N); capim mombaça, em consórcio com a leguminosa feijão guandu (*Cajanus cajan*) (M+G); e capim mombaça, em consórcio com a leguminosa java (*Macrotyloma axillare* cv. Java) (M+J), e quatro repetições. Foram cultivadas pastagem e soja em três safras consecutivas, sendo coletadas amostras de solo no início e final de cada cultivo para análises químicas e microbiológicas. A volatilização de NH₃ e emissão de CO₂ foram avaliadas a cada 15 dias durante o experimento, sendo registradas simultaneamente a umidade e temperatura do solo. Foram coletados quarenta trifólios da soja do estágio vegetativo (V5) e reprodutivo (R3) para as análises fisiológicas de carboidratos, proteínas, aminoácidos, ureídeos, clorofila, atividade da enzima urease e nitrogênio. Também foi avaliada a produtividade de grãos da soja. O consórcio com as leguminosas (M+G e M+J) ao longo dos anos de manejo contribuiu para aumentar o estoque de carbono e nitrogênio da biomassa microbiana, atividade das enzimas desidrogenase e urease. Os maiores estoques de C ocorreram na superfície do solo e durante a cultura das gramíneas, proporcionalmente às menores emissões de CO₂. As maiores emissões de CO₂ estão associadas às mudanças na umidade do solo, com correlação positiva entre a umidade e o fluxo de CO₂ do solo. Os maiores estoques de N ocorreram na superfície do solo e durante a cultura da soja, proporcionalmente à menor volatilização de NH₃. Durante as três safras avaliadas houve aumento do teor de N total, carboidratos, clorofila, aminoácidos livres totais e atividade da enzima urease nas folhas de soja, demonstrando a melhoria na resposta fisiológica da soja, especialmente nos manejos M+N e M+J. A FBN da cultura foi capaz de suprir à exigência da soja em N. A adubação nitrogenada na pastagem reduziu a produção de ureídeos na soja, porém incrementou a produtividade de grãos. Introduzir no sistema de produção a integração com a pastagem adubada e em consórcio com leguminosas trouxe grandes ganhos na produtividade de grãos da soja e na fisiologia da planta.

Palavras-chave: Sistema de Semeadura Direta. Integração Lavoura-pecuária. Atividade Biológica. Emissão de CO₂. Volatilização de NH₃. Eficiência do uso do N. Atividade Fisiológica.

ABSTRACT

Mineral nitrogen fertilization and biological N correction in soybean pasture production systems

Integrated systems associated with fertilization management and biological N fixation are of great importance for nutrient cycling, reflecting the increase in crop productivity and soil conservation. The objective of the study was to evaluate the influence of the crop-livestock integration system with a consortium of legumes and nitrogen fertilization in the pasture, in the chemical and microbiological characteristics of the soil, and physiological parameters of the plant. The experiment was carried out in a dystrophic Red-Yellow Latosol, with a randomized block design, with four treatments: mombaça grass (*Panicum maximum* cv. Mombaça), with nitrogen application (M+N); mombaça grass, without nitrogen application (M-N); mombaça grass, in consortium with the pigeon pea legume (*Cajanus cajan*) (M+G); and mombaça grass, in consortium with the legume java (*Macrotyloma axillare* cv. Java) (M+J), and four replications. Pasture and soybeans were cultivated in three consecutive harvests, and soil samples were collected at the beginning and end of each cultivation for chemical and microbiological analysis. The volatilization of NH₃ and CO₂ emission were evaluated every 15 days during the experiment, simultaneously recording soil moisture and temperature. Forty trifoliolate soybeans from the vegetative (V5) and reproductive (R3) stages were collected for physiological analyzes of carbohydrates, proteins, amino acids, ureids, chlorophyll, urease and nitrogen enzyme activity. The soybean grain yield was also evaluated. The consortium with legumes (M+G and M+J) over the years of management has contributed to increase the carbon and nitrogen stock of microbial biomass, activity of the enzymes dehydrogenase and urease. The highest C stocks occurred on the soil surface and during the cultivation of grasses, in proportion to the lower CO₂ emissions. The highest CO₂ emissions are associated with changes in soil moisture, with a positive correlation between moisture and soil CO₂ flow. The largest stocks of N occurred on the soil surface and during soybean cultivation, in proportion to the lower volatility of NH₃. During the three evaluated harvests there was an increase in the total N content, carbohydrates, chlorophyll, total free amino acids and urease enzyme activity in soybean leaves, demonstrating the improvement in the physiological response of soybeans, especially in the M+N and M+J managements. The FBN of the crop was able to meet the soybean requirement in N. The nitrogen fertilization in the pasture reduced the production of ureids in the soybean, but increased the grain yield. Introducing in the production system the integration with the fertilized pasture and in consortium with legumes, brought great gains in the soybean grain productivity and in the plant physiology.

Keywords: No-till System. Crop-livestock Integration. Biological Activity. CO₂ Emission. Volatilization of NH₃. N use Efficiency. Physiological Activity.

LISTA DE SIGLAS

AAST	– Aminoácidos Livres Totais
AST	– Açúcares Solúveis Totais
ATP	– Adenosina Trifosfato
BMS	– Biomassa Microbiana do Solo
CBMS	– Carbono da Biomassa Microbiana do Solo
CHL	– Clorofila
COT	– Carbono Orgânico Total
COS	– Carbono Orgânico do Solo
CTC	– Capacidade de Troca de Cátions
ECT	– Estoque de Carbono Orgânico Total
ENT	– Estoque de Nitrogênio Total
FBN	– Fixação Biológica de Nitrogênio
GEE	– Gases do Efeito Estufa
ILP	– Integração Lavoura-Pecuária
MOS	– Matéria Orgânica do Solo
MF	– Massa Fresca
MS	– Matéria/Massa Seca
NBMS	– Nitrogênio da Biomassa Microbiana do Solo
NT	– Nitrogênio Total
PD	– Plantio Direto
PRNT	– Poder Relativo Neutralizante Total
PST	– Proteínas Solúveis Totais
Qmic	– Quociente Microbiano
SB	– Soma de Bases
V	– Saturação por Bases

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1 -	Condições climáticas registradas na Fazenda Experimental e períodos de coleta de amostras de solo durante os anos de manejo.....	53
Figura 2 -	Balanco hídrico obtido durante os anos de manejo.....	54
Figura 3 -	Estoque de carbono total (ECT) do solo durante a pastagem 2017, soja 2017-2018, pastagem 2018, soja 2018-2019, pastagem 2019 e soja 2019-2020, nas profundidades de 0-10 cm (a) e 10-20 cm (b).....	61
Figura 4 -	Estoque de nitrogênio total (ENT) do solo durante a pastagem 2017, soja 2017-2018, pastagem 2018, soja 2018-2019, pastagem 2019 e soja 2019-2020, nas profundidades de 0-10 cm (a) e 10-20 cm (b).....	62
Figura 5 -	Relação C/N do solo durante a pastagem 2017, soja 2017-2018, pastagem 2018, soja 2018-2019, pastagem 2019 e soja 2019-2020, nas profundidades de 0-10 cm (a) e 10-20 cm (b).....	64
Figura 6 -	Carbono da biomassa microbiana do solo (CBMS) durante a pastagem 2017, soja 2017-2018, pastagem 2018, soja 2018-2019, pastagem 2019 e soja 2019-2020, nas profundidades de 0-10 cm (a) e 10-20 cm (b).....	66
Figura 7 -	Quociente microbiano do solo (Qmic) durante a pastagem 2017, soja 2017-2018, pastagem 2018, soja 2018-2019, pastagem 2019 e soja 2019-2020, nas profundidades de 0-10 cm (a) e 10-20 cm (b).....	68
Figura 8 -	Nitrogênio da biomassa microbiana do solo (NBMS) durante a pastagem 2017, soja 2017-2018, pastagem 2018, soja 2018-2019 e pastagem 2019 e soja 2019-2020, nas profundidades de 0-10 cm (a) e 10-20 cm (b).....	69
Figura 9 -	Atividade das enzimas desidrogenase (a) e urease do solo (b) durante a pastagem 2017, soja 2017-2018, pastagem 2018, soja 2018-2019, pastagem 2019 e soja 2019-2020, na profundidade de 0-10 cm.....	71
Figura 10 -	Correlação entre estoque de carbono total (ECT) e atividade da enzima urease do solo durante a pastagem 2018.....	74

CAPÍTULO II

Figura 1 -	Condições climáticas registradas na Fazenda Experimental e períodos de coleta de amostras de solo durante os anos de manejo.....	83
Figura 2 -	Balanço hídrico obtido durante os anos de manejo.....	84
Figura 3 -	Estoque de carbono total (ECT) do solo durante a pastagem 2017 (a), soja 2017-2018 (b), pastagem 2018 (c), soja 2018-2019 (d), pastagem 2019 (e) e soja 2019-2020 (f).....	89
Figura 4 -	Emissão de CO ₂ do solo durante a pastagem 2017, soja 2017-2018, pastagem 2018, soja 2018-2019, pastagem 2019 e soja 2019-2020.....	92
Figura 5 -	Correlação entre fluxo de CO ₂ e umidade do solo nos manejos: M + N (a); M - N (b); M + G (c) e M + J (d).....	94
Figura 6 -	Estoque de nitrogênio total (ENT) do solo durante a pastagem 2017 (a), soja 2017-2018 (b), pastagem 2018 (c), soja 2018-2019 (d), pastagem 2019 (e) e soja 2019-2020 (f).....	96
Figura 7 -	Volatilização de NH ₃ do solo durante a pastagem 2017, soja 2017-2018, pastagem 2018, soja 2018-2019, pastagem 2019 e soja 2019-2020.....	98

CAPÍTULO III

Figura 1 -	Condições climáticas registradas na Fazenda Experimental e períodos de coleta de trifólios da soja, durante os anos de manejo.....	109
Figura 2 -	Balanço hídrico obtido durante os anos de manejo.....	110

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1 -	Caracterização química do solo da área experimental, 2017.....	51
Tabela 2 -	Análise granulométrica da área experimental, 2017.....	52

CAPÍTULO II

Tabela 1 -	Caracterização química do solo da área experimental, 2017.....	82
Tabela 2 -	Análise granulométrica da área experimental, 2017.....	82

CAPÍTULO III

Tabela 1 -	Análise granulométrica da área experimental, 2017.....	108
Tabela 2 -	Caracterização química do solo da área experimental, 2017.....	108
Tabela 3 -	Teor de carboidratos na soja, safra 2017-2018, 2018-2019, 2019-2020.....	117
Tabela 4 -	Teor de carboidratos na soja em função dos estádios fenológicos.....	118
Tabela 5 -	Teor de proteínas solúveis totais na soja, safra 2017-2018, 2018-2019, 2019-2020.....	119
Tabela 6 -	Teor de proteínas solúveis totais na soja em função dos estádios fenológicos.....	119
Tabela 7 -	Teor de aminoácidos livres totais na soja, safra 2017-2018, 2018-2019, 2019-2020.....	120
Tabela 8 -	Teor de aminoácidos livres totais na soja em função dos estádios fenológicos.....	122
Tabela 9 -	Teor de ureídeos na soja, safra 2017-2018, 2018-2019, 2019-2020.....	123
Tabela 10 -	Teor de ureídeos na soja em função dos estádios fenológicos....	124
Tabela 11 -	Atividade da enzima urease na soja, safra 2017-2018, 2018-2019, 2019-2020.....	125
Tabela 12 -	Atividade da enzima urease na soja em função dos estádios fenológicos.....	126
Tabela 13 -	Teor de clorofila total na soja, safra 2017-2018, 2018-2019, 2019-2020.....	127
Tabela 14 -	Teor de clorofila total na soja em função dos estádios fenológicos.....	128
Tabela 15 -	Teor de N total nos trifólios da soja, safra 2017-2018, 2018-2019, 2019-2020.....	128
Tabela 16 -	Teor de N total nos trifólios da soja em função dos estádios fenológicos.....	129
Tabela 17 -	Produtividade de grãos da soja, safras 2017-2018, 2018-2019 e	

	2019-2020.....	129
Tabela 18 -	Teor de N total, carboidratos, clorofila, aminoácidos, ureídeos, proteínas, atividade da enzima urease nos trifólios e produtividade de grãos da soja em função das safras avaliadas.	132

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	17
1.1 Integração lavoura-pecuária com plantio direto	18
1.2 Consórcio de gramíneas com leguminosas	19
1.2.1 Feijão Guandu (<i>Cajanus Cajan</i>).....	21
1.2.2 <i>Macrotyloma Axillare</i> cv. Java	21
1.3 Dinâmica da matéria orgânica no solo	22
1.4 Dinâmica da biomassa microbiana no solo	23
1.5 Efeitos da atividade enzimática no solo	25
1.6 Dinâmica do nitrogênio no solo	26
1.7 Estoques de carbono e nitrogênio no solo	28
1.8 Emissões de dióxido de carbono do solo	30
1.9 Volatilização de amônia do solo para atmosfera	31
1.10 Características da cultura da soja	34
1.10.1 Fatores que interferem no desenvolvimento, fisiologia e produção da soja ...	35
REFERÊNCIAS	36
2 CAPÍTULO I: ATIVIDADE MICROBIANA DO SOLO EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA COM MANEJO DA ADUBAÇÃO NITROGENADA MINERAL E FBN NA PASTAGEM E SUCESSÃO COM SOJA NO VERÃO	49
2.1 INTRODUÇÃO	50
2.2 Material e métodos	51
2.2.1 Descrição da área experimental.....	51
2.2.2 Delineamento experimental e caracterização dos manejos	55
2.2.3 Análise química das amostras de solo	57
2.2.3.1 Estoque de C e N total do solo.....	58
2.2.3.2 Quantificação do C e N da biomassa microbiana do solo	58
2.2.3.3 Determinação da atividade da enzima desidrogenase do solo	59
2.2.3.4 Análise da atividade da enzima urease no solo	59
2.2.4 Análise estatística	59
2.4 Resultados e discussão	60
2.4 CONCLUSÃO	74
REFERÊNCIAS	75
3 CAPÍTULO II: ESTOQUE DE C E N NO SOLO E EMISSÃO DE CO₂ E NH₃ EM SISTEMA DE PRODUÇÃO PASTAGEM-SOJA MANEJADO COM NITROGÊNIO MINERAL E CONSORCIAÇÃO DE LEGUMINOSAS NA PASTAGEM	79
3.1 INTRODUÇÃO	80
3.2 Material e métodos	82
3.2.1 Descrição da área experimental.....	82
3.2.2 Delineamento experimental e caracterização dos manejos	85
3.2.3 Determinação do estoque de C e N total do solo	86
3.2.4 Emissão de dióxido de carbono (CO ₂) do solo	86

3.2.5 Volatilização de amônia (NH ₃) do solo	87
3.2.6 Análise estatística	87
3.3 Resultados e discussão.....	88
3.4 CONCLUSÃO	99
REFERÊNCIAS.....	100
4 CAPÍTULO III: PARÂMETROS FISIOLÓGICOS E PRODUTIVIDADE DA SOJA CULTIVADA EM SUCESSÃO À PASTAGEM MANEJADA COM ADUBAÇÃO NITROGENADA MINERAL E CONSORCIADA COM LEGUMINOSAS	105
4.1 INTRODUÇÃO	106
4.2 Material e métodos.....	107
4.2.1 Localização da área experimental.....	107
4.2.2 Delineamento experimental e caracterização dos manejos	111
4.2.3 Determinação dos parâmetros fisiológicos das amostras de plantas.....	112
4.2.3.1 Determinação de açúcares solúveis totais nas folhas da soja	112
4.2.3.2 Quantificação de proteínas solúveis totais nas folhas da soja	113
4.2.3.3 Determinação de aminoácidos livres totais nas folhas da soja	113
4.2.3.4 Quantificação de ureídeos nas folhas da soja.....	114
4.2.3.5 Atividade da enzima urease nas folhas da soja	115
4.2.3.6 Determinação de pigmentos nas folhas da soja.....	115
4.2.3.7 Determinação do n nos trifólios da soja.....	116
4.2.4 Produtividade de grãos da cultura da soja	116
4.2.5 Análise estatística	116
4.3 Resultados e discussão.....	116
4.4 CONCLUSÃO	132
REFERÊNCIAS.....	133
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	139
ANEXO A - IMAGENS	140

1 INTRODUÇÃO GERAL

No Brasil, o avanço da agricultura em solos arenosos é uma realidade devido ao menor custo de aquisição da área, à redução da abertura de novas áreas em solos argilosos ocupados por florestas nativas ou à necessidade de recuperação de pastagens com sinais de degradação usando o sistema de integração lavoura-pecuária.

Os solos arenosos são caracterizados por sua baixa fertilidade e baixa capacidade de fornecer nutrientes às plantas. Assim, o cultivo nesses solos tem sido contestado quanto à viabilidade técnica, econômica e ambiental, o que, em muitos casos, recomenda-se que não sejam utilizados com culturas anuais, principalmente devido aos riscos de compactação superficial, processos erosivos, déficit hídrico, baixa retenção de umidade e perda de fertilizantes (CASTRO; HERNANI, 2015). No entanto, a adoção de práticas agronômicas, como o uso de sistemas de consorciação, pode promover a ciclagem de nutrientes e melhorar o potencial de produção de solos arenosos (MORAIS *et al.*, 2020). O sistema de integração lavoura-pecuária com plantio direto também é uma forma de viabilizar o uso e a conservação desses solos, pois mantém o solo sempre coberto de plantas, contribui para maiores teores de matéria orgânica do solo, melhora a nutrição das plantas através de ciclagem de nutrientes, particularmente pelo acoplamento dos ciclos de nitrogênio (N) e carbono (C), favorecendo o fluxo e armazenamento de água, elevando a qualidade do solo (RYSCHAWY *et al.*, 2017), e proporcionando a redução da compactação e temperatura do solo.

Entretanto, condições tropicais e com baixo teor de argila favorecem a rápida decomposição da matéria orgânica do solo (MOS) (GMACH *et al.*, 2020), dessa forma, é difícil aumentar os níveis de MOS, devido à alta atividade microbiana e menor proteção física e química da MOS, tornando-a mais vulnerável à degradação. Isso requer um suprimento alto e constante de matéria seca (MS), C e N no solo (HATI *et al.*, 2020).

O N é um elemento extremamente importante para melhorar esse ambiente de produção, sendo o mais acumulado pelas plantas, responsável direto no crescimento destes, sendo o constituinte de aminoácidos, amidas, proteínas, clorofila, ácidos nucleicos, coenzimas e hexoaminas (TAIZ *et al.*, 2017). Entretanto,

o N no solo é muito dinâmico, sendo afetado pelas condições climáticas e do solo. Por exemplo, as perdas de N por volatilização ocorrem na hidrólise enzimática da ureia no solo, com a produção de amônia (NH_3) (WANG *et al.*, 2020); além disso, durante o ciclo do N existe o processo de amonificação, o qual também é responsável pela liberação de NH_3 .

No entanto, com o aumento dos níveis de N na fração orgânica, é possível reduzir essas perdas. A rotação de culturas é amplamente utilizada em sistemas de plantio direto, que inclui plantas de decomposição lenta com alto potencial de produção de matéria seca, como gramíneas, e leguminosas, que atuam na fixação biológica de nitrogênio (FBN), estratégia para aumentar o N do solo, e têm uma decomposição mais rápida (ROSOLEM; LI; GARCIA, 2016; CALONEGO *et al.*, 2017), atuando diretamente na ciclagem de nutrientes, sendo este sistema também utilizado em pastagens. O cultivo com leguminosas comparado ao uso de fertilizantes nitrogenados pode reduzir as perdas de N do solo por meio da lixiviação e volatilização (LI *et al.*, 2016), bem como reduzir as emissões de gases do efeito estufa (GEE), como CO_2 , através da respiração (BARNEZE *et al.*, 2019), e consequentemente proporcionar aumentos no armazenamento de C e N no solo (WU *et al.*, 2017). A adição e estabilização de C aos solos pode não apenas mitigar as emissões de CO_2 , mas também beneficiar a produtividade agrícola por meio de melhorias na qualidade do solo (HATI *et al.*, 2020).

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar as emissões de CO_2 e NH_3 do solo e sua relação com os fatores edafoclimáticos, bem como com estoques de C e N no solo, atributos microbiológicos do solo e sua relação com a produtividade de soja em sistema integração lavoura-pecuária, com o consórcio entre gramíneas e leguminosas na pastagem. Além disso, buscou-se estudar os atributos fisiológicos da soja para ajudar na compreensão dos efeitos dos manejos no desenvolvimento da cultura.

1.1 Integração lavoura-pecuária com plantio direto

A integração lavoura-pecuária (ILP) se constitui em sistema de produção que alterna, na mesma área, o cultivo de pastagens anuais ou perenes, destinadas à alimentação animal, e culturas destinadas à produção vegetal, sobretudo grãos

(BALBINOT JUNIOR *et al.*, 2009). Esses sistemas são caracterizados pelo desenvolvimento da produção animal e vegetal de forma concomitante ou sequencial, de modo a possibilitar o melhor aproveitamento do solo e de outros recursos ambientais, além de proporcionar benefícios econômicos (CARVALHO *et al.*, 2016).

A introdução deste sistema associado ao sistema de plantio direto (PD) pode influenciar a dinâmica de carbono (C) do solo, que por sua vez altera a quantidade e a qualidade da matéria orgânica do solo (MOS), a agregação do solo, as populações microbianas em quantidade e diversidade e a atividade enzimática do solo em diferentes graus (SARTO *et al.*, 2020). Além disso, contribui para a redução de custos devido ao menor aporte de insumos e diversificação no setor agropecuário, permitindo o aumento da renda e a redução de impactos ao meio ambiente, visando à sustentabilidade (LAROCCA *et al.*, 2018).

O uso combinado de plantio direto zero ou mínimo, incorporação de resíduos de culturas e rotação de culturas com leguminosas, foi recomendada em vários estudos anteriores como uma abordagem potencial para melhorar o estoque de nitrogênio (N) (MARTINSEN *et al.*, 2019; NAAB *et al.*, 2017; SWANEPOEL *et al.*, 2018), fósforo (P), potássio (K) (TOLESSA; DU PREEZ; CERONIO, 2014), umidade do solo (TERAVEST *et al.*, 2015), minimizar a perda de solo através da redução dos processos de escoamento e erosão (ARAYA *et al.*, 2011; GHOSH *et al.*, 2015; CONG; YIN; GU, 2016) e melhorar a capacidade de retenção de água no solo e a taxa de infiltração (DESROCHERS *et al.*, 2019). Além disso, a incorporação de resíduos de culturas é imprescindível para manter a saúde do solo, pois oferece impactos positivos em carbono orgânico do solo (COS), N, P e K (ALAM *et al.*, 2018; HUANG *et al.*, 2012; SINGH *et al.*, 2018).

1.2 Consórcio de gramíneas com leguminosas

As leguminosas são caracterizadas por sua capacidade de estabelecer interações simbióticas com bactérias fixadoras de nitrogênio (FBN), que ajudam na nutrição das plantas e adaptação a solos que oferecem diferentes restrições ambientais (ESCARAY *et al.*, 2012; GIBSON; KOBAYASHI; WALKER, 2008).

As misturas de gramíneas e leguminosas são comumente usadas para pastagem, porque oferecem o potencial de aumentar a produtividade com uma menor exigência de fertilizantes de nitrogênio (N). As leguminosas não apenas fornecem forragem de alta qualidade devido ao seu alto teor de proteínas (MORTENSON; SCHUMAN; INGRAM, 2004), mas também promovem a fixação simbiótica de N₂, produzindo mais proteína com menor entrada de N mineral (SUTER *et al.*, 2015). A incorporação de leguminosas é essencial para implementar e integrar a conservação e melhoria da saúde, qualidade e fertilidade do solo com diversos aspectos da produção agrícola e pecuária nos sistemas agrícolas (KUMAR *et al.*, 2020).

Além da capacidade de contribuir com N para os ecossistemas naturais e agrícolas, as leguminosas podem induzir a solubilização e o acúmulo de outros nutrientes minerais na rizosfera e nos órgãos vegetais acima do solo (DAKORA; PHILIPS, 2002; XUE *et al.*, 2016; DARCH *et al.*, 2018). A maior disponibilidade e acúmulo de nutrientes minerais é causada em grande parte por alterações no pH da rizosfera e na exsudação dos intermediários do ciclo Krebs pelas raízes das leguminosas. A acidificação da rizosfera de plantas de leguminosas, cultivadas sozinhas, consorciadas com não-leguminosas ou em rotação com outras culturas, pode resultar na solubilização de uma variedade de elementos nutricionais (XUE *et al.*, 2016; STAGNARI *et al.*, 2017). A mobilização de nutrientes minerais na rizosfera geralmente leva ao aumento da absorção e acúmulo nos órgãos das plantas.

As leguminosas podem reduzir a emissão de gases de efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO₂) e óxido nitroso (N₂O), em comparação com sistemas agrícolas baseados na fertilização mineral com N, o que representa um papel importante no sequestro de carbono nos solos, reduzindo a entrada geral de energia fóssil no sistema (STAGNARI *et al.*, 2017).

Os sistemas baseados em leguminosas melhoram vários aspectos da fertilidade do solo, como o conteúdo de COS e a disponibilidade de N e P (JENSEN *et al.*, 2012). Dentre as espécies que podem ser utilizadas em consórcio, têm-se a leguminosa feijão guandu (*Cajanus cajan*) e a java (*Macrotyloma axillare* cv. Java), sendo que suas características serão detalhadas respectivamente.

1.2.1 Feijão guandu (*Cajanus cajan*)

O feijão guandu [*Cajanus cajan* (L.) Millspaugh] pertence à família Fabaceae, subfamília Faboideae. Leguminosa arbustiva, anual ou semiperene, é uma cultura importante para diversos países dos trópicos e subtropicais (VAN DER MAESEN, 1990). Constitui-se em uma das plantas de maior uso como adubação verde, pois além de ter relação simbiótica, é provida de um sistema radicular profundo e ramificado, que a torna capaz de resistir ao estresse hídrico e a possibilita romper camadas adensadas de solos, com bom potencial na absorção de água e possibilidade de retirada de nutrientes das camadas subsuperficiais liberando-os gradualmente nas camadas superficiais durante o processo de decomposição (ALVARENGA *et al.*, 1995; FAGERIA; BALIGAR; BAILEY, 2005). Devido a isso, o guandu é chamado de arado biológico, e tem se destacado com relação às melhorias na fertilidade do solo (ALCÂNTARA *et al.*, 2000).

1.2.2 *Macrotyloma axillare* cv. Java

Dentre as leguminosas forrageiras tropicais no Brasil encontra-se *Macrotyloma axillare* cv. Java, indicada para consorciação com gramíneas e também para cobertura vegetal, visando à recuperação de áreas degradadas. Essa nova cultivar foi obtida através do cruzamento artificial de dois cultivares de *Macrotyloma axillare*, Archer e Guatá. (SILVA *et al.*, 2007).

O java é uma leguminosa de ciclo perene e uma trepadeira volúvel, com folhas trifoliadas, com folíolos trifoliados, apresentando média de 6,1 cm de comprimento e 3,5 de largura. É uma planta adaptada ao clima tropical e subtropical, chega a produzir cerca de cinco a nove toneladas de matéria seca por hectare, por ano, com 18 a 23% de proteína bruta na matéria seca, sendo assim está sendo muito utilizada na dieta de bovinos. Apresenta como característica importante, a capacidade de fixar nitrogênio atmosférico no solo. Possui de média à baixa exigência em fertilidade do solo, alta persistência sob pastejo, consorcia-se bem com plantas de braquiária e do gênero *Panicum* (PAIVA *et al.*, 2008).

1.3 Dinâmica da matéria orgânica no solo

A matéria orgânica do solo (MOS) é formada por resíduos de animais, plantas e microrganismos em diferentes fases de decomposição, associada com partículas de argila e silte do solo, bem como, a minerais complexos. O principal constituinte da matéria orgânica é o carbono e seu conteúdo no solo é conduzido principalmente pelo balanço entre a entrada de material orgânico e a sua perda pelos processos de respiração do solo, erosão e eluviação (SIX *et al.*, 2006).

A MOS apresenta importante influência no comportamento dos solos, nos aspectos físicos, químicos e biológicos. Seus teores e características, decorrente das taxas de produção, alteração e decomposição de resíduos orgânicos, são dependentes de vários fatores, como temperatura, aeração, pH e disponibilidade de água e nutrientes, muitos deles condicionados pelo uso e manejo dos solos (NASCIMENTO *et al.*, 2010).

A decomposição da MOS é realizada, principalmente, por bactérias e fungos que compreendem mais de 90% da biomassa microbiana do solo porque os macro e meso organismos do solo são principalmente detritívoros; portanto, a comunidade microbiana heterotrófica é um fator chave para regular a dinâmica da MOS, controlando a disponibilidade de nutrientes e liberação ou acúmulo de carbono no solo (SIX *et al.*, 2006).

A MOS é imprescindível para a ciclagem de nutrientes, formação e estabilização de agregados (BRAIDA *et al.*, 2010), bem como, na retenção de umidade do solo. A proteção do carbono presente no solo pode contribuir na redução das emissões de CO₂ para a atmosfera, além de melhorar a qualidade do solo por aumentar a fonte de energia e alimento. Quando o material orgânico é adicionado ao solo nas diferentes formas (adubo verde, resíduos de cultivos, decomposição de raízes), as bactérias decompõem rapidamente os compostos mais facilmente degradáveis como açúcar, celulose, e nessa fase não há estabilização de carbono, mas praticamente CO₂, H₂O e minerais no solo (SIX; ELLIOT; PAUSTIAN, 2000).

A MOS é heterogênea e apresenta diferentes frações funcionais e biológicas variando dinâmica e quimicamente. Essas frações respondem de maneira distinta ao manejo do solo e as mudanças no uso da terra e podem ser classificadas em lábeis e estáveis (KELLEHER; SIMPSON; SIMPSON, 2006). A fração lábil consiste de alta

taxa de decomposição e um curto período de permanência no solo (meses ou alguns anos) e é considerada importante fonte de C (VON LÜTZOW *et al.*, 2007). Em contrapartida, a fração estável ou humificada, que representa cerca de 2/3 do C orgânico em áreas tropicais, com um tempo de permanência no solo que pode alcançar centenas de anos e sua principal função é atuar sobre as condições físicas e químicas do solo, além de ser importante dreno de C atmosférico (STEVENSON, 1994; FIGUEIREDO; RESCK; CARNEIRO, 2010).

1.4 Dinâmica da biomassa microbiana no solo

A biomassa microbiana do solo (BMS) é considerada a parte viva e mais ativa da matéria orgânica, constituída por fungos, bactérias e actinomicetos (JENKINSON; LADD, 1981), responsável por processos bioquímicos e biológicos no solo e sensivelmente alterada pelas condições impostas pelo meio (BALOTA *et al.*, 2003), excluindo-se a macrofauna e as raízes das plantas. A biomassa microbiana representa, em média, 2 % a 5% do C orgânico (JENKINSON; LADD, 1981) e 1 % a 5% do nitrogênio (N) total do solo (SMITH; PAUL, 1990).

A BMS controla funções importantes no solo, como a decomposição e o acúmulo de matéria orgânica, ou transformações envolvendo os nutrientes minerais. Por atuarem nos processos de mineralização/imobilização, os microrganismos do solo são considerados fonte e dreno de nutrientes (SINGH *et al.*, 1989), aos quais são continuamente assimilados durante os ciclos de crescimento dos diferentes organismos que compõem o ecossistema. Os solos que apresentam um elevado teor de biomassa microbiana são capazes não apenas de estocar, como também promover maior ciclagem de nutrientes no sistema (GREGORICH *et al.*, 1994; ARAÚJO; MONTEIRO, 2007; ALVES *et al.*, 2011).

A BMS funciona como um catalisador de relevantes transformações químicas que ocorrem no solo, sendo um importante reservatório de nutrientes para as plantas, justamente por fazer parte do componente lábil da matéria orgânica do solo e desempenhar atividade provocada pelas condições bióticas e abióticas, refletindo, dessa forma, na produtividade e na manutenção dos sistemas (CUNHA *et al.*, 2012).

Estimativas da biomassa microbiana podem ser usadas em estudos do fluxo de carbono e nitrogênio, ciclagem de nutrientes e produtividade das plantas em diferentes ecossistemas terrestres. Essas medidas permitem a quantificação da biomassa microbiana viva presente no solo em um determinado tempo. Pelo fato da biomassa microbiana constituir a maior parte da fração ativa da matéria orgânica, esta é mais sensível que o resultado quantitativo do carbono orgânico e nitrogênio total para aferir alterações na matéria orgânica causadas pelo manejo do solo e pelas práticas de cultivo (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008).

Correlações positivas entre a matéria orgânica e a biomassa microbiana do solo são comumente reportadas (ROSCOE; BODDEY; SALTON, 2006), dessa forma, a BMS reflete às mudanças do manejo do solo, atuando como uma medida mais sensível das alterações na matéria orgânica (MENDES *et al.*, 2003). Manejos que incluem sequências de culturas com alta produção de resíduos possibilitam aumento da biomassa e maior atividade microbiana, além dos benefícios da cobertura do solo e da maior disponibilidade de carbono orgânico (CATTELAN; VIDOR, 1990).

Além disso, em sistemas de manejo do solo em que são introduzidas gramíneas para pastejo ocorre maior presença de raízes, que promovem aumento na proporção de solo rizosférico. Quanto maior a quantidade dessas raízes, aliado ao corte da parte aérea, que provoca alta exsudação de compostos orgânicos (TISDALL; OADES, 1982), maior é o favorecimento da BMS, que utiliza esses compostos como fonte de C. Nesses sistemas de manejo ocorre adição de resíduos tanto vegetais como animais. Os resíduos vegetais são provenientes da cultura de interesse comercial e da pastagem, cujo maior ou menor aporte será em função da intensidade de pastejo adotada (SOUZA *et al.*, 2010).

A biomassa microbiana do solo é sensível às mudanças que ocorrem no ambiente edafoclimático, como as variações sazonais de umidade e temperatura, pelo manejo do solo, pelo cultivo e, também, pelos resíduos vegetais, por ser responsável pela transformação do material orgânico, pela ciclagem de nutrientes e o fluxo de energia no solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

1.5 Efeitos da atividade enzimática no solo

A atividade biológica no solo pode ser definida como toda reação bioquímica catalisada pelos organismos. As atividades enzimáticas estão relacionadas aos micro-organismos responsáveis por tal atividade. As enzimas participam da ciclagem de nutrientes ao catalisarem a mineralização de moléculas complexas em nutrientes que serão assimilados por outros organismos (TABATABAI, 1994).

Existem inúmeras enzimas no solo que podem se classificar como oxidoredutases, hidrolases, isomerases, liases e ligases, desempenhando funções bioquímicas essenciais no processo geral de conversão de energia e de material (GU *et al.*, 2009). Essas enzimas têm sido utilizadas para entender os processos ecológicos envolvidos com alteração da comunidade vegetal e das características físicas, químicas e biológicas do solo (SALAZAR *et al.*, 2011).

Dentre as enzimas presentes no solo, a medida da atividade da desidrogenase é bastante utilizada, pois reflete a atividade oxidativa total da microbiota do solo (DICK; TABATABAI, 1993). A enzima desidrogenase é representante da classe das oxirredutases, cuja atividade ocorre apenas em células vivas estando relacionada com os processos que ocorrem na cadeia transportadora de elétrons. A função dessa enzima está relacionada aos processos de oxidação, da cadeia respiratória dos microrganismos, na oxidação do material orgânico, transferindo e separando o hidrogênio, prótons e elétrons. A desidrogenase transfere o hidrogênio para o dinucleotídeo de nicotinamida e adenina (NAD) ou dinucleotídeo de nicotinamida e adenina fosfato (NADP) (ZHANG *et al.*, 2010).

A atividade da desidrogenase pode ser influenciada por diversos fatores ambientais, como as condições climáticas, umidade do solo, disponibilidade de oxigênio, teor de matéria orgânica, pH, potencial óxido-redução, profundidade do perfil do solo, contaminação por metais pesados e adubação do solo ou utilização de defensivos agrícolas (WOLIŃSKA; STĘPNIEWSKA, 2012). Logo, diante da sensibilidade aos manejos sobre o solo, é adequada para avaliar mudanças na qualidade do solo e pode ser utilizada como indicador da população microbiana viável do solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

A urease é uma enzima extracelular produzida por bactérias, actinomicetos e fungos do solo ou, ainda, originada de restos vegetais (REYNOLDS; WOLF; ARMBRUSTER, 1987). Sua atividade é aparentemente ótima em pH 8,5 a 9,0

(TABATABAI; BREMNER, 1972). Ela participa do ciclo do nitrogênio, liberando nitrogênio inorgânico. A ureia adicionada ao solo como fertilizante ou através da urina animal é hidrolisada pela enzima urease do solo ($\text{NH}_2\text{CONH}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NH}_3 + \text{CO}_2$), liberando CO_2 (gás carbônico) e NH_3 (amônia). É amplamente distribuída nos ambientes e foi detectada em micro-organismos, plantas e animais (DICK; BREAKWELL; TURCO, 1996).

A velocidade da hidrólise da ureia é afetada pelo tipo de vegetação, bem como pela quantidade aplicada. A intensidade do efeito da matéria orgânica na atividade da urease dependerá da sua disponibilidade como fonte energética para os microrganismos bem como da facilidade de decomposição microbiana da matéria orgânica (DICK *et al.*, 1996; SANTOS; CAMARGO, 1999). A análise da atividade de urease no solo pode fornecer uma indicação do potencial do solo em converter N orgânico em mineral, dando início ao processo de mineralização do N. A amônia, resultante da hidrólise da ureia pela urease, pode ter diversos destinos, conforme as condições ambientais, sendo o N possível de ser imobilizado pelos microrganismos, absorvido pelos vegetais superiores, adsorvido pelos minerais de argila, além de ser oxidado a nitrato, iniciando assim o processo de nitrificação (VICTORIA; PICCOLO; VARGAS, 1992).

Assim, o estudo da atividade das enzimas do solo é essencial para estudar o impacto da adoção de sistemas de manejo do solo.

1.6 Dinâmica do nitrogênio no solo

A nutrição apresenta grande importância para o desenvolvimento das plantas, principalmente a nitrogenada (SIQUEIRA *et al.*, 2002). Nos processos fisiológicos das plantas, o nitrogênio quando comparado aos demais nutrientes, apresenta maior efeito sobre as taxas de crescimento e absorção de dos outros nutrientes (HUETT; DETTMANN, 1988), pois faz parte de moléculas de aminoácidos e proteínas, além de ser constituinte das bases nitrogenadas e dos ácidos nucleicos. Além disso, o nitrogênio (N) participa de processos como absorção iônica, fotossíntese, respiração, multiplicação e diferenciação celular (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1989).

O N é um dos nutrientes mais abundantes nos solos, no entanto, apenas uma pequena fração desse elemento fica disponível na forma mineral, enquanto o restante permanece predominantemente complexado em formas orgânicas, indisponível às plantas (CANTARELLA, 2007; CAMARGO *et al.*, 2008). Comumente, a pouca disponibilidade de N no solo, associada à grande demanda pelas plantas, fazem desse nutriente um dos mais limitantes ao crescimento e desenvolvimento das plantas. O N mineral no solo, representado predominantemente pelas formas amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-), resulta de muitas transformações do N orgânico, as quais são influenciadas por diferentes fatores ambientais (CAMARGO *et al.* 2008; ZHANG *et al.*, 2016).

No processo de mineralização, o nitrogênio orgânico é convertido em nitrogênio mineral ou inorgânico através da ação de microrganismos heterotróficos (NIVELLE *et al.*, 2016). Na decomposição de compostos orgânicos nitrogenados ocorre a hidrólise de proteínas com a liberação de aminas e aminoácidos, ou seja, aminação. As aminas e os aminoácidos são utilizados por microrganismos heterotróficos, com a consequente liberação de amônio (amonificação) (MARSCHNER, 1995).

Parte do amônio (NH_4^+) produzido na amonificação ou adicionado via fertilizante é oxidado biologicamente a nitrito (NO_2^-) pelas bactérias do gênero *Nitrossomonas*, e posteriormente, transformado em nitrato (NO_3^-) pelas bactérias do gênero *Nitrobacter*, processo este denominado nitrificação. Este último ocorre mais rápido em solos bem aerados, e por liberar o íon hidrogênio (H^+) produz acidez no solo. É, também, influenciado pelos fatores ambientais, pois se refere a uma reação que envolve microrganismos (FAQUIN, 1998).

Posteriormente, ocorre a desnitrificação, processo pelo qual o íon NO_3^- é transformado em gás nitrogênio (N_2) e perdido para a atmosfera. O teor de água presente no solo é um fator crítico para este processo, visto que ocorre sob condições de anaerobiose. A compactação do solo também intensifica a desnitrificação.

A eficiência de utilização do N pelas culturas é baixa, o que reforçam as suas perdas para o ambiente, como pela volatilização de amônia (NH_3). A volatilização da NH_3 é um processo resultante de reações químicas básicas, a partir do amônio produzido na decomposição da matéria orgânica do solo ou a partir dos fertilizantes amoniacais e amídicos aplicados. Este mecanismo de perda de N do

solo tem sido considerado como um dos principais responsáveis pela baixa eficiência da fertilização nitrogenada (URQUIAGA; BODDEY; ALVES, 1993).

Segundo Scivittaro *et al.* (2004), a ureia destaca-se entre as fontes comerciais de nitrogênio pela facilidade de acesso no mercado, menor custo por unidade de N, elevada solubilidade e compatibilidade para uso em mistura com outros fertilizantes. O aproveitamento do N proveniente da aplicação da ureia pode ser maximizado se a água for usada em níveis adequados, o que sugere também que o próprio manejo pode evitar as perdas do fertilizante (KIEHL, 1996).

A ureia é um produto sintético obtido através da junção do dióxido de carbono (CO_2) e NH_3 em laboratório, que apresenta a fórmula química $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$. Com a aplicação de ureia ao solo, ocorre a sua hidrólise a carbonato de amônio. Esta reação é catalisada pela enzima urease. O composto formado na presença de água desdobra-se em NH_3 , CO_2 e água, ocorrendo perdas de N por volatilização da amônia. A utilização de fertilizantes como a ureia, pode condicionar maiores perdas de N, especialmente se aplicado na superfície do solo (DIAS; BARROS; FRANCO, 1996). A incorporação da ureia a alguns centímetros de profundidade reduz a volatilização (MELLO, 1987).

A incorporação da ureia ao solo, contudo, além de aumentar os custos da aplicação, nem sempre é possível, como nas aplicações em cobertura, nas pastagens e nos cultivos sob sistema de plantio direto. Esse sistema de plantio, adotado por um número cada vez maior de produtores, tem contribuído para aumentar a quantidade de ureia aplicada à superfície. Ainda ocorre um agravante, a presença de resíduos vegetais não decompostos estimula não só o processo de volatilização de amônia, face a maior atividade da urease em solos ricos em matéria orgânica, como a imobilização do N pelos microrganismos que decompõem estes resíduos. A adição de resíduos orgânicos ao solo, promovendo a atividade microbiológica e a atividade da enzima urease, acelera a hidrólise da ureia (BEYROUTY *et al.*, 1988).

1.7 Estoques de carbono e nitrogênio no solo

A taxa de estoque de carbono orgânico do solo depende da estrutura, textura e profundidade do solo, precipitação pluviométrica, sistema de produção e

manejo do solo. Estratégias para aumentar o estoque de carbono envolvem a adoção das melhores práticas de manejo agrícola, como a manutenção de resíduos das culturas após a colheita, sistemas agroflorestais, pastagens melhoradas e recuperação de solos degradados (CHAMBERS; LAL; PAUSTIAN, 2016).

As entradas de C no solo aumentam com a precipitação anual e diminuem com as temperaturas médias anuais (WEBB, 2002; WYNN *et al.*, 2006). O sequestro de carbono aumenta com o teor de argila do solo e diminui com o teor de areia (PAUL, 2016; LUO *et al.*, 2017; SINGH *et al.*, 2017; XU *et al.*, 2018). Esses fatores controlam diretamente o crescimento das plantas e a estabilidade do carbono no solo. O aumento do CO₂ atmosférico pode levar a um maior crescimento das plantas e sequestro de C nas raízes e, portanto, no solo, mas a desvantagem é que as mudanças no uso do solo podem aumentar as emissões de CO₂ do solo pela degradação do carbono orgânico do solo (COS) (DALAL *et al.*, 2005; LOPEZ-DIAZ *et al.*, 2017; OSO; RAO, 2017). Além disso, sabe-se que a perturbação do solo pelo preparo expõe o COS à degradação microbiana, aumentando assim as emissões de CO₂ do solo e a perda de COS (DALAL *et al.*, 2005).

Assim como o C, o nitrogênio (N) é um elemento relevante nos estudos de MOS, sendo um dos nutrientes com dinâmica mais ativa na ciclagem de nutrientes (D'ANDRÉA *et al.*, 2004), e essencial no correto funcionamento dos ecossistemas, principalmente em atividades agrícolas (KHUSH, 2001). Segundo Conant *et al.* (2005), alguns tipos de utilização do solo que alteram os níveis de C resultam também em mudanças nas quantidades de N, e o manejo das pastagens pode ter papel fundamental no C global e na ciclagem de N (CONANT *et al.*, 2005).

O uso correto das pastagens geralmente envolve práticas que não perturbam o solo (revolvimento da terra), aumentando as entradas de C e N no sistema através do material que será decomposto e favorecendo o acúmulo de MOS. Com o aumento da MOS, também aumenta a mineralização, disponibilizando maior quantidade de N às plantas. No processo de mineralização da MOS, através das reações de amonificação e nitrificação, em média, de 2 a 5% do N orgânico são transformados por ano. Em pastagens, a forma amoniacal se destaca devido às substâncias excretadas pelas raízes das gramíneas, inibindo a nitrificação, em detrimento dos menores valores de pH que ocorrem nessas condições (D'ANDREA, *et al.*, 2004).

Estudos onde são avaliados os métodos de pastejo e os reflexos na otimização da mineralização de N no solo são importantes, pois podem garantir a sustentabilidade do sistema em longo prazo, e conseqüentemente aumentar os estoques de C e N no solo.

1.8 Emissões de dióxido de carbono do solo

Os solos são um importante reservatório natural de carbono. Nos primeiros 100 cm de profundidade, em termos globais, estima-se que estão armazenados 2200 petagramas (Pg) de C, que corresponde à aproximadamente quatro vezes o compartimento de C da vegetação (560 Pg) e três vezes o C da atmosfera (750 Pg); o C armazenado no solo é constituído pelo C orgânico (1500 Pg C) e mineral (700 Pg C) (BATJES, 1996).

A produção de CO₂ no solo é o resultado de processos biológicos, como a decomposição da matéria orgânica e a respiração das raízes e dos organismos do solo. Também depende das propriedades físicas, químicas e biológicas e de suas interações. Tais propriedades exibem variabilidade no espaço e no tempo, o que proporciona alto grau de complexidade no fluxo de CO₂ do solo (FCO₂) (MOITINHO *et al.*, 2015).

A produção, o transporte e a emissão de CO₂ do solo para a atmosfera são diretamente influenciados pelas condições de temperatura e umidade do solo, exibindo uma alta variabilidade ao longo do tempo devido à influência de eventos climáticos e práticas de gerenciamento do solo (XAVIER *et al.*, 2020)

O teor de água e a temperatura do solo são dois fatores ambientais altamente variáveis que influenciam as emissões de CO₂ do solo (GRISCOM *et al.*, 2017). A temperatura do solo afeta a intensidade metabólica dos microrganismos do solo, e o teor de água no solo afeta diretamente os micróbios por dessecação ou limitações de recursos. Essas mudanças podem influenciar o ciclo do material do solo e afetar as emissões de CO₂ do solo. (WANG *et al.*, 2020). Alguns estudos mostraram uma correlação positiva entre o fluxo de CO₂ do solo (FCO₂) e temperatura do solo (FANG *et al.*, 1998; USSIRI; LAL, 2009; ACRECHE *et al.*, 2014; KARHU *et al.*, 2014; BURAGIENE *et al.*, 2015; WANG *et al.* 2020). Essa relação está relacionada às variações diárias e sazonais do solo, com influência significativa

nas camadas mais superficiais do solo, ou seja, na região onde são encontradas as maiores taxas de atividade microbiana (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; SIX *et al.*, 2006).

As práticas de manejo nos solos agrícolas podem diminuir ou aumentar o estoque de carbono do solo. A exemplo da adoção de práticas agrícolas mais conservacionistas, como o cultivo mínimo e o plantio direto que em substituição ao plantio convencional aumentam o potencial de sequestro e o estoque de carbono no solo, e reduzem a emissão de CO₂ do solo para a atmosfera (LU; LIAO, 2017; NATH *et al.*, 2017; RUTKOWSKA *et al.*, 2018). Os resíduos de culturas que cobrem o solo, inevitavelmente, causam alterações nas propriedades físicas e químicas do solo, afetando assim as características da biologia do solo, o que influencia a circulação do material e a troca de energia, além de alterar o fluxo de emissão de CO₂ do solo (HIEL *et al.*, 2018; KOGA; HAYASHI; SHIMODA, 2016; YAMAMOTO *et al.*, 2017).

O preparo do solo pode regular a estrutura do solo e também é um fator importante que afeta o armazenamento e as emissões de carbono do solo (JUNGKUNST; FIEDLER, 2007). O preparo do solo tem, por objetivo, a desagregação das camadas compactadas do solo, proporcionando um ambiente adequado ao crescimento e desenvolvimento radicular das plantas diminuindo a resistência mecânica ao crescimento das raízes e melhorando as condições de aeração e infiltração de água no solo (FORTIN; ROCHETTE; PATTEY, 1996). Entretanto, a quebra dos agregados do solo expõe parte do carbono orgânico lábil protegido em seu interior e o torna disponível à degradação microbiana (REICOSKY; ARCHER 2007; LAL, 2009). Neste processo os microrganismos obtêm energia por meio da oxidação de carboidratos, com conseqüente produção de água e CO₂ (SIX *et al.*, 2006). Além disso, o preparo intensivo do solo pode reduzir a cobertura vegetal que protege o solo, expondo-o à radiação solar, o que resulta na elevação da temperatura (LICHT; AL-KAISI, 2005), estando intimamente relacionadas a elevadas emissões (DENDOOVEN *et al.*, 2012).

1.9 Volatilização de amônia do solo para atmosfera

Em um contexto agrícola, a volatilização de amônia (NH₃) ocorre, principalmente, a partir da aplicação de fertilizantes como a ureia ou a partir da urina

do gado na camada superior do solo, sendo impulsionada por interações complexas entre fatores edáficos, climáticos e de plantas que podem ser difíceis de medir ou prever (SMITH *et al.*, 2020).

O aumento do uso de fertilizantes nitrogenados tem elevado à emissão global de NH_3 e provocado efeitos adversos nas mudanças climáticas globais. Na atmosfera, a amônia possui um tempo de residência que varia entre uma e duas semanas. Sua concentração é maior próximo ao seu local de origem, reduzindo bruscamente com a distância, devido à dispersão atmosférica e deposição seca (DRAGOSITS *et al.*, 2002). Essa distância pode variar de poucos metros a alguns quilômetros. Quando, eventualmente, a amônia é transformada para amônio na atmosfera, através de reações químicas, ela pode ser deslocada por milhares de quilômetros até ser depositada, principalmente, pela precipitação.

A NH_3 pode reagir também na atmosfera com óxidos de enxofre para formar sulfato de amônio (NH_4^+), que através da precipitação pode chegar ao solo, e causar acidificação. Embora a NH_3 não tenha efeito direto no aquecimento global (GOOD; BEATTY, 2011), ela pode ser oxidada na atmosfera para N_2O , que é um gás do efeito estufa.

A deposição de NH_3 em ecossistemas naturais afeta de forma negativa o balanço de nutrientes e a diversidade biológica. Vegetação adaptada a baixos suprimentos de N tem o seu crescimento comprometido a favor de espécies que se desenvolvem, de forma mais vigorosa, com o aumento da disponibilidade daquele elemento (PITCAIRN *et al.*, 2003).

A quantidade média de amônia perdida em todo o mundo pela volatilização do nitrogênio dos fertilizantes é da ordem de 14%, com valores mais altos em climas quentes e úmidos (BOUWMAN; BOUMANS; BATJES, 2002). Alguns estudos no Brasil relatam perdas de 18 a 30% do N total aplicado no solo (CANTARELLA *et al.*, 2008; SOARES; CANTARELLA; MENEGALE, 2012), embora essas perdas possam até exceder 50% do N aplicado (ROCHETTE *et al.* 2009).

A volatilização da NH_3 é um processo biofísico complexo, regulado por uma combinação de fatores meteorológicos e do solo que controlam a dissolução da mistura de fertilizantes, hidrólise e amonificação e a troca de gases do solo para as plantas e o ar. Os fatores primários do solo que favorecem a volatilização da NH_3 são: baixo teor de água no solo, valores elevados de pH do solo, reduzida capacidade de troca de cátions (CTC), baixos teores de matéria orgânica, baixo teor

de argila, alta atividade da urease, bem como a taxa, o tipo de fertilizantes e o tipo de cultura (BOUWMAN *et al.*, 2002, MIWA; FREIRE; CALIJURI, 2007; ARAÚJO *et al.*, 2011; VIERO *et al.*, 2014).

A importância relativa de cada fator depende de diferentes tipos de solo e configurações edáficas. Os fatores meteorológicos que regulam a volatilização incluem radiação solar, temperatura do ar ambiente, velocidade do vento, precipitação, umidade relativa (BOUWMEESTER; VLEK; STUMPE, 1985) e estrutura do dossel da planta (DENMEAD *et al.*, 1976). Ambos os conjuntos de fatores afetam o gradiente de concentração de NH_3 de uma superfície para o ar acima. Essas perdas de N por volatilização de amônia reduzem a eficiência de uso de N e aumentam os custos de produção em sistemas agrícolas (SANGOI; SILVA; PAGLIARINI, 2016).

As perdas de N por volatilização de NH_3 podem ser controladas ou reduzidas significativamente se a ureia for incorporada ao solo, tanto através de meios mecânicos como pela água de chuva ou de irrigação (CANTARELLA, 2007). A quantidade de água considerada suficiente para a incorporação da ureia pode variar em função do manejo do solo, por exemplo, em áreas de solo descoberto, 10 a 20 mm de chuva ou irrigação são suficientes para incorporar a ureia no solo (HARGROVE, 1988), já em áreas com plantio direto as quantidades podem ser bem maiores (FRENEY *et al.*, 1994).

Nas práticas de plantio direto (PD) e/ou cultivo mínimo a aplicação de ureia sobre os resíduos vegetais mantidos no solo poderá contribuir para as perdas de N por volatilização. Estas perdas estariam relacionadas à maior concentração e atividade da enzima urease (MOAL *et al.*, 1995). Por outro lado, no PD, o maior estoque de matéria orgânica na superfície do solo pode aumentar a adsorção de NH_4^+ impedindo a sua transformação para amônia (ROJAS *et al.*, 2012). Entretanto, a magnitude das perdas de amônia decorrente da presença de resíduos vegetais é difícil de prever. De acordo com Da Ros, Aita e Giacomini (2005), a presença de restos culturais de aveia na superfície do solo diminuiu os fluxos de volatilização de NH_3 , pois proporcionou maior umidade no solo, em comparação ao solo descoberto. Entretanto, em condições semelhantes de umidade de solo, entre os tratamentos com e sem resíduos culturais, houve maior volatilização de amônia, quando a ureia foi aplicada sobre os resíduos culturais.

1.10 Características da cultura da soja

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é uma planta da família das leguminosas originária da Ásia, com centro de origem na China. É cultivada há cerca de cinco mil anos e a sua introdução no Brasil ocorreu no século XIX. A expansão da área cultivada iniciou a partir da década de 60, motivada pela riqueza nutricional do óleo beneficiado a partir do grão, introduzido na dieta humana e pela demanda do mercado internacional (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005).

O sistema de representação divide o desenvolvimento da planta em duas fases (FEHR; CAVINESS, 1977): vegetativa (V) e reprodutiva (R) (Tabela 1). Subdivisões da fase vegetativa são designadas numericamente como V1, V2, V3, até Vn, menos os dois primeiros estádios que são designados como VE (emergência) e VC (estádio de cotilédone). O último estádio vegetativo é designado como Vn, onde “n” representa o número do último nó vegetativo formado por um cultivar específico. O valor de “n” varia em função das diferenças varietais e ambientais. A fase reprodutiva apresenta oito subdivisões ou estádios, cujas representações numéricas e respectivos nomes são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1 - Estádios fenológicos da soja¹

Estádios vegetativos	Estádios reprodutivos
VE - Emergência	R1 - Início do florescimento
VC - Cotilédone	R2 - Pleno florescimento
V1 - Primeiro nó	R3 - Início da formação das vagens
V2 - Segundo nó	R4 - Plena formação das vagens
V3 - Terceiro nó	R5 - Início do enchimento das sementes
*	R6 - Pleno enchimento das vagens
*	R7 - Início da maturação
V(n) - enésimo nó	R8 - Maturação plena

¹ Este sistema identifica exatamente os estádios da planta de soja. Porém, nem todas as plantas em um dado campo estarão no mesmo estádio ao mesmo tempo. Quando se divide em estádios um campo de soja, cada estádio específico V ou R é definido somente quando 50% ou mais das plantas no campo estão nele ou entre aquele estádio.

A fixação biológica do nitrogênio (FBN) na soja é um processo realizado principalmente por bactérias do gênero *Bradyrhizobium* que colonizam as suas raízes e apresentam a enzima nitrogenase, sendo capazes de capturar o N₂ da atmosfera e transformá-lo em uma forma assimilável pelas plantas. Os principais produtos do processo de FBN são os ureídeos (alantoína e o ácido alantóico), que

servem como formas de transporte de N de longa distância alocadas no xilema para o broto (HERRIDGE, 1982; ATKINS; SMITH, 2007).

Este processo é diretamente afetado pelos fatores abióticos, como umidade, temperatura, macroporos, concentração de nitrogênio mineral no solo, fósforo, acidez, presença de alumínio trivalente, molibdênio assimilável no solo, e da textura do solo, pois contribui para a sobrevivência do rizóbio e influencia em seu potencial de fixar nitrogênio atmosférico (HUNGRIA *et al.*, 2005; FIGUEIREDO *et al.*, 2008).

1.10.1 Fatores que interferem no desenvolvimento, fisiologia e produção da soja

A produção de uma determinada planta cultivada sempre resultará das interações existentes entre a espécie, o ambiente de produção e o manejo adotado. Se o objetivo é obter elevadas produtividades, tornam-se fundamentais conhecimentos detalhados do agroecossistema. No que diz respeito ao fator planta cultivada, o entendimento sobre as sucessivas etapas de seu desenvolvimento (fenologia), funcionalidade da espécie (fisiologia) bem como as interações com o ambiente em que será cultivada (Ecofisiologia), é condição básica e necessária para se atingir elevados níveis de produção (CÂMARA, 2000).

Um fator primordial que influencia diretamente na produtividade das culturas é a disponibilidade de água e de nutrientes. O solo é que oferece o suporte para fornecimento de nutrientes para a planta e, não é raro o mesmo não os apresentar na quantidade de que a cultura precisa para o seu pleno desenvolvimento, o que ressalta a importância da adubação (DANTAS NETO *et al.*, 2006).

O desenvolvimento da soja é estabelecido pela quantidade de massa seca (matéria seca) acumulada na planta (KURIHARA *et al.*, 2013). Com exceção da água, a massa seca consiste de tudo que se encontra na planta, como carboidratos, proteínas, lipídeos e nutrientes minerais. A maior parte da massa seca é produzida por meio da fotossíntese; a junção dos açúcares produzidos por este processo com os nutrientes minerais obtidos do solo constituem os ingredientes básicos necessários para a elaboração dos carboidratos, proteínas e lipídeos da matéria seca. Neste sentido, ressalta-se que todos os cultivares têm um potencial máximo de rendimento, que é geneticamente determinado. No entanto, esse potencial de rendimento somente é obtido quando as condições ambientais são perfeitas, o que

geralmente não ocorre naturalmente. Em condições de campo, a natureza proporciona a maior parte das influências ambientais sobre o desenvolvimento e rendimento da soja. Entretanto, os produtores, através de práticas de manejo já comprovadas, podem manipular o ambiente de produção (IPNI, 2020).

Segundo a EMBRAPA (2013), a cultura da soja requer temperaturas entre 20 e 30°C e disponibilidade hídrica variável entre 450 a 800 mm/ciclo. Para minimizar os efeitos do déficit hídrico, recomenda-se utilizar cultivares adaptados à região e às condições do solo, realizar a semeadura na época recomendada, com umidade adequada no perfil do solo e adotar práticas que favoreçam a manutenção da água pelo solo. A adaptação de diferentes cultivares a determinadas regiões depende, além das exigências hídricas e térmicas, de sua exigência fotoperiódica. A sensibilidade ao fotoperíodo é característica variável entre cultivares, ou seja, cada cultivar possui seu fotoperíodo crítico, acima do qual o florescimento é atrasado. A soja é considerada planta de dia curto e em função dessa característica, a faixa de adaptabilidade de cada cultivar varia à medida que se desloca em direção ao norte ou ao sul. Entretanto, cultivares que apresentam a característica “período juvenil longo” possuem adaptabilidade mais ampla, o que possibilita a utilização em faixas mais abrangentes de latitudes (locais) e de épocas de semeadura.

REFERÊNCIAS

ACRECHE, M. M. *et al.* Greenhouse gas emissions from green-harvested sugarcane with and without post-harvest burning in Tucumán. **Sugar Tech**, v. 16, n. 2, p. 195-199, 2014.

ALAM, M. K. *et al.* Minimal soil disturbance and increased residue retention increase soil carbon in rice-based cropping systems on the Eastern Gangetic Plain. **Soil and Tillage Research**, v. 183, p. 28-41, 2018.

ALCÂNTARA, F. A. *et al.* Adubação verde na recuperação da fertilidade de um Latossolo vermelho-escuro degradado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, p. 277-288, 2000.

ALVARENGA, R. C. *et al.* Características de alguns adubos verdes de interesse para a conservação e recuperação de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 30, p. 175-185, 1995.

- ALVES, T. S. *et al.* Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejos. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 341-347, 2011.
- ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal**, v. 23, n. 3, p. 66-75, 2007.
- ARAÚJO, E. S. *et al.* Recuperação no sistema solo-planta de nitrogênio derivado da adubação verde aplicada à cultura do repolho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 729-735, 2011.
- ARAYA, T. *et al.* Effects of conservation agriculture on runoff, soil loss and crop yield under rainfed conditions in Tigray, Northern Ethiopia. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 3, p. 404-414, 2011.
- ATKINS, C. A.; SMITH, P. M. Translocation in legumes: assimilates, nutrients, and signaling molecules. **Plant Physiology**, v. 144, p. 550-561, 2007.
- BALBINOT JUNIOR, A. A. *et al.* Integração lavoura-pecuária: intensificação de uso de áreas agrícolas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 6, p. 1925-1933, 2009.
- BALOTA, E. L. *et al.* Microbial biomass in soils under different tillage and crop rotation systems. **Biology and Fertility of Soils**, Firenze, v. 38, n. 1, p. 15-20, 2003.
- BARNEZE, A. S. *et al.* Legumes increase grassland productivity with no effect on nitrous oxide emissions. **Plant and Soil**, p. 1-15, 2019.
- BATJES, N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. **European Journal of Soil Science**, v. 47, p. 151-163, 1996.
- BEYROUTY, C. A.; SOMMERS, E.; NELSON, D. W. Ammonia volatilization from surface applied urea as affected by several phosphoroamid compounds. **Soil Science Society American Journal**, v. 49, p. 376-381, 1998.
- BOUWMAN, A. F., BOUMANS, L. J. M., BATJES, N. H. Estimation of global NH₃ volatilization loss from synthetic fertilizers and animal manure applied to arable lands and grasslands. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 16, n. 2, p. 8-1-8-14, 2002.
- BOUWMEESTER, R. J. B., VLEK, P. L. G., STUMPE, J. M. Effect of environmental factors on ammonia volatilization from a urea-fertilized soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 49, n. 2, p. 376-381, 1985.
- BRAIDA, J. A. *et al.* Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e Argissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 131-139, 2010.
- BURAGIENE, S. *et al.* Experimental analysis of CO₂ emissions from agricultural soils subjected to five different tillage systems in Lithuania. **Science of the Total Environment**, v. 514, p. 1-9, 2015.

CALONEGO, J. C. *et al.* Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy**, v. 85, p. 31–37, 2017.

CÂMARA, G. M. S. **Bases de fisiologia da cultura da soja**. Piracicaba: O Autor, 2000. 450 p.

CAMARGO, F. A. O. *et al.* Nitrogênio orgânico do solo. *In*: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre, Rio Grande do Sul: Metrópole, 2008. p. 87-99.

CANTARELLA, H. *et al.* Ammonia volatilization from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. **Scientia Agricola**, v. 65, p. 397-401, 2008.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. *In*: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017 p.

CARVALHO, J. S. *et al.* Evolução de atributos físicos, químicos e biológicos em solo hidromórfico sob sistemas de integração lavoura-pecuária no bioma Pampa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1131-1139, 2016.

CASTRO, S. S.; HERNANI, L. C. (Ed.). **Solos frágeis: caracterização, manejo e sustentabilidade**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. 367 p.

CATTELAN, A. J.; VIDOR, C. Flutuações na biomassa, atividade e população microbiana do solo, em função de variações ambientais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 14, p. 133- 142, 1990.

CHAMBERS, A.; LAL, R.; PAUSTIAN, K. Soil carbon sequestration potential of US croplands and grasslands: Implementing the 4 per Thousand Initiative. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 71, n. 3, p. 68A-74A, 2016.

CONANT, R. T. *et al.* Nitrogen pools and fluxes in grassland soils sequestering carbon. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 71, p. 239-248, 2005.

CONG, P., YIN, G., GU, J. Effects of stubble and mulching on soil erosion by wind in semi-arid China. **Scientific Reports**, v. 6, p. 29966, 2016.

CUNHA, E. Q. *et al.* Atributos físicos, químicos e biológicos de solo sob produção orgânica impactados por sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 1, p. 56-63, 2012.

D'ANDRÉA, A. F. *et al.* Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 2, p. 179-186, 2004.

DA ROS, C. O.; AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Volatilização de amônia com aplicação de ureia na superfície do solo, no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 35, n. 4, p. 799-805, 2005.

DAKORA, F. D., PHILIPS, D. Root exudates as mediators of mineral acquisition in lownutrient environments. **Plant and Soil**, v. 245, p. 35-47, 2002.

DALAL, R. C. *et al.* Total soil organic matter and its labile pools following mulga (*Acacia aneura*) clearing for pasture development and cropping. 1. Total and labile carbon. **Australian Journal of Soil Research**, v. 43, p. 13-20, 2005.

DANTAS NETO, J. *et al.* Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 283-288, 2006.

DARCH, T. *et al.* Inter-and intra-species intercropping of barley cultivars and legume species, as affected by soil phosphorus availability. **Plant and Soil**, v. 427, p. 125-138, 2018.

DENDOOVEN, L. *et al.* Greenhouse gas emissions under conservation agriculture compared to traditional cultivation of maize in the central highlands of Mexico. **Science of the Total Environment**, v. 431, p. 237-244, 2012.

DENMEAD, O. T., FRENEY, J. R., SIMPSON, J. R. Closed ammonia cycle within a plant canopy. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 8, n. 2, p. 161-164, 1976.

DESROCHERS, J. *et al.* Infiltration as affected by longterm residue and water management on a loess-derived soil in eastern Arkansas, USA. **Geoderma Regional**, v. 16, e00203, 2019.

DIAS, L. E.; BARROS, N. F.; FRANCO, A. A. **Nitrogênio**. Associação Brasileira de Viçosa: Educação Agrícola Superior – ABEAS, 1996. 90 p.

DICK, R. P.; BREAKWELL, D. P.; TURCO, R. F. **Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators**. In: DORAN, J.W. JONES, A.J., eds. *Methods for assessing soil quality*. Madison, Soil Science Society of America, 1996. p. 247-272.

DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. Significance and potencial use of soil microbial ecology: applications in agricultural and environmental management. *In*: MITTING Jr., F. B. (Ed.) **Soil microbial ecology**. New York: Marcel Dekker, 1993. p. 95-127.

DRAGOSITS, U. *et al.* Ammonia emission, deposition and impact assessment at the field scale: a case study of sub-grid spatial variability. **Environmental Pollution**, v. 117, n. 1, p. 147-158, 2002.

EMBRAPA. Sistemas de Produção. **Tecnologias de produção de soja: Região Central do Brasil 2014**. Londrina: Embrapa Soja, 2013. Disponível em: www.cnpso.embrapa.br/download/SP15-VE.pdf. Acesso em: 28 abr. 2020.

ESCARAY, F. J. *et al.* Ecological and agronomic importance of the plant genus Lotus. Its application in grassland sustainability and the amelioration of constrained and contaminated soils. **Plant Science**, v. 182, p. 121-133, 2012.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; BAILEY, B. A. Role of cover crops in improving soil and row crop productivity. **Soil Science**, v. 36, p. 2733-2757, 2005.

FANG, C. *et al.* Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. **Plant and Soil**, v. 205, n. 2, p. 135-146, 1998.

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. 227 p.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1977. 11 p.

FIGUEIREDO, C. C.; RESCK, D. V. S.; CARNEIRO, M. A. C. Labile and stable fractions of soil organic matter under management systems and native cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 907-916, 2010.

FIGUEIREDO, M. V. B. *et al.* **Fatores bióticos e abióticos à fixação biológica de N₂**. Microorganismos e agrobiodiversidade: o novo desafio para agricultura. Guaíba: Agrolivros, 2008. p. 39-64.

FORTIN, M. C.; ROCHETTE, P.; PATTEY, E. Soil carbon dioxide fluxes from conventional and no-tillage small-grain cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, p. 1541-1547, 1996.

FRENEY, J. R. *et al.* Ammonia loss following urea addition to sugar cane trash blankets. **Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technology**, v. 16, p. 114-121, 1994.

GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES A. C. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S. da; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Eds). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p.159-170.

GHOSH, B. N. *et al.* Conservation agriculture impact for soil conservation in maize-wheat cropping system in the Indian sub-Himalayas. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 3, p. 112-118, 2015.

GIBSON, K. E., KOBAYASHI, H., WALKER, G. C. Molecular determinants of a symbiotic chronic infection. **Annual Review of Genetics**, v. 42, p. 413-441, 2008.

GMACH, M. R. *et al.* Processes that influence dissolved organic matter in the soil: a review. **Scientia Agricola**, v. 77, n. 3, 2020.

GOOD, A. G.; BEATTY, P. H. Fertilizing Nature: A Tragedy of Excess in the Commons. **PLoS Biology**, v. 9, n. 8, p. e1001124, 2011.

GREGORICH, E. G. *et al.* Towards a minimum data set to assess soil organic-matter quality in agricultural soils. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 74, n. 4, p. 367-385, 1994.

GRISCOM, B. W. *et al.* Natural climate solutions. **Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)**, v. 114, p. 11645-11650, 2017.

GU, Y.; WAG, P.; KONG, C. Urease, invertase, dehydrogenase and polyphenoloxidase activities in paddy soils influenced by allelopathic rice variety. **European Journal of Soil Biology**, v. 45, p. 436-441, 2009.

HARGROVE, W. I. Soil environmental and management factors influencing ammonia volatilization under field conditions. *In*: BOCK, B. R.; KISSEL, D. E. (Ed.). **Ammonia volatilization from urea fertilizers**. Alabama: NFDC: TVA, 1988. p. 17-36.

HATI, K. M. *et al.* Soil Organic Carbon Dynamics and Carbon Sequestration Under Conservation Tillage in Tropical Vertisols. *In*: **Carbon Management in Tropical and Sub-Tropical Terrestrial Systems**. Singapore: Springer, 2020. p. 201-212.

HERRIDGE, D. F. Relative abundance of ureides and nitrate in plant tissues of soybean as a quantitative assay of nitrogen fixation. **Plant Physiology**, v. 70, p. 1-6, 1982.

HIEL, M. P. *et al.* Impact of crop residue management on crop production and soil chemistry after seven years of crop rotation in temperate climate, loamy soils. **PeerJ**, v. 6, p. e4836, 2018.

HUANG, G. B. *et al.* Effects of stubble management on soil fertility and crop yield of rainfed area in Western Loess Plateau, China. **Applied and Environmental Soil Science**, p. 1-9, 2012.

HUETT, D. O.; DETTMANN, E. B. Effect of nitrogen on growth, fruit quality and nutrient uptake of tomatoes grown in sand culture. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 28, n. 3, p. 391-399, 1988.

HUNGRIA, M. *et al.* Inoculant preparation, production and application. *In*: **Nitrogen fixation in agriculture, forestry, ecology, and the environment**. Netherlands: Springer, 2005. p. 223-253.

INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE (IPNI). **Como a planta de soja se desenvolve**. Piracicaba: IPNI, 2020. Disponível em: <http://brasil.ipni.net>. Acesso em: 26 abr. 2020.

JENKINSON, D. S.; LADD, J. N. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 5, p. 415-471, 1981.

JENSEN, E. S. *et al.* Legumes for mitigation of climate change and the provision of feedstock for biofuels and biorefineries. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 32, p. 329-64, 2012.

JUNGKUNST, H. F.; FIEDLER, S. Latitudinal differentiated water table control of carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes from hydromorphic soils: feedbacks to climate change. **Global Change Biology**, v. 13, p. 2668-2683, 2007.

KARHU, K. *et al.* Temperature sensitivity of soil respiration rates enhanced by microbial community response. **Nature**, v. 513, p. 81-84, 2014.

KELLEHER, B. P.; SIMPSON, M. J.; SIMPSON, A. J. Assessing the fate and transformation of plant residues in the terrestrial environment using HR-MAS NMR spectroscopy. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 7, p. 4080-4094, 2006.

KHUSH, G. S. Green revolution: the way forward. **Nature Reviews Genetics**, v. 2, n. 10, p. 815-822, 2001.

KIEHL, J. C. Comentário do artigo "Como evitar a perda do nitrogênio de adubos por volatilização". **Boletim Informativo**, v. 21, n. 3, p. 118-119, 1996.

KOGA, N.; HAYASHI, K.; SHIMODA, S. Differences in CO₂ and N₂O emission rates following crop residue incorporation with or without field burning: a case study of adzuki bean residue and wheat straw. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 62, p. 52-56, 2016.

KUMAR, S. *et al.* Legumes for Carbon and Nitrogen Cycling: An Organic Approach. In: Carbon and Nitrogen Cycling in Soil. **Springer**, Singapore, p. 337-375, 2020.

KURIHARA, C. H. *et al.* Acúmulo de matéria seca e nutrientes em soja, como variável do potencial produtivo. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 60, n. 5, p. 690-698, 2013.

LAL, R. Challenges and opportunities in soil organic matter research. **European Journal of Soil Science**, v. 60, p. 158-169, 2009.

LAROCA, J. V. S. *et al.* Soil quality and soybean productivity in crop-livestock integrated system in no-tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 11, p. 1248-1258, 2018.

LI, Q. *et al.* Grass-legume ratio can change soil carbon and nitrogen storage in a temperate steppe grassland. **Soil and Tillage Research**, v. 157, p.23–31, 2016.

LICHT, M. A.; AL-KAISI, M. Strip-tillage effect on seedbed soil temperature and other soil physical properties. **Soil and Tillage Research**, v.80, p.233-249, 2005.

LOPEZ-DIAZ, M. *et al.* How do management techniques affect carbon stock in intensive hardwood plantations? **Forest Ecology and Management**, v. 389, p. 228-239, 2017.

LU, X.; LIAO, Y. Effect of tillage practices on net carbon flux and economic parameters from farmland on the Loess Plateau in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 1617-1624, 2017.

- LUO, Z. *et al.* 2017. Soil organic carbon dynamics jointly controlled by climate, carbon inputs, soil properties and soil carbon fractions. **Global Change Biology**, v. 23, p. 4430-4439, 2017.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**. Piracicaba: POTAFOS, 1989. 201p.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press, 1995. 889 p.
- MARTINSEN, V. *et al.* Significant build-up of soil organic carbon under climate-smart conservation farming in Sub-Saharan Acrisols. **Science of the Total Environment**, v. 660, p. 97-104, 2019.
- MELLO, F. A. F. **Ureia Fertilizante**. Campinas: Fundação Cargill. 1987. 192p.
- MENDES, I. C. *et al.* Propriedades biológicas em agregados de um Latossolo Vermelho-Escuro sob plantio convencional e direto no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 3, p. 435-443, 2003.
- MIWA, A. C. P.; FREIRE, R. H. F.; CALIJURI, M. C. Dinâmica de nitrogênio em um sistema de lagoas de estabilização na região do Vale do Ribeira (São Paulo - Brasil). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 12, p. 169-180, 2007.
- MOAL, J. F. *et al.* Ammonia volatilization following surface-applied pig and cattle slurry in France. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 25, n. 2, p. 245-252, 1995.
- MOITINHO, M. R. *et al.* On the spatial and temporal dependence of CO₂ emission on soil properties in sugarcane (*Saccharum* spp.) production. **Soil and Tillage Research**, v. 148, p. 127-132, 2015.
- MORAIS, D. B. *et al.* Maize Intercropping Systems Improve Nutrient for the Cowpea Crop in Sandy Soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.51, n. 4, p. 491-502, 2020.
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Editora UFLA, 2006. 729 p.
- MORTENSON, M. C.; SCHUMAN, G. E.; INGRAM, L. J. Carbon sequestration in rangelands Interseeded with yellow-flowering alfalfa (*Medicago sativa* ssp. *falcata*). **Environmental Management**, v. 33, p. 475-481, 2004.
- MUNDSTOCK, C. M.; THOMAS, A. L. **Soja: fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos**. Porto Alegre: Departamento de Plantas de Lavoura - UFRGS, 2005. 31 p.
- NAAB, J. B. *et al.* Conservation agriculture improves soil quality, crop yield, and incomes of smallholder farmers in North Western Ghana. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 996, 2017.

NASCIMENTO, P. C. *et al.* Teores e características da matéria orgânica de solos hidromórficos do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 339-348, 2010.

NATH, C. P. *et al.* Greenhouse gases emission, soil organic carbon and wheat yield as affected by tillage systems and nitrogen management practices. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 63, p. 1644-1660, 2017.

NIVELLE, E. *et al.* Functional response of soil microbial communities to tillage, cover crops and nitrogen fertilization. **Applied Soil Ecology**, v. 108, p. 147-155, 2016.

OSO, V.; RAO, B. Land use conversion in humid tropics influences soil carbon stocks and forms. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 17, p. 543-553, 2017.

PAIVA, A. S. *et al.* Qualidade física e fisiológica de sementes da leguminosa forrageira *Macrotyloma axillare* cv. Java. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 30, n. 2, p. 130-136, 2008.

PAUL, E. The nature and dynamics of soil organic matter: plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 58, p. 109-126, 2016.

PITCAIRN, C. E. R. *et al.* Bioindicators of enhanced nitrogen deposition. **Environmental Pollution**, v. 126, n. 3, p. 353-361, 2003.

REICOSKY, D. C.; ARCHER, D. W. Moldboard plow tillage depth and short-term carbon dioxide release. **Soil and Tillage Research**, v. 94, p. 109-121, 2007.

REYNOLDS, C. M.; WOLF, D. C.; ARMBRUSTER, J. A. Factors related to urea hydrolysis in soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 49, p. 104-108, 1987.

ROCHETTE, P. *et al.* Reducing ammonia volatilization in a no-till soil by incorporating urea and pig slurry in shallow bands. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 84, p. 71-80, 2009.

ROJAS, C. A. L. *et al.* Volatilização de amônia da uréia alterada por sistemas de preparo de solo e plantas de cobertura invernais no centro-sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 261-270, 2012.

ROSCOE, R.; BODDEY, R. M.; SALTON, J. C. Sistemas de manejo e matéria orgânica do solo. *In*: ROSCOE, R.; MERCANTE, F. B.; SALTON, J. C. (Ed.). **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas: modelagem matemática e métodos auxiliares**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. p. 17-42.

ROSOLEM, C. A.; LI, Y.; GARCIA, R. A. Soil carbon as affected by cover crops under no-till under tropical climate. **Soil Use and Management**, v. 32, n. 4, p. 495-503, 2016.

RUTKOWSKA, B. *et al.* Impact of reduced tillage on CO₂ emission from soil under maize cultivation. **Soil Research**, v. 180, p. 21-28, 2018.

RYSCHAWY, J. *et al.* Designing crop–livestock integration at different levels: toward new agroecological models? **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 108, p. 5-20, 2017.

SALAZAR, S. *et al.* Correlation among soil enzyme activities under different forest system management practices. **Ecological Engineering**, Salamanca, v. 37, p. 1123-1131, 2011.

SANGOI, L.; SILVA, P. R. F.; PAGLIARINI, N. H. F. **Estratégias de manejo da adubação nitrogenada em milho na Região Sul do Brasil**. Lages: Graphel, 2016.

SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. 491 p.

SARTO, M. V. M *et al.* Soil microbial community and activity in a tropical integrated crop-livestock system. **Applied Soil Ecology**, v. 145, 2020.

SCIVITTARO, W. B. *et al.* Adubação nitrogenada na formação de porta-enxertos de limoeiro ‘cravo’ em tubetes. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 26, n. 1, p. 131-135, 2004.

SILVA, A. H. *et al.* Aplicação de corretivos e fertilizantes para recuperação de áreas degradadas utilizando *Macrotyloma axillare* como cobertura vegetal no norte de minas gerais. **Revista Caminhos de Geografia**, v. 8, n. 22, p. 105-115, 2007.

SINGH, G. *et al.* Crop rotation and residue management effects on soil enzyme activities, glomalin and aggregate stability under zero tillage in the Indo-Gangetic Plains. **Soil and Tillage Research**, v. 184, p. 291-300, 2018.

SINGH, J. S. *et al.* Microbial biomass acts as source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna. **Nature**, v. 338, p. 499-500, 1989.

SINGH, M. *et al.* Relationship between soil clay mineralogy and carbon protection capacity as influenced by temperature and moisture. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 109, p. 95-106, 2017.

SIQUEIRA, D. L. *et al.* Produção de mudas de maracujazeiro amarelo (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa* Deg.) em recipientes e adubadas com doses de nitrogênio. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 17., 2002, Belém. **Anais [...]**. Belém: SBF, 2002.

SIX, J. *et al.* Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, p. 555-569, 2006.

SIX, J.; ELLIOT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, p. 2099-2103, 2000.

SMITH, A. P. *et al.* Predicting ammonia volatilization from fertilized pastures used for grazing. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 287, p. 107952, 2020.

SMITH, J. L.; PAUL, E. A. The significance of soil microbial biomass estimations. *In*: BOLLAG, J.; STOTZKY, D. G. (Ed.). **Soil Biochemistry**. New York: Marcel Dekker, 1990. v. 6, p. 357-396.

SOARES, J. R.; CANTARELLA, H.; MENEGALE, M. L. C. Ammonia volatilization losses from surface-applied urea with urease and nitrification inhibitors. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 52, p. 82-89, 2012.

SOUZA, E. D. *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, n. 1, p. 79-88, 2010.

STAGNARI, F. *et al.* Multiple benefits of legumes for agriculture sustainability: an overview. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 4, n. 2, 2017.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. New York: Willey & Sons Inc., 1994. 496 p.

SUTER, M. *et al.* Nitrogen yield advantage from grass-legume mixtures is robust over a wide range of legume proportions and environmental conditions. **Global Change Biology**, v. 21, p. 2424-2438, 2015.

SWANEPOEL, C. M. *et al.* The benefits of conservation agriculture on soil organic carbon and yield in southern Africa are site specific. **Soil Tillage and Research**, v. 183, p. 72-82, 2018.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Assay of urease activity in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 4, p. 479-487, 1972.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. *In*: WEAVER, R. W.; SCOTT, A.; BOTTOMELEY, P. J., eds. **Methods of soil analysis: microbiological and biochemical properties**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 778-835.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.

TERAVEST, D. *et al.* Crop production and soil water management in conservation agriculture, no-till, and conventional tillage systems in Malawi. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 212, p. 285-296, 2015.

TISDALL, J. M.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soil. **European Journal of Soil Science**, v. 33, p. 141-163, 1982.

TOLESSA, D., DU PREEZ, C. C., CERONIO, G. M. Effect of tillage system and nitrogen fertilization on the pH, extractable phosphorus and exchangeable potassium of Nitisols in Western Ethiopia. **African Journal of Agricultural Research**, v. 9, p. 2669–2680, 2014.

URQUIAGA, S., BODDEY, R. M., ALVES, B. J. Dinâmica do N no solo. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE NITROGÊNIO EM PLANTAS, 1., 1993, Itaguaí. **Anais [...]**. Itaguaí: SBF/UFRRJ, 1993. p. 127-160.

USSIRI, A. N., LAL, R. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio. **Soil and Tillage Research**, v. 104, n. 1, p. 39-47, 2009.

VAN DER MAESEN, L. J. G. Origin, history and taxonomy of pigeonpea. *In*: **Pigeonpeas**. CAB International/ International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Oxford: 15-46, 1990.

VICTORIA, R. L.; PICCOLO, M. C.; VARGAS, A. A. T. O ciclo do nitrogênio. *In*: CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M.; NEVES, M. C. **Microbiologia do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 105-121, 1992.

VIERO, F. *et al.* Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers in no-till wheat and maize in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1515-1525, 2014.

VON LÜTZOW, M. *et al.* SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 39, p. 2183-2207, 2007.

WANG, H. *et al.* No tillage increases soil organic carbon storage and decreases carbon dioxide emission in the crop residue-returned farming system. **Journal of Environmental Management**, v. 261, p. 110261, 2020.

WEBB, A. **Pre-clearing soil carbon levels in Australia: technical report N° 12**, Australia: n Greenhouse Office, Canberra. Wendt, J.W., Hauser, S., 2002.

WOLIŃSKA, A.; STĘPNIEWSKA, Z. Dehydrogenase activity in the soil environment. **INTECH Open Access Publisher**, 2012.

WU, G. L. *et al.* Legumes functional group promotes soil organic carbon and nitrogen storage by increasing plant diversity. **Land Degradation and Development**, v. 28, p. 1336-1344, 2017.

WYNN, J. *et al.* Continental-scale measurement of the soil organic carbon pool with climatic, edaphic, and biotic controls. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 20, 2006.

XAVIER, C. V. *et al.* Crop rotation and sequence effects on temporal variation of CO₂ emissions after long-term no-till application. **Science of The Total Environment**, v. 709, p. 136107, 2020.

XU, Z. *et al.* Soil organic carbon in particle-size fractions under three grassland types in Inner Mongolia, China. **Journal of Soils and Sediments**, v. 18, p. 1896-1905, 2018.

XUE, Y. *et al.* Crop acquisition of phosphorus, iron and zinc from soil in cereal/legume intercropping systems: a critical review. **Annals of Botany**, v. 117, n. 3, p. 363-377, 2016.

YAMAMOTO, A. *et al.* Estimate of bacterial and fungal N₂O production processes after crop residue input and fertilizer application to an agricultural field by N-15 isotopomer analysis. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 108, p. 9-16, 2017.

ZHANG, H. *et al.* Soil nitrogen and its fractions between long-term conventional and no-tillage systems with straw retention in dryland farming in northern China. **Geoderma**, v. 269, p. 138-144, 2016.

ZHANG, N. *et al.* Pedogenic carbonate and soil dehydrogenase activity in response to soil organic matter in *Artemisia ordosica* community. **Pedosphere**, v. 20, p. 229-235, 2010.

2 CAPÍTULO I: Atividade microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária com manejo da adubação nitrogenada mineral e FBN na pastagem e sucessão com soja no verão

Resumo

Os sistemas de cultivo modificam os atributos do solo, podendo alterar sua qualidade. O objetivo deste trabalho foi avaliar as populações microbianas e atividades enzimáticas do solo em um sistema de ILP, manejado com adubação nitrogenada e fixação biológica na pastagem. O experimento foi conduzido em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico argilúvico, com delineamento em blocos casualizados, com quatro tratamentos: capim mombaça (*Panicum maximum* cv. Mombaça), com aplicação de nitrogênio (M+N); capim mombaça, sem aplicação de nitrogênio (M-N); capim mombaça, em consórcio com feijão guandu (*Cajanus cajan*) (M+G); e capim mombaça, em consórcio com java (*Macrotyloma axillare* cv. Java) (M+J), e com quatro repetições de cada tratamento. Foram cultivadas pastagem e soja em três safras consecutivas, sendo coletadas amostras de solo ao início e final de cada cultivo para análises químicas, microbiológicas e enzimáticas. O consórcio com leguminosas, ao longo dos anos, contribuiu para aumentar o estoque de C e nitrogênio da biomassa microbiana, a atividade das enzimas desidrogenase e urease e a relação C/N nas avaliações realizadas na pastagem. O manejo de N na pastagem, seja por fertilizante mineral ou consórcio com leguminosas, houve, no decorrer dos anos, aumento dos estoques de N, C e atividade enzimática, demonstrando que manter o pasto adubado e intercalar com o cultivo da soja é uma estratégia importante para melhorar as condições do solo.

Palavras-chave: biomassa microbiana; enzimas do solo; manejo do solo; relação C/N.

Abstract

The cultivation systems modify the attributes of the soil, being able to alter its quality. The objective of this work was to evaluate the microbial populations and enzymatic activities of the soil in an ILP system, managed with nitrogen fertilization and biological fixation in the pasture. The experiment was carried out in a dystrophic Red-Yellow Latosol, with a randomized block design, with four treatments: mombaça grass (*Panicum maximum* cv. Mombaça), with nitrogen application (M+N); mombaça grass, without nitrogen application (M-N); mombaça grass, intercropped with pigeon pea (*Cajanus cajan*) (M+G); and mombaça grass, in consortium with java (*Macrotyloma axillare* cv. Java) (M+J), and with four replicates of each treatment. Pasture and soybeans were cultivated in three consecutive harvests, and soil samples were collected at the beginning and end of each cultivation for chemical, microbiological and enzymatic analyzes. The consortium with legumes, over the years, has contributed to increase the C and nitrogen stock of the microbial biomass, the activity of the enzymes dehydrogenase and urease and the C/N ratio in the evaluations carried out in the pasture. The management of N in the pasture, whether by mineral fertilizer or intercropping with legumes, there has been, over the years, an increase in N, C stocks and enzymatic activity, demonstrating that maintaining pasture fertilized and intercalated with soybean cultivation is a strategy important to improve soil conditions.

Keywords: microbial biomass; enzymatic activity; soil management; C/N ratio.

2.1 Introdução

Em regiões de clima tropical e que apresentam solos arenosos, sistemas integrados de lavoura-pecuária (ILP) têm se mostrado importantes para viabilizar o cultivo de espécies anuais, como a soja, principalmente pela palhada fornecida pela pastagem, proporcionando efeito benéfico (MORAIS *et al.*, 2020). Além disso, a introdução de leguminosas na pastagem é interessante, pois essa combinação pode viabilizar o cultivo atual e os que se sucedem, podendo ocorrer incorporação de nitrogênio (N) ao solo, por meio da fixação biológica de microrganismos presentes nas raízes de leguminosas, contribuindo para a economia no uso de fertilizantes nitrogenados, aumentando os valores nutritivos das plantas e a atividade biológica do solo (BARCELLOS *et al.*, 2008).

O uso de sistemas ILP e plantio direto (PD) pode afetar a dinâmica do C no solo, que por sua vez influencia a quantidade e a qualidade da matéria orgânica do solo (MOS), agregação do solo, populações microbianas e atividades enzimáticas do solo em diferentes graus (SARTO *et al.*, 2020), melhorando a nutrição das plantas através de ciclagem de nutrientes, particularmente pelo acoplamento dos ciclos N e C, favorecendo o fluxo e armazenamento de água (RYSCHAWY *et al.*, 2017). Plantas de cobertura, principalmente as gramíneas, integradas de forma adequada no modelo de rotação de culturas, fornecem alta produção de fitomassa, de elevada relação carbono/nitrogênio (C/N), mantendo a cobertura do solo por um período prolongado (BORGHI; CRUSCIOL; COSTA, 2006).

Neste contexto, é necessário avaliar a qualidade do solo através de múltiplos indicadores. A matéria orgânica do solo é o ponto chave para aumentar a qualidade do solo, pois está ligada ao aumento do carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo (CBMS e NBMS), sendo apontados como excelentes indicadores de curto prazo de intervenções antropogênicas, usado para comparar a qualidade do solo sob diferentes manejos (COSTA *et al.*, 2015). As enzimas também estão sendo amplamente utilizadas, pois permitem medir o catabolismo de componentes

orgânicos e minerais no solo e também são altamente sensíveis para fornecer informações sobre mudanças nas principais funções do solo (LISBOA *et al.*, 2012).

Dentro deste contexto, testou-se a hipótese de que a consorciação entre gramíneas e leguminosas forrageiras seja positiva para o sistema de produção, comparada à adubação nitrogenada mineral, e principalmente manejo sem adubação nitrogenada, pois incrementa a cobertura do solo, aumenta os teores de MOS e a disponibilidade de N devido à fixação biológica e conseqüentemente melhora a atividade microbiana e enzimática do solo.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a atividade microbiana do solo, no consórcio entre gramíneas e leguminosas no manejo de pastagem antecedente ao cultivo da soja no verão.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Descrição da área experimental

O experimento foi instalado na Fazenda Experimental da Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE), no município de Presidente Bernardes - SP, em um solo cujas características químicas (RAIJ *et al.*, 2001) foram determinadas no início do experimento em 2017 (Tabela 1), e classificado como um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico argilúvico com 17% de argila na profundidade de 0-10 cm, conforme análise granulométrica (EMBRAPA, 1997) realizada até um metro de profundidade (Tabela 2).

TABELA 1 - Caracterização química do solo da área experimental, 2017

Prof. (cm)	pH (CaCl ₂)	MO ^a (gdm ⁻³)	P _(resina) ---- (mg dm ⁻³) ----	S ----	H+Al -----	K -----	Ca (mmol _c dm ⁻³)	Mg -----	SB ^b -----	CTC ^c -----	V ^d (%)
0-20	5,9	20,7	6,3	5,9	13,5	1,0	22,9	16,5	40,5	54,0	73,8
20-40	5,3	14,1	3,3	6,7	17,4	0,4	13,4	10,2	24,0	41,4	56,5

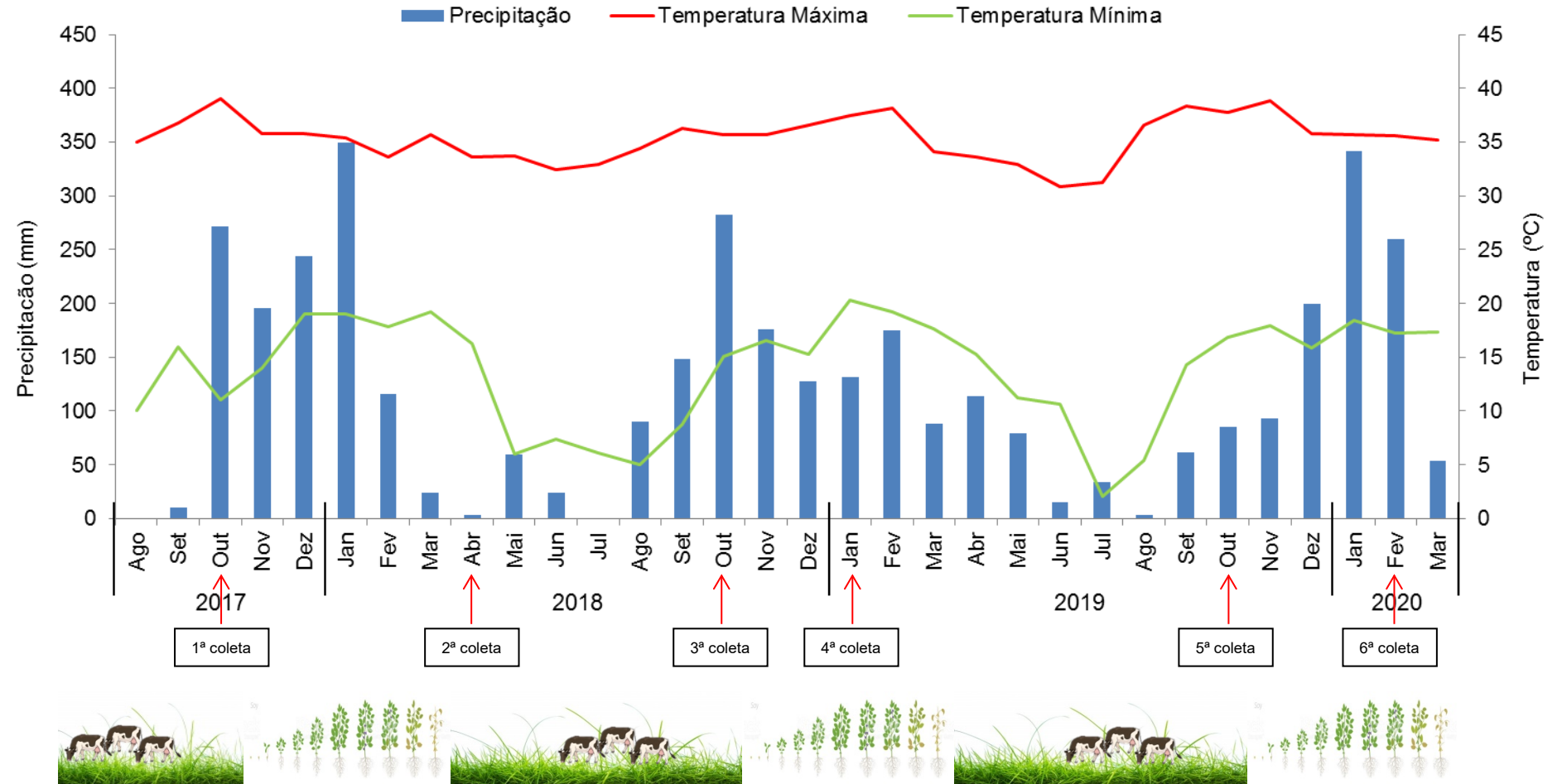
^a matéria orgânica do solo; ^b soma de bases; ^c capacidade de troca de cátions; ^d saturação por bases

TABELA 2 - Análise granulométrica, da área experimental, 2017

Profundidade (cm)	Granulometria (g kg ⁻¹)			Classe Textural
	Areia	Silte	Argila	
0-10	773	48	179	Média Arenosa
10-20	763	68	169	Média Arenosa
20-40	736	41	223	Média Arenosa
40-60	707	63	230	Média Arenosa
60-80	695	55	250	Média Arenosa
80-100	697	56	247	Média Arenosa

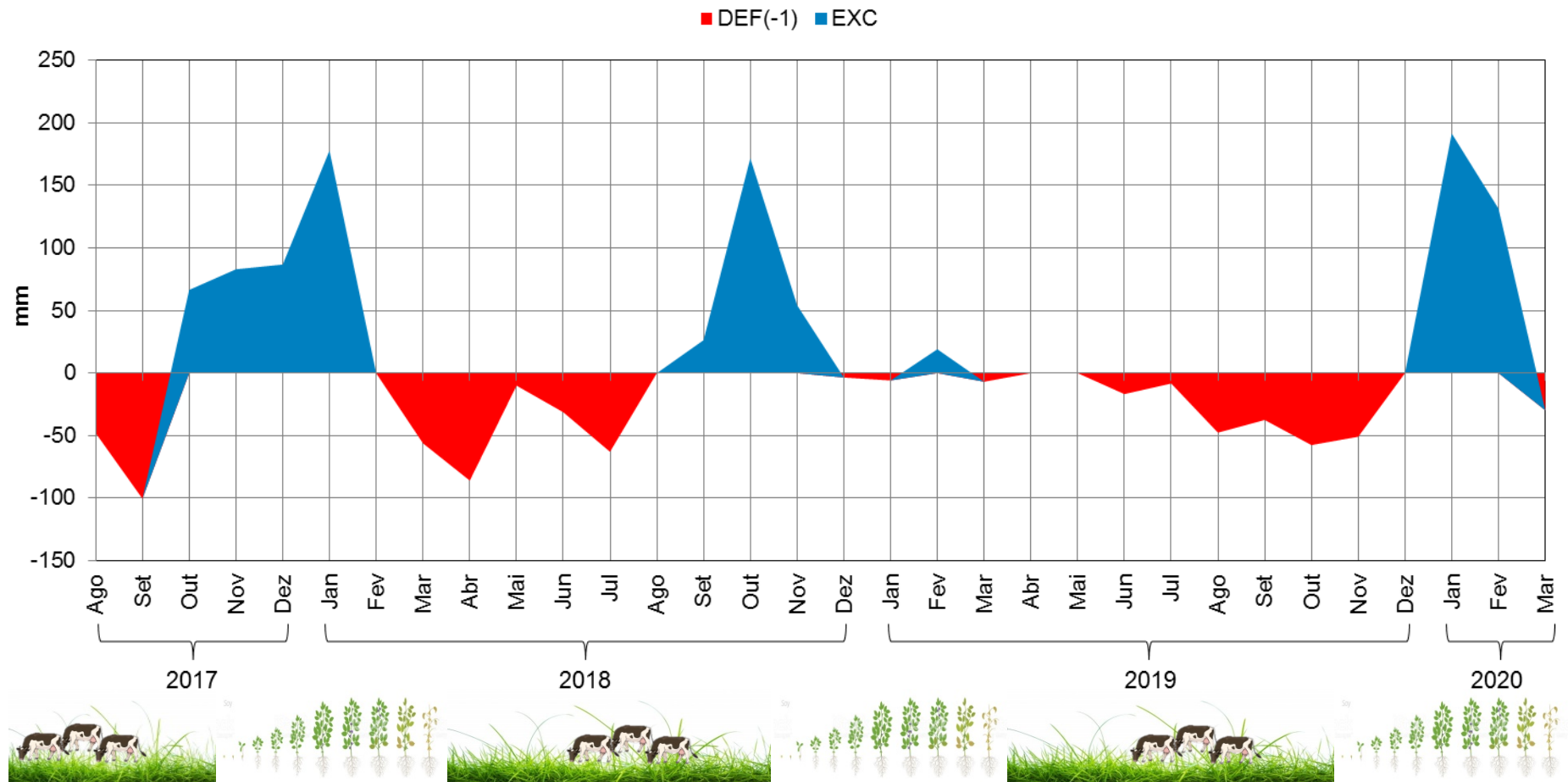
A localização da área experimental é definida pelas coordenadas geográficas: 22°16'59" Latitude Sul e 51°40'34" Longitude Oeste, com altitude média de 430 metros e relevo suave ondulado. O clima predominante na região, de acordo com a classificação de Köppen, é caracterizado pelo Cwa com estação chuvosa de outubro a março, estação seca de abril a setembro, e temperaturas médias anuais de aproximadamente 25°C. Os valores das precipitações, bem como as temperaturas máximas e mínimas registrados na área experimental durante os anos de condução do experimento juntamente com os períodos de coleta de amostras do solo estão apresentados na Figura 1. Também foi realizado o cálculo do balanço hídrico a fim de verificar a influência destes dados nos manejos executados (Figura 2).

FIGURA 1 - Condições climáticas registradas na Fazenda Experimental e períodos de coleta de amostras de solo durante os anos de manejo



Fonte: Dados Meteorológicos Fazenda Experimental.
Nota: Dados trabalhados pelo autor.

FIGURA 2 - Balanço hídrico obtido durante os anos de manejo



Fonte: Dados Meteorológicos Fazenda Experimental.
 Nota: Dados trabalhados pelo autor.

2.2.2 Delineamento experimental e caracterização dos manejos

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com quatro tratamentos, descritos da seguinte forma: Capim mombaça (*Panicum maximum* cv. Mombaça) solteiro com adubação nitrogenada (200 kg ha^{-1} de N) (M+N); Capim mombaça solteiro sem adubação nitrogenada (M-N); Capim mombaça consorciado com a leguminosa forrageira denominada de feijão guandu (*Cajanus cajan*) sem adubação nitrogenada (M+G); Capim mombaça consorciado com a leguminosa forrageira Java (*Macrotyloma axillare* cv. Java) sem adubação nitrogenada (M+J) e quatro repetições de cada tratamento (Figura 1 do ANEXO A).

O experimento foi instalado em março de 2015 com a semeadura do capim mombaça (*Panicum maximum* cv. Mombaça) em área total, e a leguminosa forrageira java (*Macrotyloma axillare* cv. Java) e guandu (*Cajanus cajan*) semeados em sulcos com espaçamento de 0,90 m, com 15 e 3 kg ha^{-1} de sementes, respectivamente (Figuras 2 a 4 do ANEXO A). Em conjunto com a semeadura das culturas, foram adicionados 100 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 50 kg ha^{-1} de K_2O . No tratamento que recebeu adubação nitrogenada, o N foi aplicado via ureia (450 g kg^{-1} de N), em 2015 e 2016, na dose de 250 kg ha^{-1} de N, dividida em cinco aplicações durante períodos chuvosos (Detalhes da área experimental após semeadura da gramínea e das leguminosas nas Figuras 5 a 8 do ANEXO A).

Antecedente à introdução do gado na área, em maio de 2015, as parcelas, de 69 m de comprimento e 49,25 m de largura, foram separadas com fios energizados, onde cada parcela recebeu um bebedouro para abastecimento de água e comedouro para sal mineral. Foram introduzidos 20 animais por parcela e permaneceram até a redução de corte da pastagem a 30 cm do solo.

A pastagem foi cultivada nos anos de 2015 e 2016, e em agosto de 2017 a área foi novamente cercada para o pastejo (Figura 9 do ANEXO A). Ao final do pastejo foi realizada a dessecação da área, com 6 L ha^{-1} de Glyphosate (Figura 10 do ANEXO A). A calagem foi realizada, conforme a caracterização química do solo apresentada na Tabela 1, com dose 1 Mg ha^{-1} de calcário dolomítico (Poder Relativo de Neutralização Total - PRNT 85%) em 22 de setembro de 2017 e a gessagem com $0,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ em 28 de setembro de 2017 (Figuras 11 e 12 do ANEXO A).

Em 23 de outubro de 2017, ocorreu o plantio da soja TMG-7062 IPRO® (Figuras 13 e 14 do ANEXO A), a partir de sementes já tratadas, e Profol Como® (225 FIX líquido, que contém 15% de molibdênio, 1,5% de cobalto) com dosagem de 260 mL para 1000 kg de sementes, com stand de 13,8 plantas m⁻¹, semeadas com espaçamento entre linhas 0,45 m. Foram utilizados 8 doses ha⁻¹ do inoculante líquido para soja Masterfix L Premier®, Stoller, com cepas das bactérias *Bradyrhizobium elkanii* (SEMIA 5019) e *Bradyrhizobium japonicum* (SEMIA 5079). A adubação de plantio foi com 350 kg ha⁻¹ de NPK 04-30-10, 3,54% de S, 5,02% de Ca, 0,084% de Mn, 0,26% de Cu, 0,858% de B, 0,298% de Zn e 0,096% de Fe.

Em 14 de novembro de 2017, foi realizado o controle de plantas daninhas, com aplicação de 5 L ha⁻¹ de Glyphosate. Em 13 de dezembro de 2017, foi realizada a adubação de cobertura, com aplicação a lanço de 125 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio (KCl). Em 04 de janeiro de 2018, junto com a aplicação de 300 mL ha⁻¹ do inseticida Engeo®, Sygenta, com 141 g L⁻¹ de Tiametoxam e 106 g L⁻¹ de Lambda-Cialotrina, 750 mL ha⁻¹ de Connect®, Bayer, com 12,5 g L⁻¹ de Beta-ciflutrina e 100 g L⁻¹ de Imidacloprido, 400 mL ha⁻¹ de Curyom®, Sygenta, com 500 g L⁻¹ de Profenofós e 50 g L⁻¹ de Lufenurom e 500 mL ha⁻¹ do fungicida Opera®, Basf, com 133 g L⁻¹ de Piraclostrobina e 50 g L⁻¹ de Epoxiconazol, foi realizada a adubação foliar de cobalto e molibdênio com dose de 0,5 L ha⁻¹ com óleo vegetal na dose de 0,5 L ha⁻¹ (Detalhes do desenvolvimento da soja nas Figuras 15 a 22 do ANEXO A).

A colheita da soja foi realizada em 24 de fevereiro de 2018 (Figuras 23 e 24 do ANEXO A). Posterior a sua colheita, o pasto e as leguminosas foram semeadas na segunda quinzena de março de 2018, com espaçamento na semeadura entre linhas de 0,90 m para as leguminosas e 0,225 m para a gramínea. No tratamento que recebeu adubação nitrogenada, o N foi aplicado via ureia, em períodos chuvosos (junho e agosto de 2018), na dose de 200 kg ha⁻¹ de N, em duas aplicações. Em julho e agosto foi realizado o pastejo, e em outubro de 2018 foi realizada a dessecação do pasto para semeadura da safra de verão, com 6 L ha⁻¹ de Glyphosate.

Em 07 de novembro de 2018 foi realizada a semeadura da soja, com o mesmo cultivar da primeira safra, com 14 sementes por metro linear. A adubação de plantio foi de 350 kg ha⁻¹ de NPK 04-30-10 + S: 3,54% + Ca: 5,02% + Mn: 0,084% + Zn: 0,298% + B: 0,858% + Cu: 0,26% + Fe: 0,096% e M: 0,003%. O inoculante utilizado foi Masterfix L Premier®, em linha de plantio, com 8 doses. Em 27 de

dezembro de 2018 foi realizada a adubação de cobertura, sendo adicionados 110 kg ha^{-1} de KCl (600 g kg^{-1} de K_2O).

Em 05 de março de 2019 foi realizada a colheita da soja na área experimental. E em seguida foi realizada novamente a semeadura das forrageiras e leguminosas na área, com os mesmos espaçamentos do manejo anterior. Durante o plantio da forrageira, foi realizada adubação de plantio com 350 kg ha^{-1} de NPK 04-30-10. Após 40 dias do plantio, foi realizada a primeira dose de N mineral nos piquetes específicos. Na sequência, a área foi cercada para o pastejo, sendo colocadas 23 novilhas nelores e 15 bezerros por piquete, que permaneceram até a redução de corte da pastagem a 30 cm de altura do solo. Após o pastejo, houve condições para realização da segunda dose da adubação nitrogenada, adicionando $100 \text{ kg de N ha}^{-1}$, realizada em 24 de maio de 2019.

Em julho de 2019 foi realizado o segundo pastejo até início de agosto de 2019. Na segunda quinzena de outubro, a área foi dessecada, com 6 L ha^{-1} Glyphosate. No dia 15 de novembro de 2019 foi realizada a semeadura da soja, com o mesmo cultivar da safra anterior, com 13 sementes por metro linear. A adubação de plantio foi de 400 kg ha^{-1} de NPK 04-30-10 + S: 3,54% + Ca: 5,02% + Mn: 0,084% + Zn: 0,298% + B: 0,858% + Cu: 0,26% + Fe: 0,096% e M: 0,003%. O inoculante utilizado foi Masterfix L Premier®, aplicado na linha de semeadura, com 8 doses. Em 11 de março de 2020 foi realizada a colheita da soja na área experimental.

2.2.3 Análise química das amostras de solo

Antes do cultivo da soja, na fase de pastagem, nos anos de 2017, 2018 e 2019, e durante o estágio R5 da soja, nas safras 2017-2018, 2018-2019 e 2019-2020, foram abertas 16 trincheiras (Figuras 25 e 26 do ANEXO A), sendo uma em cada parcela experimental, com as seguintes dimensões: 1,20 m (P) x 1,20 m (C) x 0,90 (L) (Figura 27 do ANEXO A), para as coletas das amostras deformadas de solo, na profundidade de 0-10 cm e 10-20 cm (Figura 28 do ANEXO A). Também foram coletadas amostras indeformadas para análise da densidade do solo (Ds), através de anéis volumétricos com 5 cm de altura. As amostras deformadas foram refrigeradas a 4°C em caixa térmica com gelo e transportadas para o Laboratório de

Análise Química de Tecidos Vegetais, localizado no Campus II da UNOESTE. Para análise das propriedades químicas, as amostras foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 45°C, moídas e peneiradas através de uma malha de 2 mm em temperatura ambiente (25-30°C). Para as análises das propriedades microbiológicas, estas foram armazenadas a -20° C até análise subsequente.

2.2.3.1 Estoque de C e N total do solo

As amostras de solo foram submetidas ao método de Mattos *et al.* (2017) adaptado de Yeomans e Bremner (1988) para determinação do carbono total (COT). O nitrogênio total (NT) foi determinado de acordo com Cantarella e Trivelin (2001). Após a obtenção destes parâmetros, foram calculadas as relações entre COT/NT (relação C/N).

Os estoques de carbono orgânico total (ECT) e nitrogênio total (ENT) foram calculados com base na massa equivalente de solo (ELBERT; BETTANY, 1995), de acordo com a seguinte equação: $ECT/ENT (Mg ha^{-1}) = \{Teor\ de\ C(N) \times E \times D\}$, em que C ou N = valor em $g\ kg^{-1}$, E = espessura da camada (cm) e D_s = densidade do solo ($g\ cm^{-3}$) na camada. O cálculo da densidade do solo foi realizado conforme a metodologia da EMBRAPA (1997).

2.2.3.2 Quantificação do C e N da biomassa microbiana do solo

A determinação do C e N da biomassa microbiana do solo, CBMS ($mg\ C\ kg^{-1}$) e NBMS ($mg\ N\ kg^{-1}$), foi realizada através das metodologias irradiação - extração, de acordo com Ferreira, Camargo e Vidor (1999) e Tedesco *et al.* (1995), respectivamente. Após a obtenção destes parâmetros, foi calculado o quociente microbiano (Qmic), ou seja, a relação entre CBMS/COT.

2.2.3.3 Determinação da atividade da enzima desidrogenase do solo

A determinação da atividade da desidrogenase foi realizada de acordo com método descrito por Casida, Klein e Santoro (1964). Para procedência da análise foi adicionado 2 mL da solução TTC (cloreto de 2,3,5 - trifeniltetrazólio) a 1% e 1 mL de glicose a 0,1% em tubos de vidro contendo 5 gramas de solo de cada amostra. Posteriormente, foi realizada a homogeneização das amostras e incubadas por 18 horas a 25°C no escuro. Para ocorrer a extração do TTC e reduzir a trifenilformazan (TTF) foram adicionados 9 mL de metanol em cada amostra. Após a filtragem, foram realizadas as leituras em espectrofotômetro com absorvância a 530 nm. Os resultados foram expressos em $\mu\text{g TTF g}^{-1}$ de solo 18 horas⁻¹.

2.2.3.4 Análise da atividade da enzima urease no solo

A atividade da urease, nas amostras de solo, foi determinada através da quantificação do amônio liberado pela hidrólise da ureia, utilizando-se o método colorimétrico preconizado por Tabatabai e Bremner (1972). Foi pesado 1 g de solo, adicionando-se 9 mL de tampão (pH 9) e 1 mL de solução com ureia ($0,2 \text{ mol L}^{-1}$), incubando por 2 h em estufa a 37°C. Após este período, adicionaram-se 40 mL de $\text{KCl-Ag}_2\text{SO}_4$ ($2,5 \text{ mol L}^{-1}$) para interromper a reação. Da solução, pipetaram-se 20 mL, que foram levados ao destilador, adicionando-se 0,2 g de MgO. No destilador, o destilado foi recolhido em um béquer com solução de ácido bórico, sendo titulado com solução padronizada de H_2SO_4 . Os resultados foram expressos em mg N-NH_4^+ kg^{-1} de solo.

2.2.4 Análise estatística

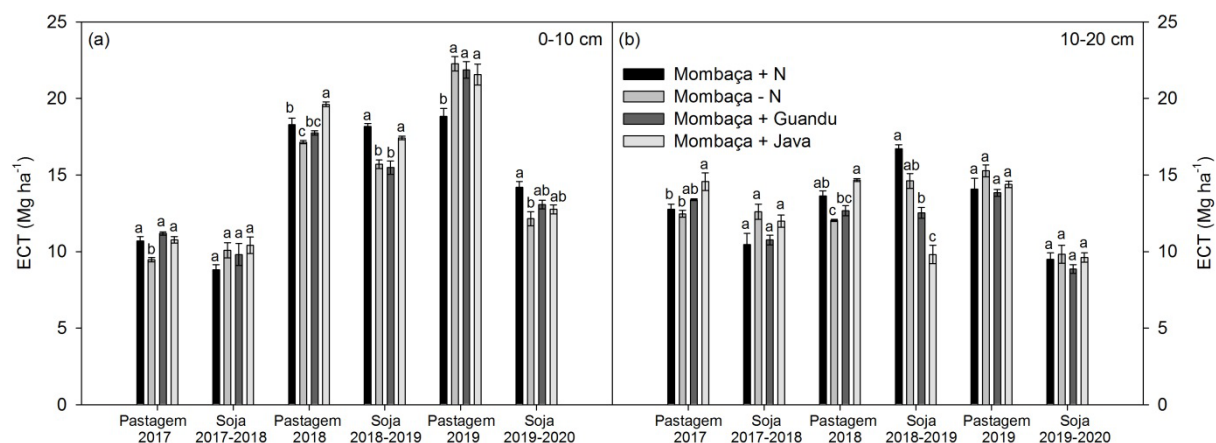
Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância e os efeitos dos tratamentos foram comparados pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade, utilizando-se software estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011). Também foi realizada correlação de Pearson (r) entre as variáveis ECT e atividade da enzima urease.

2.4 Resultados e Discussão

Os estoques de carbono total (ECT), na profundidade de 0-10 cm, durante o desenvolvimento da pastagem em 2017, foram superiores nos manejos consorciados com guandu (M+G) e java (M+J) além do manejo com adubação nitrogenada (M+N) (Figura 3a). Os incrementos no ECT para M+G, M+J e M+N foram de 15,5%, 12,2% e 11,7%, respectivamente, em comparação com a pastagem solteira sem adição de N (M-N). Estes resultados estão relacionados ao alto aporte de biomassa depositada nesses manejos, proporcionando maior incorporação de C e nutrientes ao solo. Laroca *et al.* (2018) encontraram aumento de 33,6% no ECT no consórcio de pastagem com feijão-caupi comparado ao tratamento sem consórcio. Resultados semelhantes foram encontrados por Frasier *et al.* (2016). Estas informações reafirmam a importância da maior biodiversidade do solo para manter o funcionamento do ecossistema e seus serviços. A entrada de espécies leguminosas, no sistema de produção, proporciona o aumento da biomassa microbiana, elevando a ciclagem de nutrientes, os teores de matéria orgânica e consequentemente a capacidade produtiva dos solos (ZHOU; WANG, 2015; SINSABAUGH *et al.*, 2015; MORILLAS *et al.*, 2015).

Na safra 2017-2018 da cultura da soja, não houve diferença significativa entre os tratamentos nas duas profundidades avaliadas. Já durante o manejo da pastagem em 2018, observou-se que na camada de 0-10 cm (Figura 3a), o ECT no solo foi superior no manejo M+J. Ainda durante a coleta nesta safra, na profundidade de 10-20 cm (Figura 3b) destacaram-se os manejos M+J e M+N.

FIGURA 3 - Estoque de carbono total (ECT) do solo durante a pastagem 2017, soja 2017-2018, pastagem 2018, soja 2018-2019, pastagem 2019 e soja 2019-2020, nas profundidades de 0-10 cm (a) e 10-20 cm (b)



Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre os manejos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Barra de erros indica o desvio padrão.

Na safra 2018-2019, os manejos M+N e M+J proporcionaram o maior ECT (Figura 3a). Dessa forma, constatou-se que após as duas safras de soja, os estoques de carbono aumentaram em 41,1%, 39,8%, 27,8% e 38,3% nos manejos M+N, M-N, M+G e M+J, respectivamente, comparados aos valores encontrados na primeira coleta durante a pastagem de 2017, na profundidade de 0-10 cm.

Durante o ciclo de desenvolvimento da pastagem em 2019 houve importante incremento no ECT em todos os manejos (Figura 3a), provavelmente pelo fato de que as gramíneas são de decomposição mais lenta e apresentam relação C/N maior, resultando em elevados estoques de C e maior densidade radicular na parte superior do solo. Destaca-se que os manejos M+G, M+J e M-N apresentaram resultados de ECT superiores e semelhantes entre si, destacando, porém, que até o manejo M-N apresentou resultado interessante diante da entrada da soja no sistema de produção, que confere a maior entrada de N, sendo esta uma estratégia importante para aumentar a quantidade de biomassa da cultura sucessora (gramíneas) e conseqüentemente elevar o carbono orgânico incorporado ao solo.

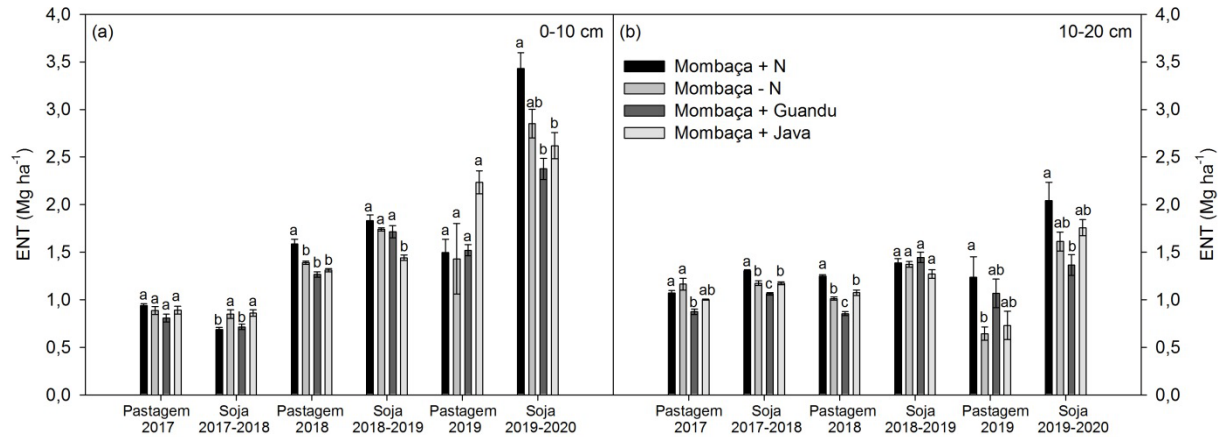
Na última avaliação realizada durante a safra 2019-2020 da soja, constatou-se que nas duas profundidades, assim como na maioria das safras da soja, o ECT foi menor quando comparado à pastagem, já que as gramíneas apresentam relação C/N superior à cultura da soja. E assim como na maioria dos períodos, os manejos consorciados e com adubação de N apresentaram maior ECT. É interessante

destacar que os ECT são maiores após a safra de soja, mostrando que o C gerado pelo cultivo da leguminosa proporciona um incremento do ECT na pastagem.

Na primeira coleta realizada na pastagem em 2017, não houve diferença significativa no estoque de nitrogênio total (ENT) entre os manejos (Figura 4a). Entretanto, na safra de soja em 2017-2018, os manejos que se destacaram no aporte de nitrogênio no sistema de produção foram o M-N e M+J (Figura 4a), demonstrando que esse destaque para o manejo M-N provavelmente ocorreu pela introdução da soja no sistema.

Durante a fase de pastagem em 2018, o único manejo que se destacou foi o M+N, nas duas profundidades avaliadas. E na safra 2018-2019, a soja por também ser uma leguminosa, deixou no solo um saldo ainda maior de N, contribuindo no ENT da próxima cultura em sucessão. Ainda na safra 2018-2019, na camada de 0-10 cm (Figura 4a), o manejo M+N também apresentou incremento no ENT, entretanto, assemelhou-se com o manejo M+G e M-N. Vale ressaltar que na camada de 0-10 cm, houve um aumento de 41% de ENT no solo no manejo M+N de 2017 para 2018 na fase de condução da pastagem, 36% e 32% nos manejos M+G e M+J, respectivamente, e embora não tenha ocorrido aplicação direta de N e nem introdução de leguminosa na pastagem, o manejo M-N também apresentou um aumento de 36% no ENT, demonstrando que o manejo foi beneficiado apenas com a entrada da leguminosa em sucessão, no sistema de produção. Além disso, outro fator que pode estar associado ao aumento do ENT no manejo M-N é a adição de esterco resultante da pecuária, que segundo Campos *et al.* (2018) e Cardona *et al.* (2014) também fornece compostos nitrogenados.

FIGURA 4 - Estoque de nitrogênio total (ENT) do solo durante a pastagem 2017, soja 2017-2018, pastagem 2018, soja 2018-2019, pastagem 2019 e soja 2019-2020, nas profundidades de 0-10 cm (a) e 10-20 cm (b)



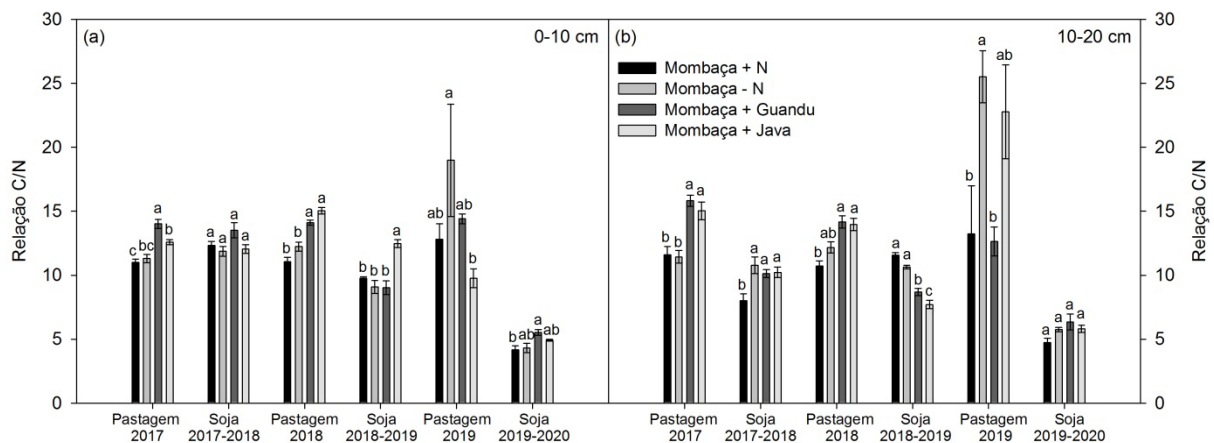
Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre os manejos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Barra de erros indica o desvio padrão.

Na coleta realizada na pastagem em 2019, observou-se que os manejos M+N, M+G e M+J apresentaram maior ENT na profundidade 10-20 cm (Figura 4b). O aumento significativo nos conteúdos de N total do solo nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de qualquer leguminosa indica que a serapilheira levou à imobilização de C na biomassa microbiana (SCHETTINI *et al.*, 2018) e o C do solo forneceu a energia necessária para que os microrganismos desempenhassem funções com alto custo energético, como a fixação biológica de N. O ENT na última coleta realizada na safra da soja 2019-2020 foi superior às demais, demonstrando que os manejos favoreceram no ENT, onde se destacou o manejo M+N, nas duas profundidades avaliadas (Figura 4a e 4b). A adubação nitrogenada foi uma grande aliada na maior produção de biomassa na pastagem e consequentemente na maior decomposição e liberação de nutrientes da palhada, sendo que houve aumento do ENT nas duas camadas do solo. Além de que também ocorre a ciclagem do N pelas excretas dos animais em pastejo, de acordo com Barcellos *et al.* (2008), esses excrementos podem ser tão eficientes no repovoamento de N quanto a serapilheira, uma vez que mais de 90% dos nutrientes minerais contidos na forragem consumida pelo gado retornam ao pasto, embora seja importante ressaltar que a distribuição e o estoque de N nas excretas varia de acordo com a intensidade do pastejo e com o teor de N na dieta dos animais.

A magnitude em que a cultura antecedente contribui para aumentar o metabolismo dos seus resíduos deixados na superfície do solo depende da relação C/N, composição e quantidade de seus restos culturais (FAGERIA; STONE; SANTOS, 1999). A quantificação dos teores de C e N do solo permite a obtenção da relação C/N, que é um indicador importante da decomposição da matéria orgânica do solo, dando informação sobre o seu estado de humificação e muito importante para a determinação da competição entre os nutrientes essenciais para a atividade dos microrganismos do solo (LUCHESE; FAVERO; LENZI, 2002).

No presente experimento, os valores da relação C/N, em geral, mantiveram-se abaixo de 20 (Figura 5), havendo, portanto, indicação de que o processo dominante é a mineralização, o que favorece a decomposição orgânica e a liberação de N para o solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Em solos tropicais não revolvidos o equilíbrio na relação C/N ocorre entre 10 e 15 (STEVENSON, 1986), assemelhando-se com os valores encontrados neste estudo (Figura 5).

FIGURA 5 - Relação C/N do solo durante a pastagem 2017, soja 2017-2018, pastagem 2018, soja 2018-2019, pastagem 2019 e soja 2019-2020, nas profundidades de 0-10 cm (a) e 10-20 cm (b)



Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre os manejos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Barra de erros indica o desvio padrão.

Observa-se na Figura 5, que em geral a relação C/N foi superior durante o desenvolvimento da pastagem, sendo que o capim-mombaça é uma gramínea e, as gramíneas apresentam alta relação C/N, o que lhes confere maior tempo de permanência sob a superfície, podendo ocorrer maior imobilização de N na biomassa microbiana do solo (SILVA, 2006; KRAMBERGER *et al.*, 2009). Além

disso, as gramíneas possuem sistema radicular abundante e elevada rizodeposição, características que auxiliam ativamente na estabilidade dos macroagregados, e também apresenta forte relação com a produção e decomposição dos restos culturais (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). As gramíneas, quando cultivadas em consórcio, podem proporcionar benefícios aos sistemas de produção, pois apresentam características intrínsecas que resultam na exploração de camadas distintas de solo, na ciclagem de nutrientes (CHERR; SCHOLBERG; MCSORLEY, 2006) e na produção de resíduo vegetal com relação C/N intermediária.

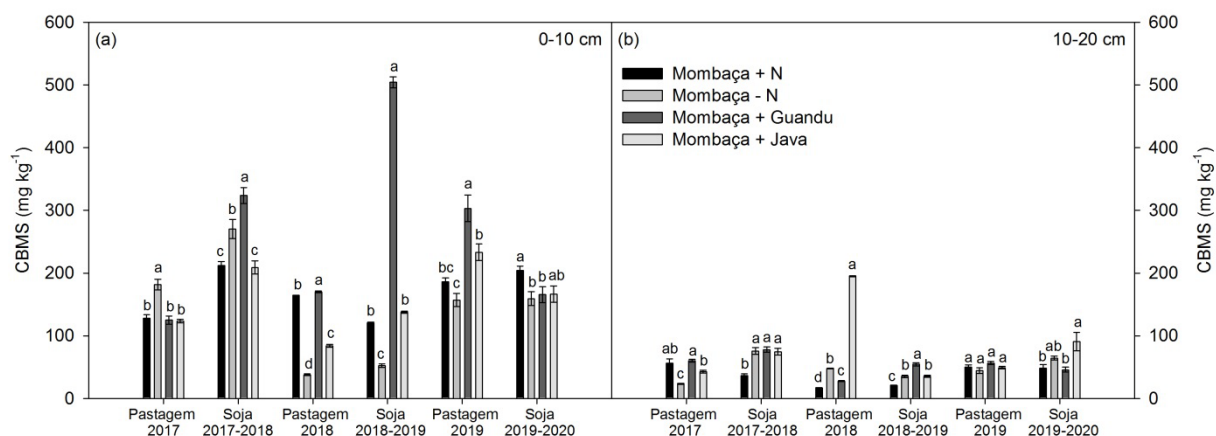
A relação C/N foi maior no manejo M+G na coleta realizada na pastagem em 2017 e na soja 2019-2020, de 0-10 cm (Figura 5a). Na pastagem em 2018, na camada de 0-10 cm, destacaram os manejos consorciados (M+G e M+J) e na safra 2018-2019, o manejo que proporcionou a maior relação C/N foi o M+J (Figura 5a), pois, provavelmente este consórcio favoreceu a estabilização da matéria orgânica do solo com o acúmulo de C, em decorrência da presença de um material com maior relação C/N. Ressalta-se que na camada de 10-20 cm (Figura 5b), na pastagem em 2017 e 2018, a relação C/N nos dois consórcios foram maiores, demonstrando que as raízes das leguminosas podem ter contribuído para o aumento do teor de COT. Já o manejo M+N foi inferior em comparação aos consórcios, neste caso, a adição de N mineral solúvel proporcionou condições para a maior produção de biomassa e, com isso, a forragem acumulou mais N total, diminuindo a relação C/N.

Cabe ressaltar também que na pastagem em 2019, nas duas profundidades avaliadas, os valores da relação C/N no manejo M-N foram superiores aos demais, provavelmente devido ao menor aporte de N no solo. Com a entrada frequente de soja no sistema, a relação C/N vai diminuindo mesmo onde não se aduba com N, como se observou nos valores obtidos na safra 2019-2020.

O carbono da biomassa microbiana do solo (CBMS) apresentou incremento da primeira para segunda coleta, ou seja, depois do cultivo da soja (Figura 6a). Antes da soja (pastagem 2017), na profundidade de 0-10 cm, o teor de CBMS no M-N foi superior aos demais. No M-N, a mineralização de C e N é menor e os valores de CBMS acabam sendo um pouco maiores que no M+N, por exemplo, onde a mineralização é maior porque ocorre a entrada maior de N, que estimula a atividade microbiana. Na profundidade de 10-20 cm, em geral, os valores foram mais baixos (Figura 6b), pois, a biomassa microbiana está mais concentrada na superfície do solo (VARGAS; SHOLLES, 2000), onde há maior aporte de substrato, fazendo com

que os processos de decomposição do substrato e ciclagem de nutrientes ocorram com maior intensidade.

FIGURA 6 - Carbono da biomassa microbiana do solo (CBMS) durante a pastagem 2017, soja 2017-2018, pastagem 2018, soja 2018-2019, pastagem 2019 e soja 2019-2020, nas profundidades de 0-10 cm (a) e 10-20 cm (b)



Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre os manejos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Barra de erros indica o desvio padrão.

Na safra 2017-2018 da cultura da soja, o manejo M+G apresentou teor mais elevado de CBMS, na camada de 0-10 cm (Figura 6a). Ao comparar os valores obtidos entre a coleta antecedente e posterior o cultivo da soja, na profundidade 0-10 cm, houve aumento de 61% de CBMS no manejo M+G, enquanto que para os manejos com M+J e M+N, o aumento foi de 40%. No manejo M-N o acréscimo foi de 32%. É possível verificar que a palhada das culturas anteriores proporcionou, juntamente com a soja, um aporte de carbono da biomassa microbiana, além disso, nos sistemas consorciados em que há rotação de diferentes espécies, ocorre ciclagem de nutrientes, aporte de carbono e principalmente de nitrogênio via fixação biológica de nitrogênio e/ou fertilização mineral. Ambientes com equilíbrio entre aporte de N e C no solo beneficiam a atividade microbiana do solo, como carbono da biomassa (RAPHAEL *et al.*, 2016).

Na terceira coleta, realizada na pastagem em 2018, os valores de CBMS apresentaram uma redução, provavelmente devido à baixa incidência de chuvas (Figura 1), mantendo-se o destaque para o manejo M+G, na profundidade de 0-10 cm (Figura 6a). Já na profundidade de 10-20 cm o destaque foi para o manejo M+J (Figura 6b). Na pastagem em 2019, os valores de CBMS foram superiores

comparados aos de 2018, sendo que o M+G apresentou maior teor de CBMS na camada de 0-10 cm.

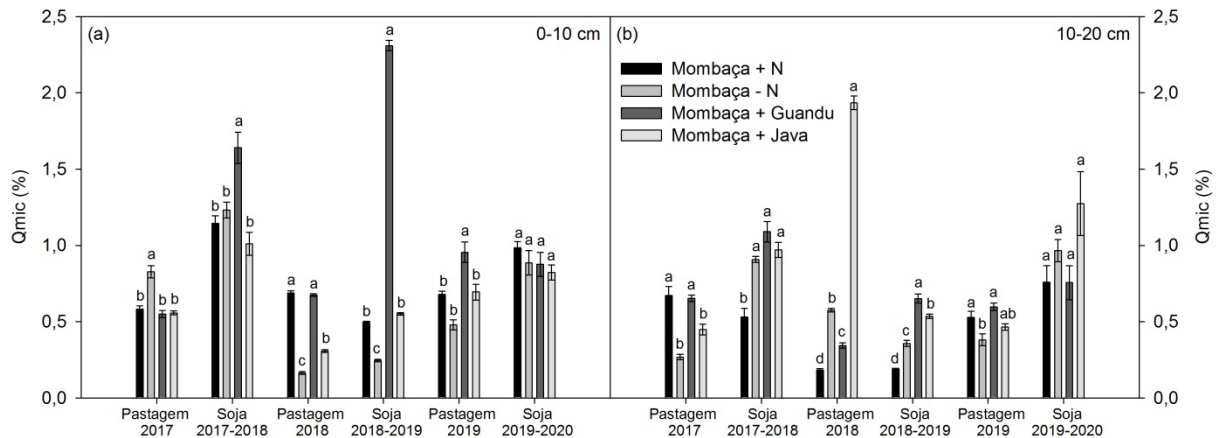
Segundo Tisdall e Oades (1982), o corte da parte aérea de plantas promove aumento na exsudação de compostos orgânicos pelas raízes, além de aumento da rizosfera. Dessa forma, quanto maior a presença de raízes, com destaque ao guandu (Figura 6a) que apresenta um sistema radicular profundo e ramificado, maior deve ser a exsudação de compostos orgânicos, que servirão como fonte de C e energia à BMS, ocorrendo estímulo ao aumento desta.

Pode-se afirmar também que intensidades moderadas de pastejo do capim-mombaça e da java podem influenciar positivamente tanto a parte aérea como o sistema radicular da pastagem. O pastejo estimula o perfilhamento frequente da forrageira, e com isso o crescimento da parte aérea e raízes. Isso traz maior ciclagem de nutrientes para a superfície do solo, melhorando a entrada de C e N no sistema. Pastejo intensivo pode causar a eliminação intensa dos principais pontos de crescimento das plantas (gemas vegetativas), o que atrapalha a brotação das plantas e a ciclagem de C e N no sistema.

Na safra 2018-2019, o destaque também foi para o manejo M+G nas duas profundidades avaliadas (Figura 6a e 6b), demonstrando que o consórcio entre gramíneas e leguminosas pode ter proporcionado condições mais favoráveis. De acordo com Alves *et al.* (2011), condições como temperatura, umidade e aeração favorecem o desenvolvimento de microrganismos, uma vez que oferecem maior diversidade e deposição de resíduos orgânicos no solo. Esses sistemas também oferecem maior suprimento de energia à biomassa microbiana do solo pela liberação de exsudatos, como aminoácidos e ácidos orgânicos através das raízes. Assim, quanto maior a presença e a diversidade das raízes, maior a exsudação de compostos orgânicos que servirão como fonte de C e energia para microrganismos do solo (CHÁVEZ *et al.*, 2011).

O quociente microbiano (Qmic) representa a relação entre o carbono da biomassa microbiana e o carbono orgânico total, podendo ser utilizado como indicador da qualidade da matéria orgânica do solo, indicando a quantidade de carbono orgânico que está imobilizado na biomassa. Podendo demonstrar ainda a eficiência dos microrganismos na utilização dos compostos orgânicos, sendo que valores de quociente microbiano inferiores a 1% indicam que existe algum fator limitante à atividade microbiológica no solo (DADALTO *et al.*, 2015).

FIGURA 7 - Quociente microbiano do solo (Qmic) durante a pastagem 2017, soja 2017-2018, pastagem 2018, soja 2018-2019, pastagem 2019 e soja 2019-2020, nas profundidades de 0-10 cm (a) e 10-20 cm (b)



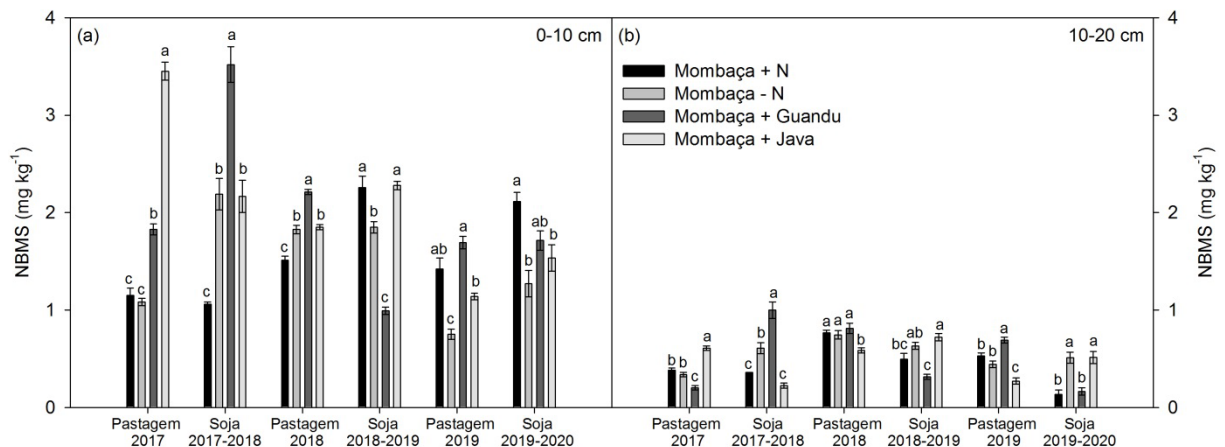
Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre os manejos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Barra de erros indica o desvio padrão.

Os valores obtidos do Qmic foram superiores no manejo M+G durante as coletas realizadas nas duas safras da soja de 2017-2018 e 2018-2019, bem como na pastagem em 2019, na profundidade de 0-10 cm (Figura 7a), podendo ser indicativo que ocorreu uma maior incorporação do carbono orgânico do solo na biomassa microbiana. Na pastagem em 2018, ressalta-se que na camada de 0-10 cm os manejos M+G e M+N apresentaram maior Qmic, e na camada de 10-20 cm, o M+J apresentou um destaque significativo aos demais. Na safra da soja de 2019-2020, não houve diferença significativa entre os manejos para os valores de Qmic.

De maneira geral, o Qmic foi menor nas coletas realizadas durante o desenvolvimento da pastagem, indicando que houve baixa imobilização de C pelos microrganismos do solo ou até mesmo a morte e decomposição destes no solo, que liberaria no solo a fração de C até então assimilada. Também é interessante ressaltar que a umidade do solo no período de manejo da pastagem foi menor, pois houve redução da precipitação (Figura 1), o que refletiu em menor Qmic. Também é possível verificar que em 2019 e 2019-2020 o Qmic foi menor que em 2017-2018 (Figura 7). Isso porque o estoque de C aumentou ao longo dos anos de manejo, onde a pastagem se desenvolveu muito bem e houve uma entrada intensa de C no sistema.

Na coleta antes do plantio da soja, realizada em outubro de 2017, o teor de nitrogênio da biomassa microbiana (NBMS) no manejo M+J foi significativamente superior aos demais, apresentando $3,45 \text{ mg kg}^{-1}$, na profundidade de 0-10 cm (Figura 8a). Na coleta realizada na safra da soja 2017-2018, os manejos consorciados apresentaram maior teor de NBMS, sendo que o M+G foi superior aos demais, em 0-10 cm, apresentando incremento de 69% no NBMS em relação ao M+N e 38% no sistema M-N (Figura 8a). Na camada de 10-20 cm, o M+G também se destacou neste período (Figura 8b).

FIGURA 8 - Nitrogênio da biomassa microbiana do solo (NBMS) durante a pastagem 2017, soja 2017-2018, pastagem 2018, soja 2018-2019 e pastagem 2019 e soja 2019-2020, nas profundidades de 0-10 cm (a) e 10-20 cm (b)



Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre os manejos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Barra de erros indica o desvio padrão.

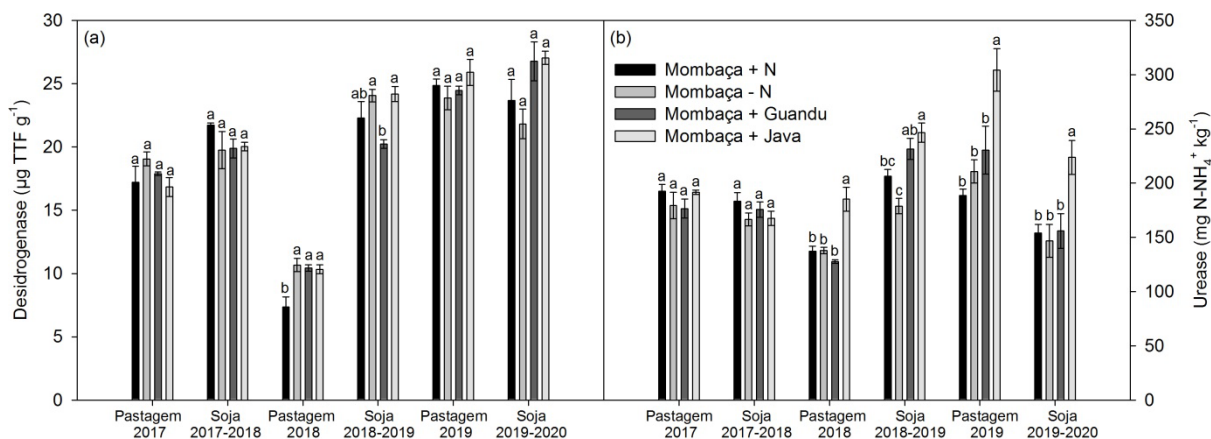
Os manejos consorciados, provavelmente, apresentaram maior aporte de N através da fixação biológica realizada pelas leguminosas, e isso pode ter contribuído para o maior teor de nitrogênio da biomassa microbiana, uma vez que é uma fonte gradualmente liberada pela mineralização. Os resultados encontrados por Laroca *et al.* (2018) são ainda superiores aos encontrados no presente estudo, em que a rotação de culturas, incluindo a leguminosa *Cajanus cajan*, melhorou o teor NBMS em 187% e 97% em consórcio com as gramíneas cultivares BRS Tamani e BRS Piatã, respectivamente, comparado aos solos em sistemas de cultivo sem inclusão de leguminosas. Rotações de culturas diversas, cuidadosamente planejadas, diminuem a prevalência de pragas de insetos, patógenos, doenças e plantas daninhas, com reflexo positivo na fertilidade do solo (BARNEZE *et al.*, 2019).

O manejo M+G, na pastagem em 2018, novamente apresentou maior teor de NBMS do que os demais manejos (Figura 8a), evidenciando o aporte de N deixado pela leguminosa. Este aumento de N inserido no sistema por fixação biológica contribui diretamente para o manejo de pastagens sem adubação nitrogenada mineral, além da transferência de N orgânico como fertilizante da pastagem para a cultura sucessiva, reduzindo a necessidade de fertilizantes minerais em todo o sistema, criando um solo com maior qualidade e evitando riscos associados à contaminação do meio ambiente com N reativo e lixiviação de nitrato (RYSCHAWY *et al.*, 2017). Na safra 2018-2019, na camada de 0-10 cm, os manejos M+N e M+J apresentaram maior teor de NBMS.

Na pastagem em 2019, na profundidade de 0-10 cm, o consórcio M+G apresentou maior teor de NBMS, que se assemelhou ao manejo M+N (Figura 8a). Na profundidade de 10-20 cm, o M+G apresentou o maior teor (Figura 8b). Na safra 2019-2020, na camada de 0-10 cm, os destaques também foram para o M+N, que apresentou similaridade com o M+G (Figura 8a). Neste contexto, introduzir manejos que acrescentem o aporte de N no solo de forma mais sustentável no sistema, como no manejo consorciado com guandu, é interessante, para que com o passar dos anos de produção ocorra aumento na quantidade de matéria orgânica no solo, assim como do nitrogênio presente na biomassa microbiana, elevando o estoque desse nutriente no sistema, servindo como suprimento inicial para suportar o melhor desenvolvimento da soja e do próprio sistema de integração lavoura pecuária. De acordo com Drinkwater, Wagoner e Sarrantonio (1998), o uso de leguminosas, combinado com maior diversidade de espécies em sucessão ou rotação de culturas, aumenta de forma significativa a retenção de C e N no solo.

Além dos indicadores microbiológicos, as enzimas também são bastante utilizadas para avaliar a qualidade do solo devido a sua sensibilidade em fornecer informações sobre o gerenciamento do sistema (LISBOA *et al.*, 2012). Nos primeiros anos de coleta de amostras de solo, pastagem 2017 e soja 2017-2018, a atividade da enzima desidrogenase não apresentou diferença entre os manejos (Figura 9a).

FIGURA 9 - Atividade das enzimas desidrogenase (a) e urease do solo (b) durante a pastagem 2017, soja 2017-2018, pastagem 2018, soja 2018-2019, pastagem 2019 e soja 2019-2020, na profundidade de 0-10 cm



Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre os manejos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Barra de erros indica o desvio padrão.

Durante a coleta realizada na pastagem em 2018, a atividade da enzima diminuiu (Figura 9a), possivelmente, devido à má distribuição das chuvas durante a época de manejo da pastagem em 2018, uma vez que os registros pluviométricos nos meses de abril a julho de 2018 foram baixos (Figura 1). A enzima desidrogenase participa da cadeia respiratória dos microrganismos e está diretamente relacionada ao tipo de solo e às condições de aeração e umidade (BALOTA *et al.*, 2013), sua função está relacionada à oxidação da matéria orgânica do solo. Observa-se que o manejo M+N foi o que apresentou a menor atividade da desidrogenase na pastagem em 2018 (Figura 9a). Provavelmente o acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo nos sistemas consorciados com leguminosas conferiu a adição de MOS mais lábil. Lisboa *et al.* (2012) afirmam que a adição de materiais orgânicos mais lábeis auxilia a atividade dessa enzima, uma vez que ela participa das modificações da matéria orgânica do solo.

Durante a safra 2018-2019 da soja, os manejos M+J e M-N apresentaram valores superiores na atividade da desidrogenase comparado ao manejo M+G (Figura 9a). Os valores obtidos no manejo M+J coincidem com os valores da relação C/N (Figura 5a) que também foram superiores neste consórcio durante a safra 2018-2019 da soja, ou seja, o maior aporte de C estimulou a atividade da enzima.

Na coleta realizada na pastagem em 2019, os manejos não influenciaram na atividade da enzima desidrogenase (Figura 9a). O fato de não haver diferenças entre

os manejos demonstra que a entrada da soja no sistema proporcionou um conteúdo de matéria orgânica e de nutrientes na cultura sucessora (pastagem), onde o M-N se assemelhou aos demais. As atividades enzimáticas microbianas intracelulares e hidrolíticas extracelulares são maiores em solos com sistemas de semeadura direta (MELERO *et al.*, 2009; MANGALASSERY *et al.*, 2015). Acosta-Matínez *et al.* (2008) atribuíram o aumento das atividades enzimáticas em solos com plantio direto devido à presença de biomassa microbiana ativa, constituindo enzimas intracelulares e/ou extracelulares, que permaneceram parte da matéria orgânica do solo.

Por fim, na última coleta realizada na safra da soja, 2019-2020, os manejos se assemelharam novamente em relação à atividade da enzima desidrogenase (Figura 9a), entretanto é válido ressaltar que houve aumento da atividade em comparação às primeiras coletas demonstrando que no decorrer dos anos de manejo, o ambiente em equilíbrio entre aporte de N e C no solo, com estímulo ao desenvolvimento da biomassa de gramíneas e leguminosas, beneficia a atividade da enzima desidrogenase. Nivelles *et al.* (2016) reportaram maior atividade da desidrogenase em sistemas de semeadura direta com plantas de cobertura e adubação mineral de N, já em sistemas com baixo aporte de biomassa, as atividades são menores.

No solo, a enzima urease é encontrada em microrganismos, raízes de plantas e como uma enzima extracelular ligada a compostos orgânicos e inorgânicos, cuja função é catalisar a hidrólise da ureia em amônia e dióxido de carbono, sendo sintetizada por plantas, fungos e bactérias. Não foi observada diferença entre os manejos quanto à atividade da enzima urease nas duas primeiras coletas, na profundidade de 0-10 cm (Figura 9b). Na terceira coleta, realizada na fase do manejo da pastagem em 2018, houve redução da atividade da urease assim como na atividade da desidrogenase (Figura 9a), provavelmente devido à baixa precipitação deste período (Figura 1). Embora os valores, em geral, tenham diminuído, o manejo M+J apresentou maior atividade dessa enzima, se diferenciado dos demais manejos. Na pastagem em 2019 e na soja 2019-2020, o manejo M+J também se destacou em relação aos demais. Essa maior atividade de urease no solo sob cultivo consorciado com a leguminosa java pode estar relacionada à maior relação C/N também encontrada neste período para este consórcio (Figura 5a), ou seja, os resíduos vegetais de alta relação C/N e a ausência de revolvimento das

camadas superficiais do solo, estimulou o aumento da diversidade dos microrganismos heterotróficos e da atividade de enzimas.

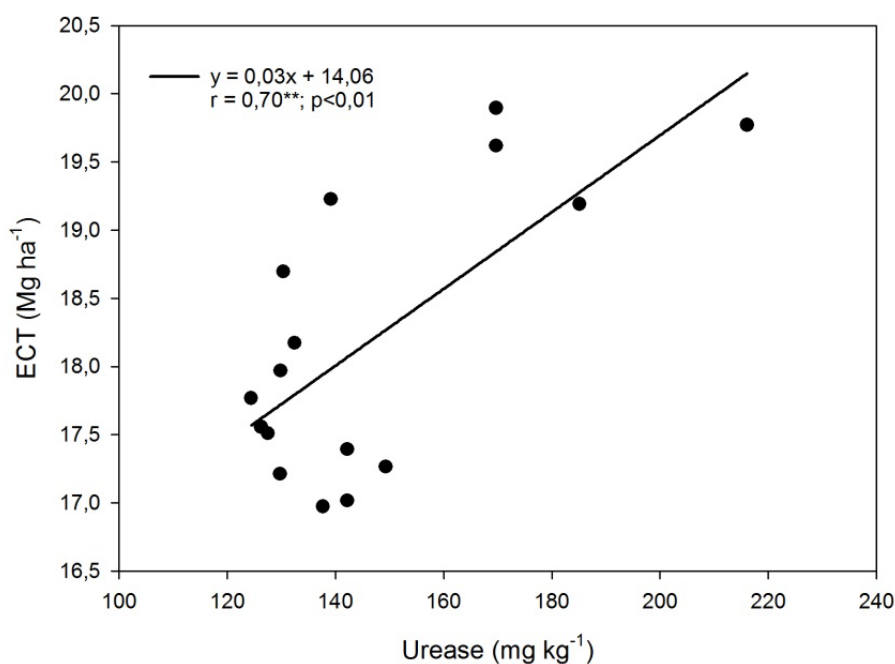
Na quarta coleta realizada durante a safra 2018-2019, os manejos que se destacaram foram os consorciados, M+J e M+G, respectivamente (Figura 9b). Essa maior atividade de urease no solo sob cultivo consorciado pode estar relacionada a uma maior disponibilidade de N orgânico oriundo de exsudados de raízes e dos próprios resíduos radiculares deixados por essa espécie vegetal.

A atividade da enzima urease, na coleta durante a safra 2018-2019 (Figura 9b), aumentou em aproximadamente 27%, 23% e 13% nos manejos M+J, M+G e M+N, respectivamente, em comparação com a pastagem solteira (M-N). Laroca *et al.* (2018) constataram que a atividade da urease aumentou 109% no consórcio de *Brachiaria brizantha* cv. Piatã com feijão guandu em comparação com a cultura solteira. Já Lanna *et al.* (2010) observaram valores baixos para a atividade da urease em áreas cultivadas com leguminosas, atribuindo os resultados à baixa relação C/N dessas espécies vegetais que propicia sua rápida decomposição.

Lanna *et al.* (2010) também constataram que, em solo sob plantio direto (PD), a atividade de urease foi maior, na profundidade de 0-10 cm, comparativamente ao solo sob preparo convencional. Com o decorrer do tempo, em virtude de o PD promover incrementos no teor de matéria orgânica, devido à manutenção dos resíduos vegetais na superfície do solo, fica evidente que deve haver correlação positiva entre atividade de urease e o estoque de carbono e que diferentes sistemas agrícolas contribuem distintamente com os processos bioquímicos do solo.

Dentro deste contexto, ao se correlacionar o ECT e a atividade da urease (Figura 10), observou-se que em todas as coletas a correlação foi positiva, no entanto, apenas na coleta realizada na pastagem em 2018 foi significativa ($r = 0,70$; $p < 0,01$). A intensidade do efeito da matéria orgânica na atividade da enzima urease dependerá da sua disponibilidade como fonte energética para os microrganismos bem como da facilidade de decomposição microbiana da matéria orgânica (DICK *et al.*, 1996; SANTOS; CAMARGO, 1999).

FIGURA 10 - Correlação entre estoque de carbono total (ECT) e atividade da enzima urease do solo durante a pastagem 2018



**significativo a 1%

2.4 Conclusão

- O consórcio com leguminosas (M+G e M+J) contribuiu para aumentar o teor de CBMS, NBMS e a atividade das enzimas desidrogenase e urease, ao longo dos anos de manejo.

- O consórcio com leguminosas (M+G e M+J) aumentou a relação C/N do solo nas avaliações realizadas na pastagem.

- A atividade das enzimas urease e desidrogenase aumentou ao longo do tempo com a introdução da *Macrotyloma axillare* cv. Java no sistema.

- O manejo de N na pastagem, seja por fertilizante mineral ou consórcio com leguminosas, proporcionou, no decorrer dos anos, o aumento dos estoques de N e C demonstrando que a entrada de N no sistema anterior ao cultivo da soja é uma estratégia importante para melhorar as propriedades do solo.

Referências

- ACOSTA-MARTÍNEZ, V. *et al.* Microbial communities and enzymatic activities under different management in semiarid soils. **Applied Soil Ecology**, v. 38, n. 3, p. 249-260, 2008.
- ALVES, T. S. *et al.* Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejos. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 341-347, 2011.
- BALOTA, E. L. *et al.* Enzimas e seu papel na qualidade do solo. **Tópicos em Ciência do Solo, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 8, p. 189-249, 2013.
- BARCELLOS, A. O. *et al.* Sustentabilidade da produção animal baseada em pastagens consorciadas e no emprego de leguminosas exclusivas, na forma de banco de proteína, nos trópicos brasileiros. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, p. 51-67, 2008.
- BARNEZE, A. S. *et al.* Legumes increase grassland productivity with no effect on nitrous oxide emissions. **Plant and Soil**, p. 1-15, 2019.
- BORGHI, E.; CRUSCIOL, C. A. C.; COSTA, C. Desenvolvimento da cultura do milho em consorciação com *Brachiaria brizantha* em sistema de plantio direto. **Energia na Agricultura**, v. 21, n. 3, p. 19-33, 2006.
- BRANDÃO, E. D.; SILVA, I. F. Formação e estabilização de agregados pelo sistema radicular de braquiária em um Nitossolo Vermelho. **Ciência Rural**, v. 42, n. 7, p. 1193-1199, 2012.
- CAMPOS, P., *et al.* Environmental income of livestock grazing on privately-owned silvopastoral farms in Andalusia, Spain. **Land Degradation and Development**, v. 29, p. 250-261, 2018.
- CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O. Determinação de nitrogênio total em solos. In: RAIJ, B. *et al.* **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. p. 262-269.
- CARDONA, C. A. C., *et al.* Contribution of intensive silvopastoral systems to animal performance and to adaptation and mitigation of climate change. **Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias**, v. 27, p. 76-94, 2014.
- CASIDA, L. E.; KLEIN, D. A.; SANTORO, T. Soil dehydrogenase activity. **Soil Science**, v. 98, n. 6, p. 371-376, 1964.
- CÉSAR, N. Z. *et al.* Performance de adubos verdes cultivados em duas épocas do ano no Cerrado do Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 6, n. 2, 2011.

CHÁVEZ, L. F. *et al.* Diversidade metabólica e atividade microbiana no solo em sistema de integração lavoura pecuária sob intensidades de pastejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 1254-1261, 2011.

CHERR, C. M.; SCHOLBERG, J. M. S.; MCSORLEY, R. Green manure approaches to crop production: a synthesis. **Agronomy Journal**, v. 98, p. 302-319, 2006.

COSTA, N. R. *et al.* Atributos do solo e acúmulo de carbono na integração lavoura-pecuária em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 852-863, 2015.

DADALTO, J. P. *et al.* Sistema de preparo do solo e sua influência na atividade microbiana. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 3, p.506-513, 2015.

DICK, R. P.; BREAKWELL, D. P.; TURCO, R. F. **Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators**. In: DORAN, J.W. JONES, A.J., eds. *Methods for assessing soil quality*. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 247-272.

DRINKWATER, L. E.; WAGONER, P.; SARRANTONIO, M. Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. **Nature**, v. 396, n. 6708, p. 262-265, 1998.

ELBERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal Soil Science**, v. 75, p. 529-538, 1995.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de solo, 212, p. 1997.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F.; SANTOS, A. B. **Maximização da eficiência de produção das culturas**. Brasília, Embrapa-SCT/Embrapa-CNPAP, 1999. 294 p.

FERREIRA, A. S.; CAMARGO, F. A. O.; VIDOR, C. Utilização de microondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 4, p. 991-996, 1999.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia (UFLA)**, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FRASIER, I. *et al.* High quality residues from cover crops favor changes in microbial community and enhance C and N sequestration. **Global Ecology and Conservation**, v. 6, p. 242-256, 2016.

KRAMBERGER, B. *et al.* Effects of cover crops on soil mineral nitrogen and on the yield and nitrogen content of maize. **European Journal of Agronomy**, v. 31, p. 103-109, 2009.

- LANNA, A. C. *et al.* Atividade de urease no solo com feijoeiro influenciada pela cobertura vegetal e sistemas de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 6, p. 1933-1939, 2010.
- LAROCA, J. V. S. *et al.* Soil quality and soybean productivity in crop-livestock integrated system in no-tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 11, p. 1248-1258, 2018.
- LISBOA, B. B. *et al.* Indicadores microbianos de qualidade do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 45-55, 2012.
- LUCHESE, E. B.; FAVERO, L. O. B.; LENZI, E. **Fundamentos da química do solo teoria e prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2002.
- MANGALASSERY, S. *et al.* Impacts of zero tillage on soil enzyme activities, microbial characteristics and organic matter functional chemistry in temperate soils. **European Journal of Soil Biology**, v. 68, p. 9-17, 2015.
- MATTOS, E. S. *et al.* Carbono total e frações químicas de carbono do solo. *In*: MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria Orgânica do Solo: métodos de análises**. 2. ed. Viçosa, MG: UFV - Gefert, 2017. 221 p.
- MELERO, S. *et al.* Conservation tillage: short-and long-term effects on soil carbon fractions and enzymatic activities under Mediterranean conditions. **Soil and Tillage Research**, v. 104, p. 292-298, 2009.
- MORAIS, D. B. *et al.* Maize Intercropping Systems Improve Nutrient for the Cowpea Crop in Sandy Soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 51, n. 4, p. 491-502, 2020.
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Editora UFLA, 2006. 729 p.
- MORILLAS, L. *et al.* Nitrogen supply modulates the effect of changes in drying–rewetting frequency on soil C and N cycling and greenhouse gas exchange. **Global Change Biology**, v. 21, n. 10, p. 3854-3863, 2015.
- NIVELLE, E. *et al.* Functional response of soil microbial communities to tillage, cover crops and nitrogen fertilization. **Applied Soil Ecology**, v. 108, p. 147-155, 2016.
- RAIJ, B. VAN *et al.* **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001, 285 p.
- RAPHAEL, J. P. A. *et al.* Soil organic matter in crop rotations under no-till. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 45-53, 2016.
- RYSCHAWY, J. *et al.* Designing crop–livestock integration at different levels: toward new agroecological models? **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 108, p. 5-20, 2017.

- SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. 491 p.
- SARTO, M. V. M *et al.* Soil microbial community and activity in a tropical integrated crop-livestock system. **Applied Soil Ecology**, v. 145, 2020.
- SCHETTINI, B. L. S. *et al.* Estocagem de carbono em sistemas silvipastoris com diferentes arranjos e materiais genéticos. **Advances in Forestry Science**, v. 4, p. 175–179, 2018.
- SILVA, E. C. Manejo de nitrogênio no milho em Latossolo Vermelho sob plantio direto com diferentes plantas de cobertura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 3, p. 477-486, 2006.
- SINSABAUGH, R. L. *et al.* Scaling microbial biomass, metabolism and resource supply. **Biogeochemistry**, v. 122, n. 2-3, p. 175-190, 2015.
- STEVENSON, F. J. **Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients**. New York: J. Wiley, 1986.
- TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Assay of urease activity in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 4, p. 479-487, 1972.
- TEDESCO, M. J.; BOHNEM, H.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p. (Boletim Técnico, 5).
- TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and waterstable aggregates in soil. **European Journal of Soil Science**, v. 33, p. 141-163, 1982.
- VARGAS, L. K.; SCHOLLES, D. Biomassa microbiana e produção de C-CO₂ e N mineral de um Podzólico Vermelho-Escuro submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 35-42, 2000.
- YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, p. 1467-1476, 1988.
- ZHOU, Z. H.; WANG, C. K. Reviews and syntheses: Soil resources and climate jointly drive variations in microbial biomass carbon and nitrogen in China's forest ecosystems. **Biogeosciences**, v. 12, n. 22, p. 6751-6760, 2015.

3 CAPÍTULO II: Estoque de C e N no solo e emissão de CO₂ e NH₃ em sistema de produção pastagem-soja manejado com nitrogênio mineral e consorciação de leguminosas na pastagem

Resumo

A compreensão dos fatores que contribuem para as perdas de dióxido de carbono (CO₂) e volatilização de amônia (NH₃) em solos agrícolas é fundamental para determinar estratégias de redução das emissões desses gases, e proporcionar o maior estoque de carbono (C) e nitrogênio (N) no solo. O objetivo do estudo foi quantificar as entradas de C e N no solo e as emissões de CO₂ e NH₃, em sistema de integração lavoura-pecuária com consórcio de leguminosas e adubação nitrogenada na pastagem. O experimento foi realizado em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico argilúvico, seguindo o delineamento em blocos casualizados, com quatro tratamentos e quatro repetições: capim mombaça (*Panicum maximum* cv. Mombaça), com aplicação de N (ureia); capim mombaça, sem aplicação de N; capim mombaça, em consórcio com a leguminosa forrageira feijão guandu (*Cajanus cajan*); e capim mombaça, em consórcio com a leguminosa forrageira java (*Macrotyloma axillare* cv. Java). Foram cultivadas pastagem e soja em três safras consecutivas, sendo coletadas amostras de solo ao início e final de cada cultivo para análises do estoque de C e N (ECT e ENT). A volatilização de NH₃ e emissão de CO₂ foram avaliadas a cada 15 dias no experimento, com avaliações simultâneas da umidade e temperatura do solo. Os maiores ECT ocorreram de 0-20 e 20-40 cm e posterior ao manejo da cultura das gramíneas, proporcionalmente às menores emissões de CO₂. A maior emissão de CO₂ está associada à umidade do solo, principalmente após as chuvas, apresentando correlação positiva entre a umidade e o fluxo de CO₂ do solo. Os maiores ENT ocorreram de 0-20 e 20-40 cm e durante o cultivo da soja, proporcionalmente à menor volatilização de NH₃. As maiores entradas de C e N ocorreram nos manejos M+N, M+G e M+J. Ao longo dos anos de manejo houve um aumento nos estoques de C e N e redução das perdas por emissão de CO₂ e volatilização de NH₃, proporcionando maior eficiência no uso do N.

Palavras-chave: sequestro de carbono; fluxo de CO₂; volatilização de amônia, fixação biológica de N.

Abstract

Understanding the factors that contribute to carbon dioxide (CO₂) losses and ammonia (NH₃) volatilization in agricultural soils is essential to determine strategies to reduce emissions of these gases, and provide the largest stock of carbon (C) and nitrogen (N) on the ground. The objective of the study was to quantify the C and N inputs in the soil and the CO₂ and NH₃ emissions, in a crop-livestock integration system with a consortium of legumes and nitrogen fertilization in the pasture. The experiment was carried out in a dystrophic Red-Yellow Latosol, following a randomized block design, with four treatments and four repetitions: mombaça grass (*Panicum maximum* cv. Mombaça), with application of N (urea); mombaça grass, without application of N; mombaça grass, in consortium with pigeon pea (*Cajanus cajan*); and mombaça grass, in consortium with the forage legume java (*Macrotyloma axillare* cv. Java). Pasture and soybeans were cultivated in three consecutive harvests, and soil samples were collected at the beginning and end of each

cultivation for analysis of the C and N stock. NH₃ volatilization and CO₂ emission were evaluated every 15 days in the experiment, with evaluations simultaneous soil moisture and temperature. The highest ECT occurred between 0-20 and 20-40 cm and after the management of grass cultivation, in proportion to the lowest CO₂ emissions. The highest CO₂ emission is associated with soil moisture, especially after rains, with a positive correlation between moisture and the CO₂ flow of the soil. The highest ENT occurred between 0-20 and 20-40 cm and during soybean cultivation, in proportion to the lower NH₃ volatilization. The largest C and N entries occurred in the M+N, M+G and M+J managements. Over the years of management there has been an increase in C and N stocks and a reduction in losses due to CO₂ emissions and NH₃ volatilization, providing greater efficiency in the use of N.

Keywords: carbon sequestration; CO₂ flow; ammonia volatilization; biological N fixation.

3.1 Introdução

O solo é um importante compartimento de carbono (C) e pode desempenhar um papel fundamental na mitigação das concentrações globais de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera e consequentes mudanças climáticas globais (CARVALHO *et al.*, 2010). Para tal, estratégias para aumentar o C do solo, envolvem o aumento de entradas de C e a diminuição das perdas. Neste contexto, os sistemas integrados de lavoura-pecuária (ILP) com plantio direto (PD) são uma estratégia para substituição de pastagens degradadas e têm o potencial de contribuir não apenas para a sustentabilidade agrícola, mas também para o sequestro de C (SARTO *et al.*, 2020a). A adoção do plantio direto na agricultura tem o potencial global de sequestrar 62-350 kg C ha⁻¹ por ano (WEST; POST, 2002).

O uso de gramíneas é essencial para a viabilidade e a sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola em solos arenosos, porque as gramíneas favorecem a produção de biomassa e maiores taxas de lotação em pastagens (CARVALHO *et al.*, 2014). De fato, tanto os agricultores quanto a sociedade como um todo podem se beneficiar de sistemas integrados, uma vez que a manutenção da fertilidade do solo é fundamental para a conservação dos recursos naturais e a prestação de serviços ambientais (LEMAIRE *et al.*, 2014; SALTON, 2014). Entretanto, condições tropicais e com baixo teor de argila favorecem a rápida decomposição da matéria orgânica do solo (MOS) (GMACH *et al.*, 2020), e isso requer um suprimento alto e constante de matéria seca (MS), C e nitrogênio (N) no solo (HATI *et al.*, 2020).

O N também é um elemento extremamente importante para melhorar esse ambiente de produção, porém ele é muito dinâmico no solo, e também muito afetado pelas condições climáticas e do solo. Por exemplo, as perdas de N por volatilização ocorrem na hidrólise enzimática da ureia no solo, com a produção de amônia (NH_3) (WANG *et al.*, 2020), além disso, durante o ciclo do N existe o processo de amonificação, que também é responsável pela liberação de NH_3 .

Diante disso, o sistema de ILP com PD pode ser melhorado pela inserção de consórcios de gramíneas com leguminosas na fase de pastagem. As gramíneas apresentam decomposição lenta com alto potencial de produção de matéria seca e as leguminosas atuam na fixação biológica de nitrogênio (FBN), estratégia para aumentar o N do solo, e têm uma decomposição mais rápida (ROSOLEM; LI; GARCIA, 2016; CALONEGO *et al.*, 2017).

O cultivo com leguminosas pode reduzir as perdas de N do solo (LI *et al.*, 2016) e aumentar o sequestro de C devido ao aumento das entradas de C pela planta (DE DEYN *et al.*, 2011). Além disso, a inclusão de leguminosas pode influenciar nas emissões de gases do efeito estufa (GEE) (BARNEZE *et al.*, 2019), ao promover o aumento da biomassa do solo, sendo isso associado a aumentos no estoque de C e N no solo, e consequentemente reduzindo as perdas de C e N do solo que ocorrem por respiração e volatilização (WU *et al.*, 2017).

Existem parâmetros como a temperatura do solo e o teor de água no solo que também exercem influência no fluxo de CO_2 no solo (DUIKER; LAL, 2000). A temperatura do solo afeta diretamente a atividade microbiana e a respiração radicular (SILVA-OLAYA *et al.*, 2013), e o aumento do teor de água no solo devido às chuvas favorece a remoção de quantidades significativas de CO_2 do solo à medida que a água entra no espaço poroso (SMART; PEÑUELAS, 2005).

Partindo do pressuposto de que o N é muito dinâmico no solo e que a emissão de CO_2 do solo é influenciada pelas propriedades inerentes do solo e fatores ambientais, que exibem variabilidade espacial e temporal, respectivamente, tem-se a hipótese que o sistema sucessão pastagem-soja com manejo de N mineral e FBN na pastagem possa aumentar as entradas de C e N e diminuir as perdas.

O objetivo deste estudo foi quantificar as entradas de C e N em todo perfil do solo, e caracterizar o comportamento da emissão de CO_2 do solo e sua relação com as propriedades edafoclimáticas do solo, bem como a volatilização de NH_3 , em áreas com manejos de N via adubação e fixação biológica na fase da pastagem.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Descrição da área experimental

O experimento foi instalado, em 2017, na Fazenda Experimental da Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE), latitude 22°16'59" S e longitude 51°40'34" O, em Presidente Bernardes - SP. O solo da área foi caracterizado quimicamente (RAIJ *et al.*, 2001) no início do experimento (Tabela 1), e classificado como um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico argilúvico com 17% de argila na camada de 0-10 cm, de acordo com a análise granulométrica (EMBRAPA, 1997) realizada até um metro de profundidade (Tabela 2).

TABELA 1 - Caracterização química do solo da área experimental, 2017

Prof. (cm)	pH (CaCl ₂)	MO ^a (gdm ⁻³)	P _(resina) ---- (mg dm ⁻³) ----	S ----	H+Al -----	K -----	Ca (mmol _c dm ⁻³)	Mg -----	SB ^b -----	CTC ^c -----	V ^d (%)
0-20	5,9	20,7	6,3	5,9	13,5	1,0	22,9	16,5	40,5	54,0	73,8
20-40	5,3	14,1	3,3	6,7	17,4	0,4	13,4	10,2	24,0	41,4	56,5

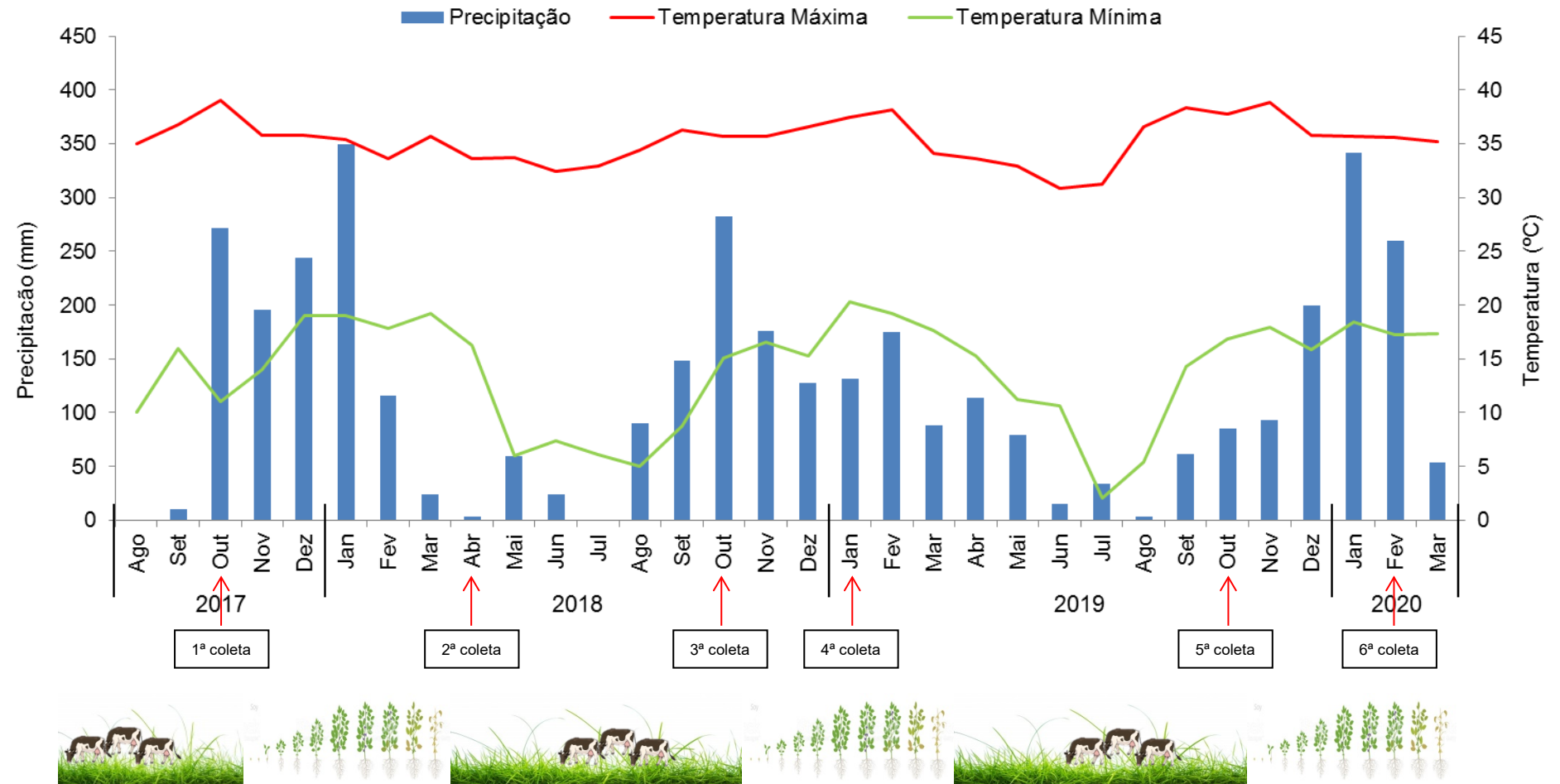
^a matéria orgânica do solo; ^b soma de bases; ^c capacidade de troca de cátions; ^d saturação por bases

TABELA 2 - Análise granulométrica, da área experimental, 2017

Profundidade (cm)	Granulometria (g kg ⁻¹)			Classe Textural
	Areia	Silte	Argila	
0-10	773	48	179	Média Arenosa
10-20	763	68	169	Média Arenosa
20-40	736	41	223	Média Arenosa
40-60	707	63	230	Média Arenosa
60-80	695	55	250	Média Arenosa
80-100	697	56	247	Média Arenosa

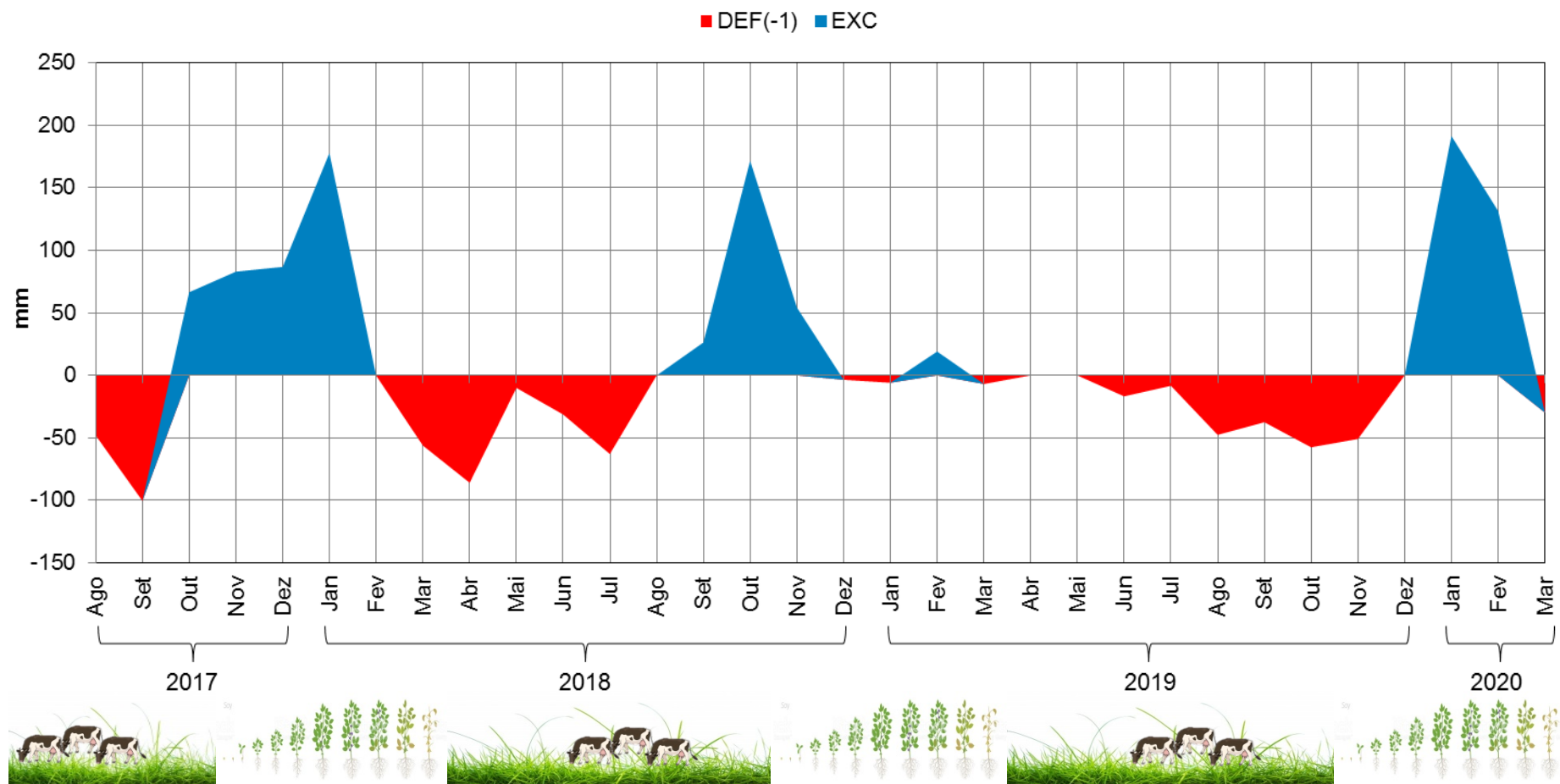
O clima da região é classificado como tipo Cwa, segundo classificação de Köppen, com estação chuvosa de outubro a março, estação seca de abril a setembro, e temperaturas médias anuais de 25°C. A precipitação e as temperaturas na área experimental foram monitoradas, Figura 1, com indicação dos períodos de coleta de amostras do solo. Também foi realizado o cálculo do balanço hídrico a fim de verificar a influência destes dados nos manejos executados (Figura 2).

FIGURA 1 - Condições climáticas registradas na Fazenda Experimental e períodos de coleta de amostras de solo durante os anos de manejo



Fonte: Dados Meteorológicos Fazenda Experimental.
Nota: Dados trabalhados pelo autor.

FIGURA 2 - Balanço hídrico obtido durante os anos de manejo



Fonte: Dados Meteorológicos Fazenda Experimental.
 Nota: Dados trabalhados pelo autor.

3.2.2 Delineamento experimental e caracterização dos manejos

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com quatro tratamentos e quatro repetições, sendo eles: Capim mombaça (*Panicum maximum* cv. Mombaça) solteiro com adubação nitrogenada (200 kg ha⁻¹ de N) (M+N); Capim mombaça solteiro sem adubação nitrogenada (M-N); Capim mombaça consorciado com a leguminosa forrageira denominada de feijão guandu (*Cajanus cajan*) sem adubação nitrogenada (M+G); Capim mombaça consorciado com a leguminosa forrageira Java (*Macrotyloma axillare* cv. Java) sem adubação nitrogenada (M+J).

A pastagem foi cultivada nos anos de 2015 e 2016, e em agosto de 2017 a área foi cercada novamente para pastejo, constituindo-se de 16 parcelas, de 69 m de comprimento e 49,25 m de largura. Posteriormente, foi realizada a dessecação da área, com 6 L ha⁻¹ de Glyphosate. A calagem foi realizada, conforme a Tabela 1, com dose de 1 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT 85%) em 22 de setembro de 2017 e a gessagem com 0,5 Mg ha⁻¹ em 28 de setembro de 2017.

A cultivar da soja TMG-7062 IPRO®, a partir de sementes tratadas, com Profol com Co-Mo dosagem de 260 mL para 1000 kg de sementes, com stand de 13,8 plantas m⁻¹, foram semeadas, com espaçamento entre linhas 0,45 m, anualmente (safra 2017-2018; 2018-2019 e 2019-2020) entre outubro e novembro. Foi utilizado o inoculante Masterfix L Premier® com 8 doses ha⁻¹. Foi realizada a adubação de plantio com 350 kg ha⁻¹ de NPK 04-30-10, com S 3,54%, Ca 5,02%, Mn 0,084%, Cu 0,26%, B 0,858%, Zn 0,288% e Fe 0,096%.

A colheita da soja foi realizada anualmente entre fevereiro e março. E na sequência, o capim e as leguminosas retornaram à área na segunda quinzena de março dos anos de 2018 e 2019, cujo espaçamento entre linhas foi de 0,90 m para as leguminosas e 0,225 m para a gramínea. No manejo que recebeu adubação nitrogenada, o N foi aplicado via ureia, em períodos chuvosos (junho e agosto), na dose de 200 kg ha⁻¹ de N, em duas aplicações. Em julho e agosto foi realizado o pastejo dos animais, e em outubro de 2018 e 2019 foi realizada a dessecação do pasto para semeadura da safra de verão, com 6 L ha⁻¹ de Glyphosate.

3.2.3 Determinação do estoque de C e N total do solo

Antes do cultivo da soja, na fase de pastagem, nos anos de 2017, 2018 e 2019, e durante o estágio R5 da soja, nas safras 2017-2018, 2018-2019 e 2019-2020, foram abertas 16 trincheiras, sendo uma em cada parcela experimental, com as seguintes dimensões: 1,20 m (P) x 1,20 m (C) x 0,90 (L), para as coletas das amostras de solo deformadas para análise química e indeformadas, com anéis volumétricos de 5 cm, para análise da densidade, nas profundidades de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm. As amostras foram transportadas para o Laboratório de Análise Química de Tecidos Vegetais, localizado no Campus II da UNOESTE.

Para análise das propriedades químicas, as amostras foram secas ao ar, triturada e peneirada através de uma malha de 2 mm em temperatura ambiente (25-30°C). As amostras foram submetidas ao método de Mattos *et al.* (2017) adaptado de Yeomans e Bremner (1988) para determinação do carbono total. O nitrogênio total (NT) foi determinado de acordo com Cantarella e Trivelin (2001). A determinação da densidade do solo foi realizada conforme a metodologia da EMBRAPA (1997).

Os estoques de carbono orgânico total (ECT) e nitrogênio total (ENT) foram calculados com base na massa equivalente de solo (ELBERT; BETTANY, 1995), de acordo com a seguinte equação: $ECT/ENT (Mg\ ha^{-1}) = \{Teor\ de\ C(N) \times E \times D\}$, em que C ou N = valor em $g\ kg^{-1}$, E = espessura da camada (cm) e D = densidade do solo ($g\ cm^{-3}$) na camada.

3.2.4 Emissão de dióxido de carbono (CO₂) do solo

A emissão de CO₂ do solo foi registrada utilizando-se de um sistema portátil da companhia LI-COR (LI-8100), Nebraska/EUA (Figuras 29 e 30 do ANEXO A). Este sistema monitora as alterações na concentração de CO₂, em $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$, dentro da câmara, por meio de espectroscopia de absorção óptica na região do infravermelho (IRGA - Infra Red Gas Analyzer). Esse é acoplado sobre tubos de PCV com diâmetro de 20 cm e inseridos 2 cm abaixo da superfície do solo. Os resultados foram expressos em $kg\ ha^{-1}\ dia^{-1}$. Concomitantemente a estas leituras, também foi registrada a temperatura do solo na camada de 0-10 cm de

profundidade, utilizando-se de um termômetro portátil, e a umidade, na camada de 0-10 cm, utilizando-se o método gravimétrico.

Em cada parcela experimental, foi inserido um tubo de PVC para as avaliações da emissão de CO₂ do solo, sendo a temperatura e a umidade do solo também investigadas próximas aos tubos. As avaliações foram realizadas quinzenalmente de agosto de 2017 a março de 2020, entre 8:00 e 11:00 horas.

3.2.5 Volatilização de amônia (NH₃) do solo

A avaliação da volatilização da amônia (NH₃) foi realizada conforme Nömmik (1973) com adaptações, através da instalação de coletores de NH₃ na área experimental. Os coletores (Figuras 31 a 34 do ANEXO A) consistiram-se de uma estrutura tubular de PVC, com diâmetro de 20 cm e altura de 35 cm, aos quais foram inseridos em uma base de PVC com 19 cm de diâmetro e 10 cm de altura. As bases foram fixadas a 2,5 cm de profundidade no solo e foram protegidas, em sua extremidade, com um prato de polietileno, com uma abertura de 2 cm entre o prato e a base coletora. Dentro das estruturas de PVC foram dispostos dois discos de espuma a 10 e 20 cm de altura do solo, ambos com espessura de 5 cm e diâmetro de 19,5 cm, que foram umedecidas com 100 mL de ácido fosfórico (0,167 mol L⁻¹) para captar a NH₃. Ressalta-se que o disco superior, a 20 cm do solo, captura NH₃ do ar atmosférico proveniente do exterior do cilindro para que não haja interferência na espuma que capta a NH₃ volatilizada do solo, que está a 10 cm do solo.

A substituição das espumas ocorreu a cada 15 dias, onde eram recolhidas e armazenadas em sacos plásticos fechados e encaminhadas ao Laboratório de Análise Química de Solos/UNOESTE para a determinação da NH₃ seguindo o método de Cantarella e Trivellin (2001). Os resultados foram expressos em kg NH₃ ha⁻¹.

3.2.6 Análise estatística

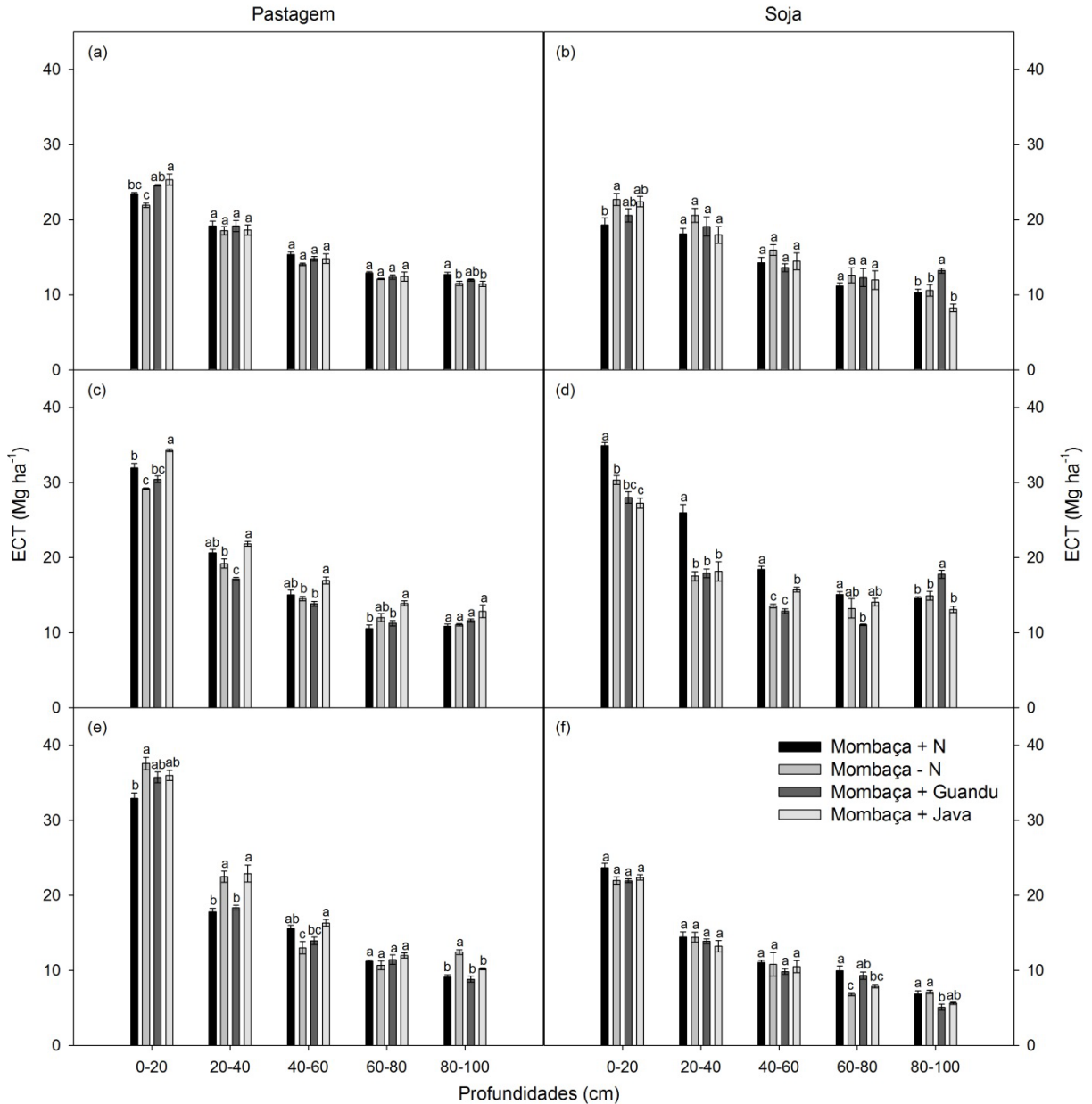
Os resultados foram submetidos à análise de variância e os efeitos dos tratamentos foram comparados pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade,

utilizando-se software estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011). Também foi realizada correlação de Pearson (r) entre fluxo de CO_2 (FCO_2) e umidade do solo.

3.3 Resultados e Discussão

Os estoques de carbono total (ECT) foram superiores nas camadas superficiais do solo (0-20 e 20-40 cm), sendo que este reduziu em profundidade (Figura 3). Esse maior estoque superficial está associado ao maior acúmulo de matéria orgânica nessa camada, aumentando os teores e o estoque de C.

FIGURA 3 - Estoque de carbono total (ECT) do solo durante a pastagem 2017 (a), soja 2017-2018 (b), pastagem 2018 (c), soja 2018-2019 (d), pastagem 2019 (e) e soja 2019-2020 (f)



Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre os manejos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Barra de erros indica o desvio padrão.

O ECT foi significativamente superior nos manejos consorciados M+G e M+J na profundidade de 0-20 cm, durante a pastagem em 2017 (Figura 3a), apresentando aumento de 13,4% e 10,7%, respectivamente, comparado à monocultura (M-N). Estes resultados estão relacionados ao elevado aporte de resíduos depositados nesses manejos, proporcionando maior incorporação de C e nutrientes ao solo. Laroca *et al.* (2018) encontraram resultados ainda superiores no

consórcio com feijão-caupi, ao qual proporcionou aumento de 33,6% de ECT comparado ao tratamento sem consórcio. Resultados semelhantes foram encontrados por Frasier *et al.* (2016), que observaram aumentos dos estoques de C e N em sistema de plantio direto de sorgo plantado no verão alternado com as plantas de cobertura (centeio e ervilhaca). Estes resultados reafirmam a importância da maior biodiversidade de plantas para manter o funcionamento do ecossistema do solo e seus serviços agronômicos e ambientais.

Na safra da soja em 2017-2018, na camada 0-20 cm (Figura 3b), houve diferença entre M-N e M+N, sendo que o manejo M-N apresentou ECT superior, isso demonstra que a introdução da soja no sistema de produção foi interessante para maior entrada de N via fixação biológica, aumentando a quantidade de biomassa da cultura sucessora (gramíneas) e elevando o carbono orgânico incorporado ao solo. Na profundidade de 80-100 cm (Figura 3b), o manejo M+G apresentou maior aporte de C, provavelmente devido ao sistema radicular profundo e ramificado do guandu. O feijão guandu é considerado uma espécie descompactadora de solo, com bom potencial na absorção de água e possibilidade de reciclagem de nutrientes das camadas mais profundas (ALVARENGA *et al.*, 1995).

Durante o manejo da pastagem em 2018, o destaque no incremento no ECT no solo, na profundidade de 0-20 cm, foi no manejo M+J, seguido dos manejos M+N e M+G, os quais se assemelharam (Figura 3c). Estes resultados demonstram que a introdução de N pela fixação biológica das leguminosas e pelo fertilizante contribuiu para o aumento do estoque de C. Em profundidade, ou seja, nas camadas de 20-40, 40-60 e 60-80 cm, a java (M+J) contribuiu significativamente para o maior aporte de C, demonstrando que essa leguminosa também favoreceu a ciclagem de nutrientes ao longo do perfil do solo. A introdução de espécies leguminosas, dentro do sistema de produção, estimula a elevação da biomassa microbiana, aumentando a ciclagem de nutrientes, os teores de matéria orgânica bem como a capacidade produtiva dos solos (MORILLAS *et al.*, 2015).

Na safra 2018-2019 (Figura 3d), o manejo M+N proporcionou maior ECT nas profundidades 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm, sendo um indicativo que adubação nitrogenada introduzida na cultura antecessora (gramínea) refletiu em maior produção de biomassa vegetal e disponibilidade de C no solo no decorrer do tempo.

Durante o manejo da pastagem em 2019 houve incremento no ECT em todos os manejos, de 0-20 cm (Figura 3e), e provavelmente, isso pode estar

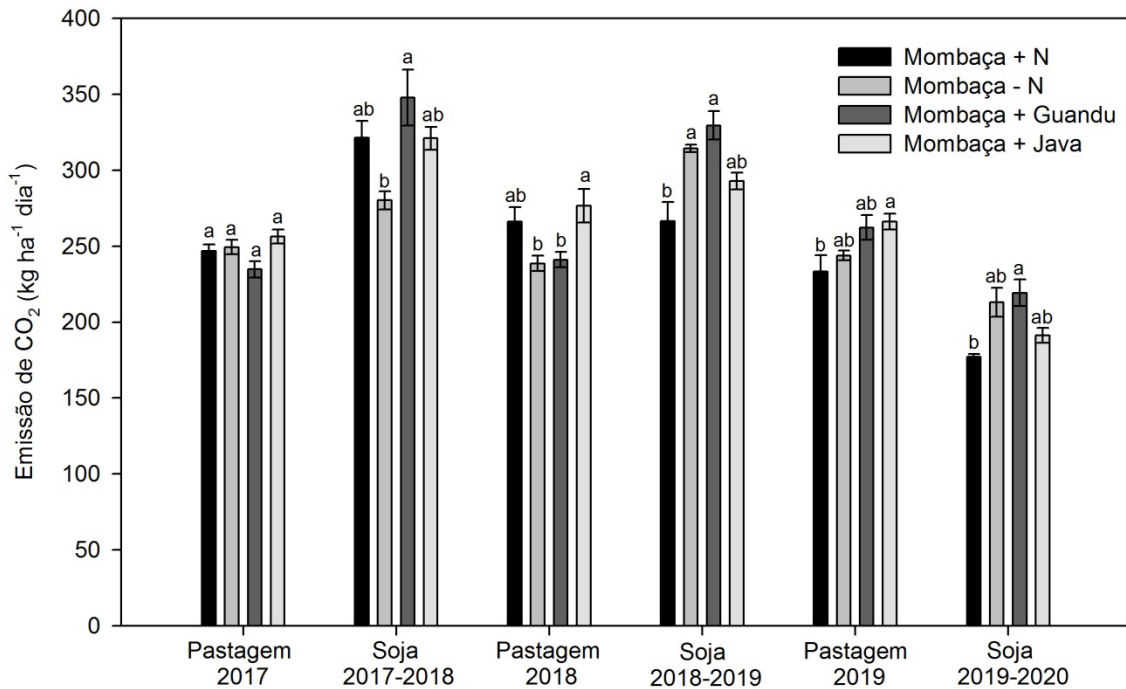
relacionado ao fato de que as gramíneas são de decomposição mais lenta e apresentam uma relação C/N maior, resultando em elevados estoques de C e alta densidade radicular na parte superior do solo. É interessante destacar que o manejo M-N se assemelhou com os manejos consorciados M+G e M+J, na profundidade de 0-20 cm (Figura 3e), demonstrando que até o manejo sem N resultou em boas condições de ECT diante da disponibilidade de biomassa vegetal no decorrer do manejo do sistema e de nutrientes empregada pelo sistema ILP e PD. É importante destacar que o manejo M+N incrementa o teor de N no sistema de produção e proporciona ambiente favorável ao crescimento das plantas e dos microrganismos, acelerando a decomposição de matéria orgânica e a mineralização de N por microrganismos. Diante disso, muitas vezes acaba sendo mais demorado aumentar o ECT neste manejo em solos arenosos.

Na última avaliação realizada durante safra da soja em 2019-2020 (Figura 3f), constatou-se que, assim como em todas as outras safras da soja, o ECT foi menor quando comparado à época do manejo da pastagem, já que as gramíneas apresentam relação C/N superior à cultura da soja. As gramíneas aumentam os estoques de COT no solo superficialmente, pois são espécies mais exploradoras, que investem mais energia no desenvolvimento das raízes para adquirir nutrientes do solo (DE DEYN; CORNELISSEN; BARDGETT, 2008; MAIRE *et al.*, 2009), que resultam em maior transferência subterrânea de C (KUZYAKOV; DOMANSKI, 2000; ROSSET *et al.*, 2014; SARITO *et al.*, 2020b) e maior desenvolvimento radicular. Os manejos nesta safra 2019-2020 apresentaram semelhanças quanto ao ECT nas primeiras camadas (0-20, 20-40 e 40-60 cm), enquanto que na camada de 60-80 cm, destacaram-se os manejos M+N e M+G.

A dinâmica de C no sistema solo-atmosfera também pode ser avaliada considerando a emissão de CO₂ do solo nos manejos. A média da emissão de CO₂ registrada durante o monitoramento na cultura da soja, 2017-2018, do manejo M-N foi 19,5%; 7,7% e 7,6% inferior ao M+G, M+J e M+N, respectivamente (Figura 4). Alguns estudos sustentam que a adição de nitrogênio ao solo aumenta a emissão de CO₂, pois estimula a decomposição dos resíduos, principalmente os mais recalcitrantes (RECOUS; AITA; MARY, 1999; MARQUES *et al.*, 2000). Ainda mais no caso da soja que apresenta baixa relação C/N e os resíduos entram em decomposição rapidamente logo após a colheita. Os resultados obtidos no presente estudo (Figura 4) corroboram as constatações de Wang *et al.* (2020), que ao utilizar

ureia e nitrato de amônio em solo argiloso verificaram que o curso das emissões de CO₂ aumentou significativamente devido à respiração microbiana. As taxas de emissão de CO₂ foram afetadas pelas variações dos manejos da adubação nitrogenada do solo, cujos valores mais elevados foram quantificados nas áreas de consórcio M+G e M+J, e também no M+N em alguns períodos (soja 2017-2018 e pastagem 2018) (Figura 4). Segundo Tótola e Chaer (2002) altas taxas de emissão de CO₂ podem significar a liberação de nutrientes de curto a médio prazo para as plantas e, perda de carbono orgânico do solo para a atmosfera em longo prazo.

FIGURA 4 - Emissão de CO₂ do solo durante a pastagem 2017, soja 2017-2018, pastagem 2018, soja 2018-2019, pastagem 2019 e soja 2019-2020



Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre os manejos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Barra de erros indica o desvio padrão.

Essas variações podem estar associadas à quantidade e ao tipo de resíduos das culturas na superfície do solo. Considera-se que no cultivo da soja existe grande quantidade de palhada da cultura anterior, no caso as gramíneas e as respectivas leguminosas. Dessa forma, pode correr maior emissão de CO₂, pois a manutenção de resíduos de culturas na superfície do solo influencia significativamente a dinâmica do CO₂. Estudo realizado por Tavares *et al.* (2015) identificaram maior emissão de CO₂ em área gerenciada sob resíduos de cana-de-açúcar com manutenção da palhada por 10 anos, considerando que esta área foi convertida de um cenário de

queima prévia antes da colheita, comparada a uma área que prosseguiu com a queima de resíduos da cana.

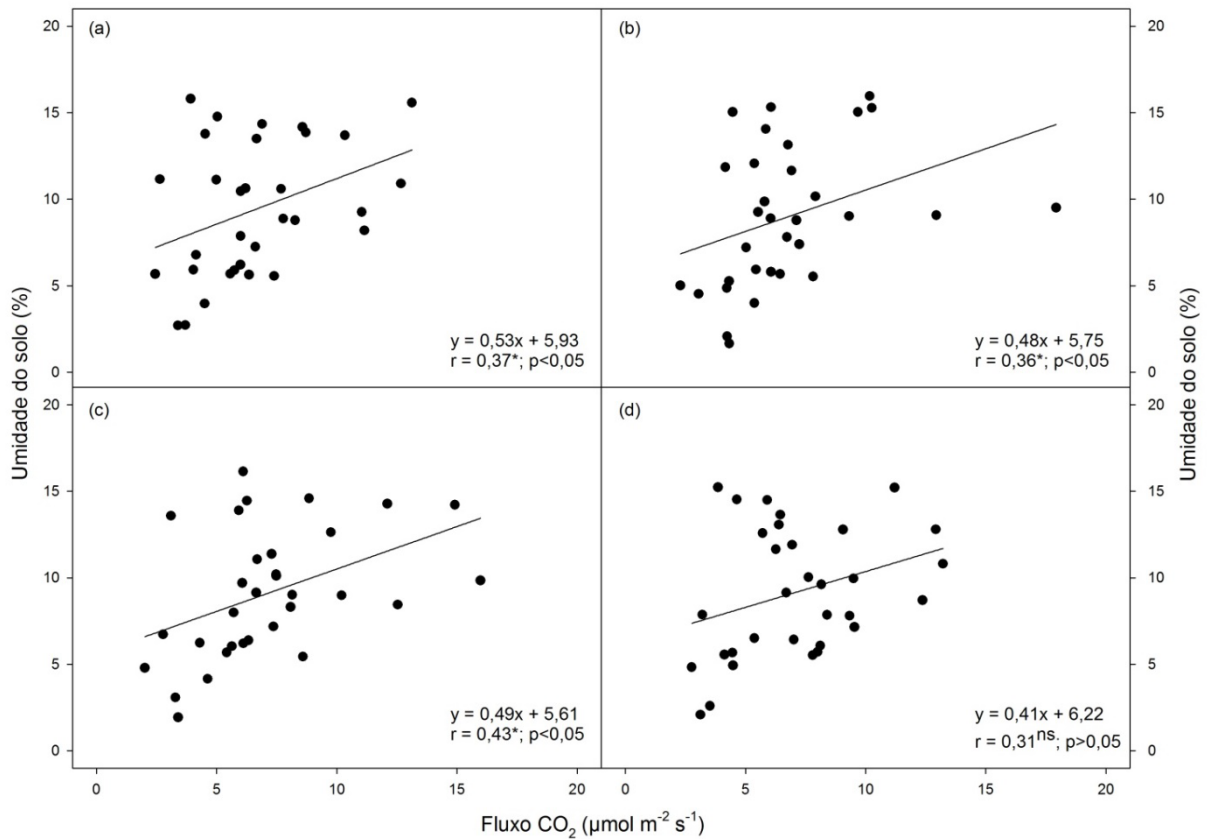
As maiores perdas de CO₂ aconteceram nas avaliações realizadas durante o desenvolvimento da soja (Figura 4), devido à baixa relação C/N da soja, especialmente nas safras 2017-2018 e 2018-2019, proporcionalmente ao menor ECT nesses períodos (Figuras 3b e 3d). Entretanto, a partir das últimas avaliações (pastagem 2019 e soja 2019-2020) nota-se que as emissões de CO₂ foram menores (Figura 4), indicando que o sistema está imobilizando mais C (Figura 3e).

O preparo do solo pode afetar o armazenamento e as emissões de carbono do solo. Moitinho *et al.* (2013) demonstraram que o sistema de manejo sem preparo e com resíduos culturais da cana foi responsável pela menor perda de CO₂ do solo (367,23 kg ha⁻¹ de CO₂), diferindo dos manejos sem preparo e sem resíduos (501,75 kg ha⁻¹ de CO₂) e com preparo e sem resíduos (534,84 kg ha⁻¹ de CO₂). No presente estudo (Figura 4), os valores de emissão não ultrapassaram 350 kg ha⁻¹ de CO₂ em nenhum dos manejos e períodos avaliados, ou seja, por se tratar de um sistema de plantio direto, sem preparo de solo, e com manutenção dos resíduos da cultura anterior, potencializou-se a microbiologia do solo e, portanto a imobilização de C, e assim, considera-se que os valores encontrados corroboram com os valores obtidos por Moitinho *et al.* (2013). Além disso, os veranicos, predominantes na região de estudo, reduzem a atividade microbiana, diminuindo a velocidade da decomposição da palhada, o que confere uma menor emissão.

A maior parte do CO₂ produzido no solo é liberada para a atmosfera, assim, o fluxo de CO₂ (FCO₂) medido reflete a respiração do solo. A umidade e a temperatura do solo são dois fatores ambientais altamente variáveis que influenciam as emissões de CO₂ (GRISCOM *et al.*, 2017). Utilizando análise de correlação linear simples, verifica-se que há relação significativa entre FCO₂ e umidade do solo nos manejos M+N ($r = 0,37$; $p < 0,05$), M-N ($r = 0,36$; $p < 0,05$) e M+G ($r = 0,43$; $p < 0,05$) (Figuras 5a, 5b e 5c), concordando com os resultados obtidos por Wang *et al.* (2020), em que mostraram correlação positiva ($r = 0,66$; $p < 0,05$) entre essas variáveis, indicando que o teor de água no solo afetou a evolução temporal do FCO₂ durante o período chuvoso. A umidade do solo é um fator determinante da intensidade da atividade microbiológica e, portanto, contribui efetivamente para o processo de emissão de CO₂ para a atmosfera (LA SCALA; BOLONHEZI; PEREIRA,

2006). Umedecer o solo seco provoca um pulso de respiração microbiana (SLESSAREV; SCHIMEL, 2020).

FIGURA 5 - Correlação entre fluxo de CO₂ e umidade do solo nos manejos: M+N (a); M-N (b); M+G (c) e M+J (d)



*significativo a 5%; ^{ns} não significativo

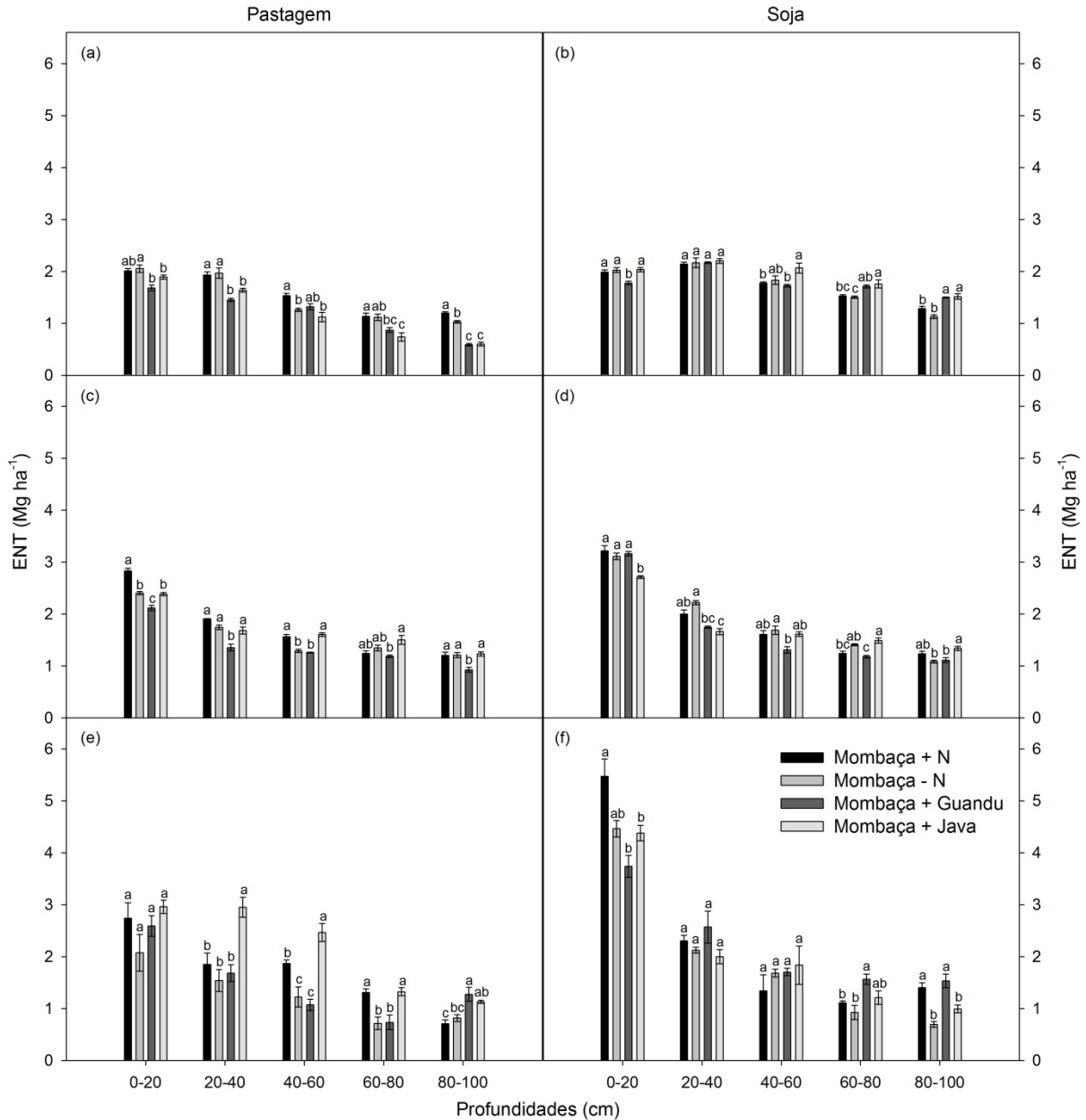
Moitinho *et al.* (2013) também constataram correlação positiva e significativa ($r = 0,55$; $p < 0,05$) entre esses parâmetros, em sistema de plantio direto, bem como em sistema de preparo convencional. Zhang *et al.* (2011) mostraram que o teor de água no solo está intimamente relacionado à emissão de CO₂ antes e após o preparo do solo. Xavier *et al.* (2020) também obtiveram uma relação positiva entre a umidade do solo e o FCO₂, onde os eventos de precipitação foram concentrados no período chuvoso. Nesta ocasião, os macroporos do solo, previamente preenchidos pelo ar, foram preenchidos com água logo após a primeira precipitação. Esse processo pode aumentar a atividade microbiana, resultando na produção de CO₂ (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; BRADY; WEIL, 2002).

Não foi detectada correlação significativa entre FCO₂ e a temperatura do solo em nenhum dos manejos avaliados ($p > 0,05$), corroborando com os resultados de Moitinho *et al.* (2013 e 2015). Contudo, existem estudos que demonstram a correlação positiva entre as duas variáveis, como o de Wang *et al.* (2020) e Buragiene *et al.* (2015). A temperatura do solo afeta a intensidade da atividade metabólica dos microrganismos do solo, influenciando a ciclagem do material do solo e afetando as emissões de CO₂ (WANG *et al.*, 2020). No entanto, em condições tropicais, como as do presente estudo, Moitinho *et al.* (2015) afirmam que normalmente não é encontrada relação espacial entre esses dois parâmetros, principalmente devido à baixa variabilidade espacial na temperatura do solo.

É importante ressaltar que a manutenção do sistema de plantio direto a longo prazo fornece condições para que não ocorra variação do FCO₂, mudando apenas quando a umidade do solo varia (XAVIER *et al.*, 2020). Os resíduos de plantas deixados na superfície do solo favorecem a diminuição da temperatura e amplitude térmica do solo relacionada ao isolamento térmico promovido por eles. Além disso, levam à baixa evaporação da água na superfície do solo, com consequente manutenção da umidade do solo em comparação com o manejo que elimina os resíduos das culturas (USSIRI; LAL, 2009).

Assim como o ECT, os de estoques de nitrogênio total (ENT) também foram maiores nas camadas superiores. Na primeira avaliação, realizada durante o manejo da pastagem em 2017, os manejos M+N e M-N não se diferiram quanto ao ENT no nas primeiras camadas (0-20 e 20-40 cm), entretanto de 40-60 e 80-100 cm, o ENT foi maior no manejo M+N (Figura 6a). Na avaliação realizada na pastagem em 2018 (Figura 6c), os manejos M+N e M+J na profundidade 40-60 cm se destacaram quanto ao aporte de N, e nas camadas 60-80 e 80-100 cm o manejo com java apresentou ENT superior em relação ao guandu, provavelmente devido a decomposição do resíduo da java ser mais acelerada do que do guandu, oferecendo N mais rapidamente. Na pastagem em 2019 (Figura 6e), os manejos não se diferenciaram na profundidade de 0-20 cm, e nas profundidades 20-40 e 40-60 cm, o manejo M+J se destacou significativamente, demonstrando que no decorrer dos anos de permanência desse sistema na área pode ocorrer maior ENT.

FIGURA 6 - Estoque de nitrogênio total (ENT) do solo durante a pastagem 2017 (a), soja 2017-2018 (b), pastagem 2018 (c), soja 2018-2019 (d), pastagem 2019 (e) e soja 2019-2020 (f)



Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre os manejos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Barra de erros indica o desvio padrão.

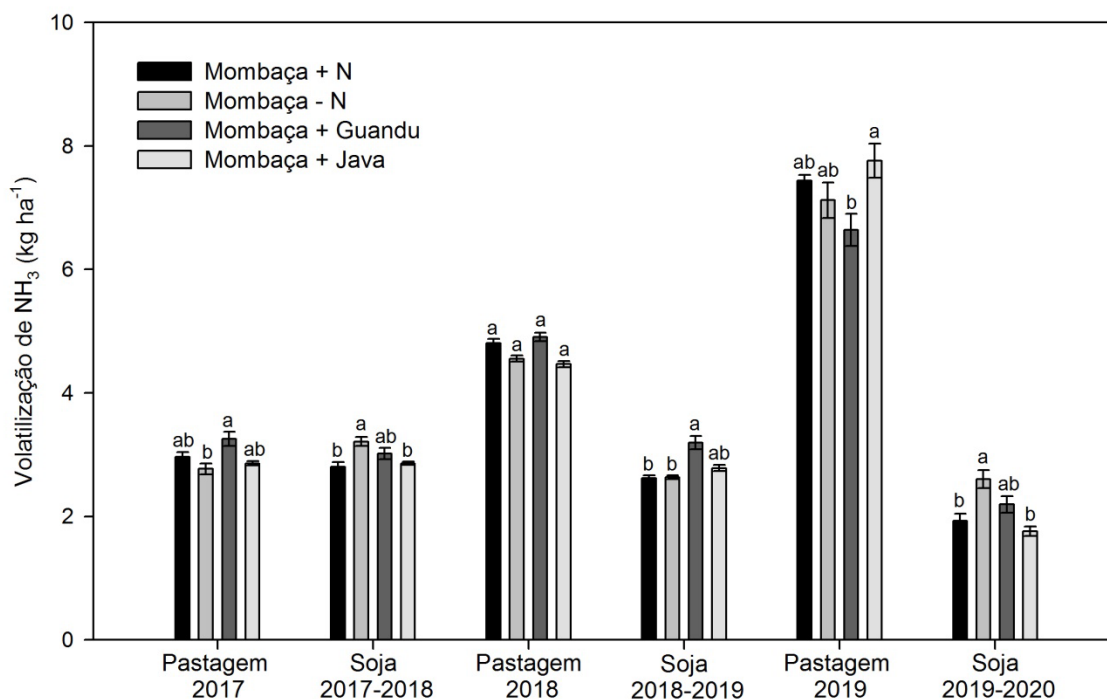
Durante o desenvolvimento da cultura da soja, o ENT (Figura 6b, 6d e 6f) foi superior em aproximadamente 20%, considerando uma média geral de todas as profundidades, comparado com os dados obtidos durante o da pastagem, mostrando que a soja contribuiu para o incremento no aporte de N do solo. Por se tratar de uma leguminosa, deixa no solo um saldo de nitrogênio que contribui para o acúmulo de N

para a cultura em sucessão. A palhada da soja apresenta baixa relação C/N, ou seja, a decomposição do material é mais acelerada e proporciona maior fornecimento de N ao solo. Além disso, os manejos consorciados M+J e M+G proporcionaram maior ENT, como demonstrado na Figura 6b nas profundidades 60-80 e 80-100 cm, e também na Figura 6f, na profundidade 60-80 cm. Deve-se ressaltar que a entrada maior de N no sistema solo-planta é derivada da fixação biológica realizada em leguminosas, pois trata-se de uma fonte gradualmente liberada pela mineralização. Cicek *et al.* (2014) mostraram que o N foi lentamente adicionado via resíduos de leguminosas forrageiras.

É interessante mencionar que em alguns períodos, o manejo M-N apresentou semelhança com os manejos consorciados e com N mineral (Figura 6b e 6d), provavelmente devido a entrada da soja no sistema, demonstrando que a estratégia de intercalar uma leguminosa no sistema de produção proporciona um saldo de N e contribui na construção da fertilidade do solo.

A perda por volatilização de NH_3 do solo é considerada um dos principais responsáveis pela baixa eficiência da fertilização nitrogenada, além disso, durante o ciclo do N existe o processo de amonificação, onde também ocorre liberação de NH_3 (WANG *et al.*, 2020). Constatou-se que durante a pastagem, em 2017, os manejos M+N (adubado com ureia) e os consórcios com as leguminosas M+G e M+J apresentaram as maiores perdas de NH_3 . No cultivo da soja, na safra 2017-2018, o manejo M-N apresentou maior volatilização de NH_3 , provavelmente devido à entrada da soja no sistema de produção, pois após a sua introdução, a volatilização de NH_3 no solo aumenta diante da decomposição da palhada e ativação da microbiologia do solo, sendo importante ressaltar que nos outros manejos (M+N, M+G e M+J) a decomposição da palhada foi mais lenta, devido a maior relação C/N na safra 2017-2018 (Figura 5, Página 61). Na safra subsequente de soja, 2018-2019, o manejo M+G e M+J também apresentaram, de forma similar maior volatilização de NH_3 . Na safra 2019-2020, a volatilização foi superior no M-N e no M+G (Figura 7).

FIGURA 7 - Volatilização de NH_3 do solo durante a pastagem 2017, soja 2017-2018, pastagem 2018, soja 2018-2019, pastagem 2019 e soja 2019-2020



Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre os manejos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Barra de erros indica o desvio padrão.

Vale destacar também que no terceiro ano de manejo da pastagem, em 2019, a volatilização de NH_3 foi maior no manejo M+J (Figura 7), pois, provavelmente, a palhada das culturas gramíneas consorciada com a leguminosa java, proporcionou um maior aporte de resíduos, e com o processo de amonificação, ou seja, decomposição dos resíduos orgânicos pelas bactérias saprófitas e fungos, ocorre a liberação do radical amídico (NH_2) das moléculas nitrogenadas que, durante reação química com H^+ na solução do solo poderá conduzir à formação de NH_3 .

Os resíduos vegetais mantidos no solo podem contribuir para as perdas de N por volatilização, relacionadas à maior concentração e atividade da enzima urease (MOAL *et al.*, 1995). Analisando a atividade da enzima urease (Figura 9b, Página 70), constatou-se maior atividade na coleta realizada ao final da pastagem de 2019, coincidindo com as maiores taxas de perda de NH_3 por volatilização neste período. A maior atividade da urease é indicação de grande população de microrganismos ureolíticos e, conseqüentemente, elevadas taxas de perdas de amônia por volatilização (LANNA *et al.*, 2010). Entretanto, a magnitude das perdas de amônia decorrente da presença de resíduos vegetais é difícil de prever. O manejo adequado

do solo influencia diretamente no aumento da população de microrganismos ureolíticos, pois de acordo com Carneiro *et al.* (2008), a atividade da urease é superior em sistemas conservacionistas do solo, como na área deste estudo, que está sob sistema de semeadura direta.

De acordo com Da Ros *et al.* (2005), a presença de resíduos de aveia na superfície do solo reduziu as perdas de NH_3 por volatilização, pois proporcionou maior umidade no solo, em comparação ao solo descoberto. Já em condições semelhantes de umidade de solo, entre os manejos com e sem resíduos culturais, houve maior volatilização de NH_3 , quando a ureia foi aplicada sobre os resíduos culturais. Entretanto, é importante ressaltar que no presente estudo a ureia apenas foi aplicada na pastagem no manejo M+N, e de acordo com Polacco e Holland (1993), uma vez que a ureia entra na célula vegetal ou é gerada como subproduto em processos metabólicos, como a degradação de aminoácidos, esta pode ser metabolizada rapidamente ou, então, ser acumulada em tecidos-fonte como folhas senescentes, nos quais o nitrogênio é remobilizado para sustentar o crescimento. Em tecidos não senescentes, a ureia praticamente não se acumula (WINKLER *et al.*, 1988), sendo necessária sua assimilação. Para tanto, a ureia é hidrolisada pela ação da enzima urease produzindo CO_2 e NH_3 .

Ressalta-se que as maiores perdas de N foram quantificadas durante as avaliações realizadas no período de manejo da pastagem (Figura 7), que refletiu proporcionalmente a redução do estoque de N nesse período (Figura 6a, 6c e 6e).

3.4 Conclusão

- Os maiores ECT ocorreram nas camadas superficiais (0-20 e 20-40 cm) do solo e posterior ao manejo da cultura das gramíneas, proporcionalmente às menores emissões de CO_2 .

- A maior taxa de emissão de CO_2 está associada às mudanças na umidade do solo, principalmente após as chuvas, apresentando correlação positiva entre a umidade e o fluxo de CO_2 do solo.

- Os maiores ENT ocorreram nas camadas superficiais do solo (0-20 e 20-40 cm) e durante o manejo da cultura da soja, proporcionalmente às menores perdas por volatilização de NH_3 neste período.

- As maiores entradas de C e N ocorreram principalmente nos manejos M+N, M+G e M+J.

- Ao longo dos anos de manejo houve um aumento nos estoques de C e N e redução das suas perdas por emissão de CO₂ e volatilização de NH₃, respectivamente, indicando que a estratégia sucessão pastagem-soja, e manejo de N na pastagem favoreceu na maior eficiência do uso do N diante da diminuição das perdas de gases que causam o efeito estufa.

Referências

ALVARENGA, R. C. *et al.* Características de alguns adubos verdes de interesse para a conservação e recuperação de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 30, p. 175-185, 1995.

BARNEZE, A. S. *et al.* Legumes increase grassland productivity with no effect on nitrous oxide emissions. **Plant and Soil**, p. 1-15, 2019.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. Soil organic matter. *In*: BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. 13. ed. New Jersey: Pearson Education, 2002. p. 498-542.

BURAGIENE, S. *et al.* Experimental analysis of CO₂ emissions from agricultural soils subjected to five different tillage systems in Lithuania. **Science of the Total Environment**, v. 514, p. 1-9, 2015.

CALONEGO, J. C. *et al.* Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy**, v. 85, p. 31-37, 2017.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O. Determinação de nitrogênio total em solos. *In*: RAIJ, B. *et al.* **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2001, p. 262-269.

CARNEIRO, M. A. C. *et al.* Atributos bioquímicos em dois solos de cerrado sob diferentes sistemas de manejo e uso. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 38, n. 4, p. 276-283, 2008.

CARVALHO, J. L. N. *et al.* Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v. 34, n. 2, p. 277-290, 2010.

CARVALHO, J. L. N. *et al.* Crop-pasture rotation: a strategy to reduce soil greenhouse gases emissions in the Brazilian Cerrado. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 183, p. 167-175, 2014.

- CICEK, H. *et al.* Forage potential of six leguminous green manures and effect of grazing on following grain crops. **Renewable Agriculture and Food Systems**, v. 30, p. 503-514, 2014.
- DA ROS, C. O.; AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Volatilização de amônia com aplicação de ureia na superfície do solo, no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 35, n. 4, p. 799-805, 2005.
- DE DEYN, G. B.; CORNELISSEN, J. H. C.; BARDGETT, R. D. Plant functional traits and soil carbon sequestration in contrasting biomes. **Ecology Letters**, v. 11, p. 516-531, 2008.
- DE DEYN, G.B. *et al.* Additional carbon sequestration benefits of grassland diversity restoration. **Journal of Applied Ecology**, v. 48, p. 600-608, 2011.
- DUIKER, S. W.; LAL, R. Carbon budget study using CO₂ flux measurements from a no till system in central Ohio. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, n. 1-2, p. 21-30, 2000.
- ELBERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal Soil Science**, v. 75, p. 529-538, 1995.
- EMBRAPA, **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de solo, 212 p. 1997.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia (UFLA)**, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.
- FRASIER, I. *et al.* High quality residues from cover crops favor changes in microbial community and enhance C and N sequestration. **Global Ecology and Conservation**, v. 6, p. 242-256, 2016.
- GMACH, M. R. *et al.* Processes that influence dissolved organic matter in the soil: a review. **Scientia Agricola**, v. 77, n. 3, 2020.
- GRISCOM, B. W. *et al.* Natural climate solutions. **Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)**, v. 114, p. 11645-11650, 2017.
- HATI, K. M. *et al.* Soil Organic Carbon Dynamics and Carbon Sequestration Under Conservation Tillage in Tropical Vertisols. *In*: SINGH, R. K., N. K.; SINHA, R. S. **Carbon management in tropical and sub-tropical terrestrial systems**. Singapore: Springer, 2020. p. 201-212.
- KUZYAKOV, Y.; DOMANSKI, G. Carbon input by plants into the soil. Review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 163, p. 421-431, 2000.
- LA SCALA, N.; BOLONHEZI, D.; PEREIRA, G. T. Short-term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 91, p. 244-248, 2006.

LANNA, A. C. *et al.* Atividade de urease no solo com feijoeiro influenciada pela cobertura vegetal e sistemas de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 6, p. 1933-1939, 2010.

LAROCA, J. V. S. *et al.* Soil quality and soybean productivity in crop-livestock integrated system in no-tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 11, p. 1248-1258, 2018.

LEMAIRE, G. *et al.* Integrated crop–livestock systems: strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 190, p. 4-8, 2014.

LI, Q. *et al.* Grass-legume ratio can change soil carbon and nitrogen storage in a temperate steppe grassland. **Soil and Tillage Research**, v. 157, p.23–31, 2016.

MAIRE, V. *et al.* Trade-off between root nitrogen acquisition and shoot nitrogen utilization across 13 co-occurring pasture grass species. **Functional Ecology**, v. 23, p. 668–679, 2009.

MARQUES, T. C. L. L. S. M. *et al.* Envolvimento de dióxido de carbono e mineralização do nitrogênio em latossolo vermelho-escuro com diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 3, p. 581-589, 2000.

MATTOS, E. S. *et al.* Carbono total e frações químicas de carbono do solo. *In*: MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. 2. ed. Viçosa, MG: UFV - Gefert, 2017. 221 p.

MOAL, J. F. *et al.* Ammonia volatilization following surface-applied pig and cattle slurry in France. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 25, n. 2, p. 245-252, 1995.

MOITINHO, M. R. *et al.* Efeito do preparo do solo e resíduo da colheita de cana-de-açúcar sobre a emissão de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 6, p. 1720-1728, 2013.

MOITINHO, M. R. *et al.* On the spatial and temporal dependence of CO₂ emission on soil properties in sugarcane (*Saccharum* spp.) production. **Soil and Tillage Research**, v. 148, p. 127-132, 2015.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Editora UFLA, 2006. 729 p.

MORILLAS, L. *et al.* Nitrogen supply modulates the effect of changes in drying–rewetting frequency on soil C and N cycling and greenhouse gas exchange. **Global Change Biology**, v. 21, n. 10, p. 3854-3863, 2015.

NÖMMIK, H. The effect of pellet size on the ammonia loss from urea applied to forest. **Plant and Soil**, v. 39, n. 2, p. 309-318, 1973.

POLACCO, J. C.; HOLLAND, M. A. Roles of urease in plant cells, **International Review of Cytology**, v. 145, p. 65-103, 1993.

RAIJ, B. van *et al.* **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285 p.

RECOUS, S.; AITA, C.; MARY, B. In situ changes in gross N transformations in bare soil after addition of straw. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 31, n. 1, p. 119-133, 1999.

ROSOLEM, C. A.; LI, Y.; GARCIA, R. A. Soil carbon as affected by cover crops under no-till under tropical climate. **Soil Use and Management**, v. 32, n. 4, p. 495-503, 2016.

ROSSET, S. J. *et al.* Estoque de carbono, propriedades químicas e físicas do solo em sistemas de manejo com diferentes tempos de implantação na Região Oeste do Paraná, Brasil. **Semina**, v. 35, p. 3053-3072, 2014.

SALTON, J. C. Integrated crop–livestock system in tropical Brazil: toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 190, p. 70-79, 2014.

SARTO, M. V. M. *et al.* Root and shoot interactions in a tropical integrated crop-livestock-forest system. **Agricultural Systems**, v. 181, p. 102796, 2020b.

SARTO, M. V. M. *et al.* Soil microbial community and activity in a tropical integrated crop-livestock system. **Applied Soil Ecology**, v. 145, p. 103350, 2020a.

SILVA-OLAYA, A. M. *et al.* Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 8, n. 1, p. 1-8, 2013.

SLESSAREV, E. W.; SCHIMEL, J. P. Partitioning sources of CO₂ emission after soil wetting using high-resolution observations and minimal models. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 143, p. 107753, 2020.

SMART, D. R.; PEÑUELAS, J. Short-term CO₂ emissions from planted soil subject to elevated CO₂ and simulated precipitation. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 28, n. 3, p. 247-57, 2005.

TAVARES, R. L. M. *et al.* Emission of CO₂ and soil microbial activity in sugarcane management systems. **African Journal of Agricultural Research**, Lagos, v. 10, n. 9, p. 975–982, 2015.

TÓTOLA, M. R.; CHAER, G. M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade do solo. In: ALVAREZ VENEGAS, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F. de; MELLO, J.W.V. de; COSTA, L.M. da. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. p. 195-276.

USSIRI, A. N., LAL, R. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio. **Soil and Tillage Research**, v. 104, n. 1, p. 39-47, 2009.

WANG, H. *et al.* No tillage increases soil organic carbon storage and decreases carbon dioxide emission in the crop residue-returned farming system. **Journal of Environmental Management**, v. 261, p. 110261, 2020.

WEST, T. O.; POST, W. M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, p. 1930-1946, 2002.

WINKLER, R. G. *et al.* Ureide catabolism in nitrogen-fixing legumes. **Trends in Biochemical Sciences**, v. 13, p. 97-100, 1988.

WU, G. L. *et al.* Legumes functional group promotes soil organic carbon and nitrogen storage by increasing plant diversity. **Land Degradation and Development**, v. 28, p. 1336-1344, 2017.

XAVIER, C. V. *et al.* Crop rotation and sequence effects on temporal variation of CO₂ emissions after long-term no-till application. **Science of The Total Environment**, v. 709, p. 136107, 2020.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, p. 1467-1476, 1988.

ZHANG, Q. *et al.* Limitations of nitrogen and phosphorous on the terrestrial carbon uptake in the 20th century. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 22, 2011.

4 CAPÍTULO III: Parâmetros fisiológicos e produtividade da soja cultivada em sucessão à pastagem manejada com adubação nitrogenada mineral e consorciada com leguminosas

Resumo

Sistemas integrados associados com manejos de adubação, principalmente a nitrogenada, são de grande importância para manutenção da atividade metabólica da planta, refletindo no aumento de produtividade das culturas e conservação do solo. O objetivo do trabalho foi avaliar a resposta fisiológica e produtividade da cultura da soja em sucessão aos manejos consorciados com gramíneas e leguminosas forrageiras e adubação nitrogenada na pastagem. O experimento foi instalado em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico argilúvico, seguindo o delineamento em blocos casualizados, com quatro tratamentos e quatro repetições: capim mombaça (*Panicum maximum* cv. Mombaça), com aplicação de adubação nitrogenada (M+N); capim mombaça, sem aplicação de nitrogênio; capim Mombaça (M-N), em consórcio com a leguminosa forrageira feijão guandu (*Cajanus cajan*) (M+G); e capim mombaça, em consórcio com a leguminosa forrageira java (*Macrotyloma axillare* cv. Java) (M-N). Foram coletadas quarenta folhas da soja do estágio vegetativo (V5) e reprodutivo (R3), sendo adotado como índice o terceiro trifólio, e posteriormente foram realizadas as análises fisiológicas. Ao final de cada ciclo produtivo, foi avaliada a produtividade da cultura da soja. Durante as três safras avaliadas houve aumento do teor de N total, carboidratos, clorofila, aminoácidos e atividade da enzima urease, demonstrando a melhoria na resposta fisiológica da soja, com destaque em M+N e M+J. A FBN da cultura foi capaz de suprir a exigência da soja em nitrogênio. A adubação com N mineral (M+N) realizada na pastagem reduziu a produção de ureídeos na soja, porém incrementou a produtividade de grãos. Introduzir no sistema de produção a integração com a pastagem adubada com N mineral e em consórcio com leguminosas trouxe grandes ganhos na produtividade de grãos da soja e na fisiologia da planta.

Palavras-chave: FBN; ureídeos; enzima urease; clorofila; integração lavoura-pecuária; plantio direto.

Abstract

Integrated systems associated with fertilization management, mainly nitrogen, are of great importance for maintaining the plant's metabolic activity, reflecting in the increase in crop productivity and soil conservation. The objective of the work was to evaluate the physiological response and productivity of the soybean crop in succession to the management intercropped with grasses and forage legumes and nitrogen fertilization in the pasture. The experiment was installed in an dystrophic Red-Yellow Latosol, following a randomized block design, with four treatments and four repetitions: mombaça grass (*Panicum maximum* cv. Mombaça), with application of nitrogen fertilization (M+N); mombaça grass, without nitrogen application; Mombasa grass (M-N), in consortium with pigeon pea (*Cajanus cajan*) (M+G); and mombaça grass, in consortium with the forage legume java (*Macrotyloma axillare* cv. Java) (M-N). Forty soybean leaves from the vegetative (V5) and reproductive (R3) stages were collected, with the third trefoil as an index, and later physiological analyzes were performed. At the end of each production cycle, the productivity of the

soybean crop was evaluated. During the three evaluated harvests there was an increase in the total N content, carbohydrates, chlorophyll, amino acids and activity of the urease enzyme, demonstrating the improvement in the physiological response of soy, with emphasis on M+N and M+J. The FBN of the crop was able to meet the requirement of soy in nitrogen. Fertilization with mineral N (M+N) carried out on pasture reduced the production of ureids in soybeans, but increased grain yield. Introducing in the production system the integration with pasture fertilized with mineral N and in consortium with legumes has brought great gains in the productivity of soybeans and in the physiology of the plant.

Keywords: BNF; ureides; urease enzyme; chlorophyll; crop-livestock integration; no-tillage.

4.1 Introdução

A cultura da soja apresenta crescente expansão territorial e produção agrícola no mundo. Os grãos de soja são uma fonte de óleo e proteína, muito utilizados em alimentos e rações. A produção mundial de soja na safra 2019-2020 foi em torno de 337,3 milhões de toneladas (USDA, 2020). No Brasil, a produtividade média da soja aumentou expressivamente nas últimas décadas, em razão da geração, ajuste e transferência de tecnologias. Na safra 2019-2020, o Brasil ultrapassou os Estados Unidos, e se tornou o maior produtor de soja com uma área de 36,9 milhões de hectares (ha) e um rendimento médio de grãos de 3,4 Mg ha⁻¹, sendo o principal produtor em regiões de clima tropical (CONAB, 2020).

O potencial de rendimento e a qualidade da cultura da soja são influenciados diretamente por fatores externos e internos (solo, clima e outras espécies vegetais e animais) durante o cultivo. A interferência de fatores bióticos e abióticos na assimilação de carbono (C) e de nitrogênio (N) na fase reprodutiva são os principais determinantes da produtividade de grãos. Essa é a fase em que a cultura está com elevada atividade fisiológica, alcançando a máxima taxa de assimilação de C e N (NELSON-SREIBER; SCHWEITZER, 1985). Técnicas de manejo que maximizem as variáveis fisiológicas são interessantes para produtores e pesquisadores da área.

Em regiões quentes e que apresentam solos arenosos, caracterizados por sua baixa fertilidade e baixa capacidade de fornecer nutrientes às plantas, o sistema de manejo de integração lavoura-pecuária (ILP) com plantio direto (PD) tem se mostrado importante para viabilizar o cultivo de espécies anuais, como a soja, principalmente pela palhada fornecida pela pastagem, proporcionando efeito

benéfico (FRANCHINI *et al.*, 2016). Trata-se de um sistema de produção que intercala, na mesma área, o cultivo de espécies para produção de grãos e pastagens, de forma concomitante ou sequencial, de modo a possibilitar o melhor aproveitamento do solo e de outros recursos ambientais, além de proporcionar benefícios econômicos (CARVALHO *et al.*, 2016).

O consórcio entre gramíneas e leguminosas no manejo de pastagem é interessante, pois essa combinação pode viabilizar o cultivo atual e os que se sucedem, podendo aumentar os teores de proteína na forragem e possivelmente o desempenho animal, além da incorporação de N ao solo, por meio da fixação biológica (FBN) realizada por microrganismos presentes nas raízes de leguminosas, reduzindo significativamente a necessidade de fertilizantes minerais em todo o sistema, criando um ambiente mais saudável, aumentando os valores nutritivos das plantas e evitando riscos associados à contaminação do meio ambiente com N reativo e lixiviação de nitrato (RYSCHAWY *et al.*, 2017).

O manejo de adubação nitrogenada na pastagem antes da instalação da soja pode minimizar os efeitos do processo de imobilização do N (SÁ, 1999), além de deixar esse elemento disponível para a cultura sucessora, após a senescência das plantas forrageiras e mineralização da palhada (SOUZA; MELO, 2000), se tornando favorável, apesar da soja se nutrir com N através da fixação simbiótica com bactérias fixadoras de nitrogênio.

A hipótese testada neste estudo foi que a entrada de N via adubação nitrogenada mineral e consorciação da pastagem com leguminosas poderia proporcionar algum efeito na fixação biológica de N na soja, maximizar a atividade fisiológica e aumentar o rendimento de grãos em áreas com solo arenoso. Assim, o objetivo foi avaliar a resposta fisiológica das plantas de soja em áreas de pastagem consorciadas com leguminosas e com manejo de adubação nitrogenada mineral.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Localização da área experimental

O experimento foi instalado na Fazenda Experimental da Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE), latitude 22°16'59" S e longitude 51°40'34" O, no município de Presidente Bernardes - SP, em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico argilúvico com 17% de argila na profundidade de 0-10 cm, conforme análise granulométrica (EMBRAPA, 1997) realizada até um metro de profundidade (Tabela 1), e com características químicas analisadas no início do experimento em 2017, conforme metodologia proposta por Raji *et al.* (2001) (Tabela 2).

TABELA 1 - Análise granulométrica da área experimental, 2017

Profundidade (cm)	Granulometria (g kg ⁻¹)			Classe Textural
	Areia	Silte	Argila	
0-10	773	48	179	Média Arenosa
10-20	763	68	169	Média Arenosa
20-40	736	41	223	Média Arenosa
40-60	707	63	230	Média Arenosa
60-80	695	55	250	Média Arenosa
80-100	697	56	247	Média Arenosa

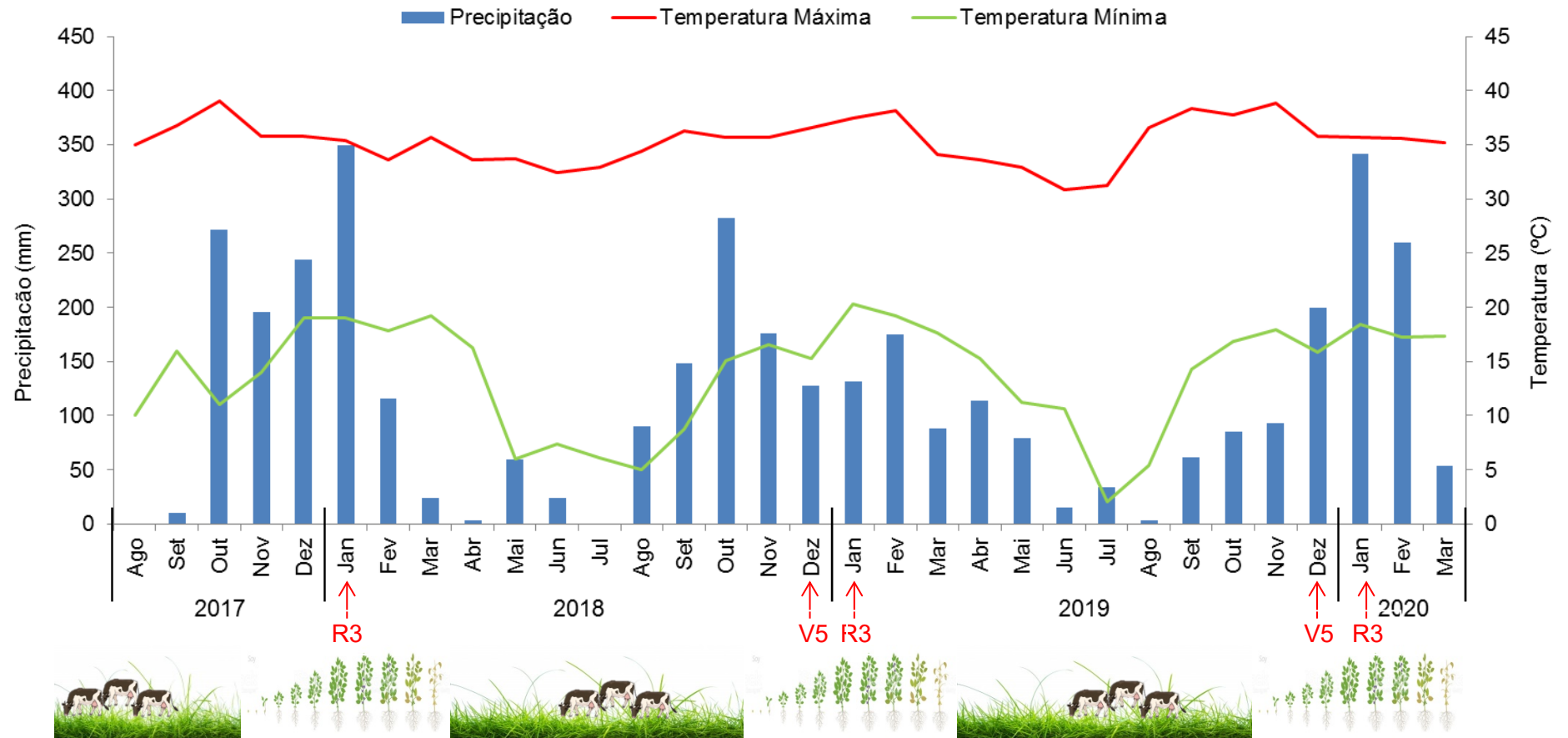
TABELA 2 - Caracterização química do solo da área experimental, 2017

Prof. (cm)	pH (CaCl ₂)	MO ^a (gdm ⁻³)	P _(resina) (mg dm ⁻³)	S (mg dm ⁻³)	H+Al	K	Ca	Mg	SB ^b (mmol _c dm ⁻³)	CTC ^c	V ^d (%)
0-20	5,9	20,7	6,3	5,9	13,5	1,0	22,9	16,5	40,5	54,0	73,8
20-40	5,3	14,1	3,3	6,7	17,4	0,4	13,4	10,2	24,0	41,4	56,5

^a matéria orgânica do solo; ^b soma de bases; ^c capacidade de troca de cátions; ^d saturação por bases

A região apresenta o clima classificado como Cwa, conforme classificação de Köppen, com estação chuvosa de outubro a março, estação seca de abril a setembro, e temperaturas médias de aproximadamente 25°C. As temperaturas e precipitação foram registradas na Fazenda Experimental durante os anos de condução do experimento e estão apresentadas na Figura 1, juntamente com a indicação dos períodos de coleta de amostras dos trifólios da soja. Também foi realizado o cálculo do balanço hídrico a fim de verificar a influência destes dados nos manejos executados (Figura 2).

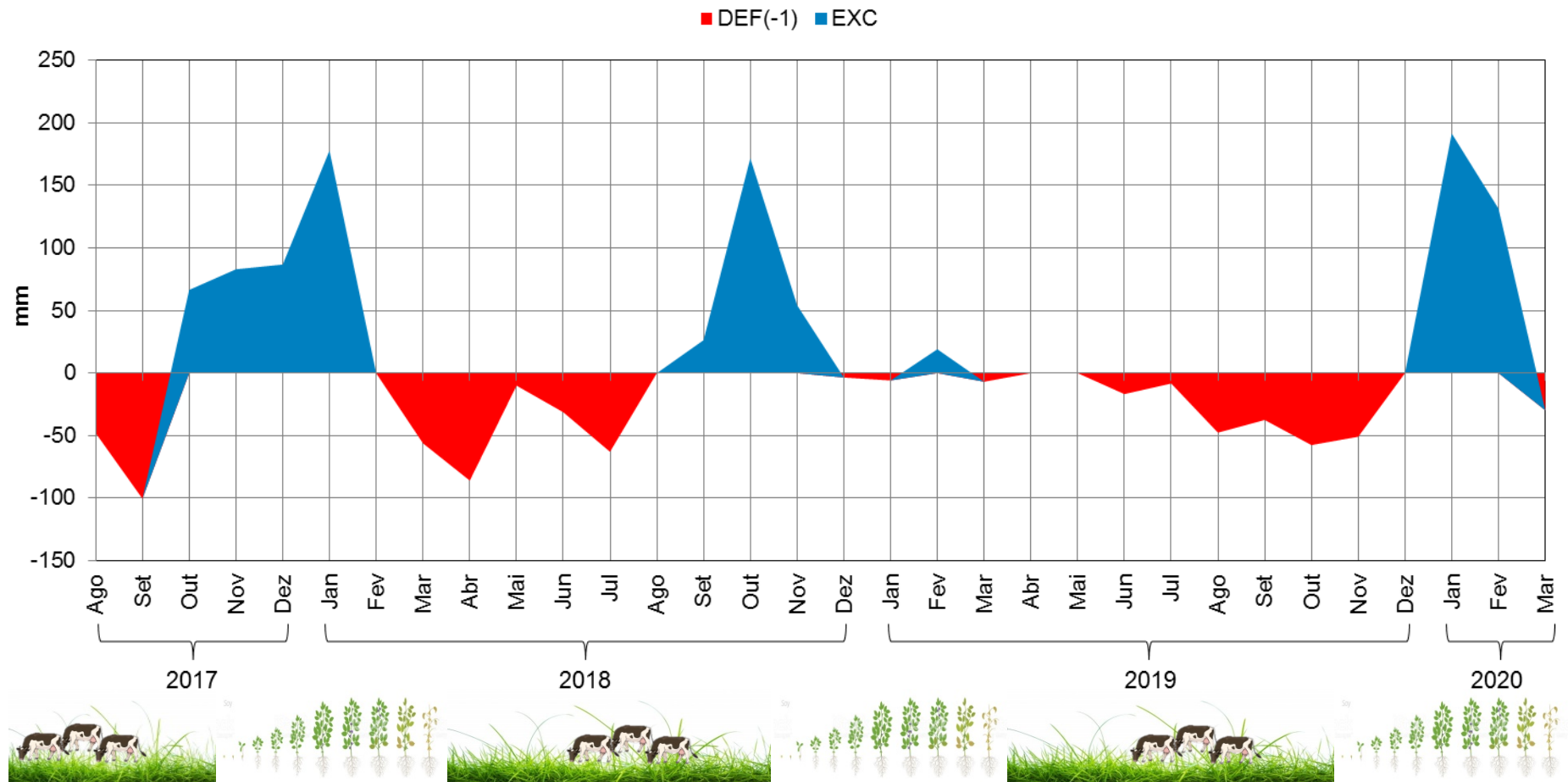
FIGURA 1 - Condições climáticas registradas na Fazenda Experimental e períodos de coleta de trifólios da soja, durante os anos de manejo



Fonte: Dados Meteorológicos Fazenda Experimental.

Nota: Dados trabalhados pelo autor.

FIGURA 2 - Balanço hídrico obtido durante os anos de manejo



Fonte: Dados Meteorológicos Fazenda Experimental.
 Nota: Dados trabalhados pelo autor.

4.2.2 Delineamento experimental e caracterização dos manejos

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com quatro tratamentos descritos da seguinte forma: Capim mombaça (*Panicum maximum* cv. Mombaça) solteiro com adubação nitrogenada (200 kg ha^{-1} de N) (M+N); Capim mombaça solteiro sem adubação nitrogenada (M-N); Capim mombaça consorciado com a leguminosa forrageira denominada de feijão guandu (*Cajanus cajan*) sem adubação nitrogenada (M+G); Capim mombaça consorciado com a leguminosa forrageira Java (*Macrotyloma axillare* cv. Java) sem adubação nitrogenada (M+J), e apresentando quatro repetições de cada tratamento.

O experimento foi instalado em março de 2015 com a semeadura do capim Mombaça (*Panicum maximum* cv. Mombaça) em área total, e a leguminosa forrageira java (*Macrotyloma axillare* cv. Java) e guandu (*Cajanus cajan*) semeados em sulcos com espaçamento de 0,90 m, com 15 e 3 kg ha^{-1} de sementes, respectivamente. Em conjunto com a semeadura das culturas, foram adicionados 100 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 50 kg ha^{-1} de K_2O . No tratamento que recebeu adubação nitrogenada, o N foi aplicado via ureia (450 g kg^{-1} de N), em 2015 e 2016, na dose de 250 kg ha^{-1} de N, dividida em cinco aplicações durante períodos chuvosos.

A pastagem foi cultivada durante os anos de 2015 e 2016, e em agosto de 2017 a área foi novamente cercada para o pastejo, constituindo-se de 16 parcelas, de 69 m de comprimento e 49,25 m de largura. Os animais permaneceram na área até a redução de corte da pastagem a 30 cm do solo. Posterior ao pastejo, em agosto foi realizada a dessecação da área, com 6 L ha^{-1} de Glyphosate. A calagem foi realizada, conforme a Tabela 2, com dose 1 Mg ha^{-1} de calcário dolomítico (PRNT 85%) em 22 de setembro de 2017 e a gessagem com $0,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ em 28 de setembro de 2017.

A soja TMG-7062 IPRO®, a partir de sementes já tratadas, e Profol com Co-Mo com dosagem de 260 mL para 1000 kg de sementes, com stand de 13,8 plantas m^{-2} , foi semeada, no final de outubro dos anos de 2017, 2018 e 2019, um total de três safras avaliadas, com espaçamento entre linhas 0,45 m. Foi utilizado o inoculante Masterfix L Premier® com 8 doses ha^{-1} . A adubação de plantio foi realizada com a formulação NPK 04-30-10, com S 3,54%, Ca 5,02%, Mn 0,084%, Cu 0,26%, B 0,858%, Zn 0,288% e Fe 0,096%.

Em novembro de cada safra, foi realizado o controle de plantas daninhas, e em dezembro a adubação de cobertura, onde foi aplicado a lanço 125 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio (KCl) (600 g kg⁻¹ de K₂O) na primeira safra e 110 kg ha⁻¹ de KCl nas safras posteriores. E em janeiro foi realizada a aplicação de inseticida e a adubação de cobertura de cobalto e molibdênio.

Entre fevereiro e março foi realizada a colheita da soja. Posterior a sua colheita, as gramíneas e as leguminosas foram semeadas na área na segunda quinzena de março. No tratamento que recebeu adubação nitrogenada, o N foi aplicado via ureia, em períodos chuvosos, na dose de 200 kg ha⁻¹ de N, em duas aplicações. Em julho e agosto foi realizado o pastejo, e em outubro foi realizada a dessecação do pasto com 6 L ha⁻¹ de Glyphosate, para semeadura da soja.

4.2.3 Determinação dos parâmetros fisiológicos das amostras de plantas

Foram coletadas de maneira homogênea quarenta folhas durante o estágio vegetativo (V5), e quarenta folhas durante o reprodutivo (R3), referente às três safras da soja (safra 2017-2018; 2018-2019; 2019-2020), sendo adotado como índice o terceiro ou quarto trifólio a partir do meristema apical, onde dez dos trifólios coletados foram congelados no campo com nitrogênio líquido e armazenados em freezer a -80°C para determinação de proteínas, pigmentos, enzima nitrato redutase e urease, e o restante foi mantido em sacos de papel kraft, levados a estufa com circulação forçada de ar a 65°C durante 48 horas, triturados em moinho tipo Willey e posteriormente foram feitas as análises de açúcares solúveis totais (carboidratos), aminoácidos livres totais, ureídeos e N total, conduzidas no Laboratório de Análise Química de Tecidos Vegetais, localizado no Campus II da UNOESTE.

4.2.3.1 Determinação de açúcares solúveis totais nas folhas da soja

A determinação do conteúdo de açúcares solúveis totais (AST), carboidratos, baseia-se na metodologia descrita por Dubois *et al.* (1956). Foram pesados 100 mg de massa vegetal seca (MS) triturada e adicionados 4 mL de etanol 80%, permanecendo em repouso durante 15 minutos, posteriormente foi realizada a

centrifugação a 5000 rpm durante 10 minutos. O sobrenadante foi coletado e o precipitado ressuspendido em 3 mL de etanol 80%, por duas vezes; após junção dos sobrenadantes, o volume foi aferido com água deionizada para 10 mL.

Pipetou-se 500 μL dos extratos das amostras em tubos de ensaio, acrescentou-se em cada tubo 500 μL de fenol a 5%. Após agitação, adicionou-se 2,5 mL de ácido sulfúrico (98N) e os tubos foram agitados novamente e ficaram em repouso até entrarem em equilíbrio com a temperatura ambiente. As leituras foram efetuadas a 490 nm. Para a elaboração da curva analítica, foi utilizado a D-glicose nas concentrações de 20 a 100 mg L^{-1} diluída em água destilada. Os valores foram expressos em mg de AST g^{-1} de MS.

4.2.3.2 Quantificação de proteínas solúveis totais nas folhas da soja

Para quantificação de proteínas solúveis totais (PST) em tecido vegetal foi utilizado o método proposto por Bradford (1976). Foram pesados 500 mg de folha fresca (MF), maceradas com tampão fosfato 0,1 M, pH 6,7, centrifugadas, e uma alíquota de 20 μL do extrato foi adicionado ao corante de “Coomassie brilliant blue” BG-250. Este método baseia-se na interação entre o corante e macromoléculas de proteínas que contém aminoácidos de cadeias laterais básicas ou aromáticas. No pH de reação, a interação entre a proteína de alto peso molecular e o corante provoca o deslocamento do equilíbrio do corante para a forma aniônica, que absorve fortemente em 595 nm. Os valores foram expressos em mg de PST g^{-1} de MF.

4.2.3.3 Determinação de aminoácidos livres totais nas folhas da soja

A determinação de aminoácidos livres totais (AAST) baseia-se no procedimento proposto por Peoples *et al.* (1989). Amostras previamente liofilizadas, de 100 mg de massa seca (MS), foram acondicionadas em tubos de ensaio hermeticamente fechados, contendo 5,0 mL de água destilada, após o que foram incubados em banho-maria, a uma temperatura de 100°C, durante 30 minutos; em seguida, os tubos de ensaio foram centrifugados a 6.000 rpm por 10 minutos, ao término de que o sobrenadante foi coletado e o precipitado ressuspendido em 5 mL

de água destilada e reextraído, como citado anteriormente. Após aferição com água destilada em tubos de ensaio, o volume final dos extratos foi elevado para 10 mL.

A reação para dosagem dos aminoácidos livres totais foi conduzida em tubos de ensaio contendo uma alíquota de 0,1 mL de extrato, 1 mL de uma solução tamponada a pH 5 contendo 0,2 M de citrato; 1 mL do reagente de ninhidrina (KCN 0,1 mM e ninhidrina 5% em methoxy etanol) e 4 mL de água destilada. Após homogeneização, os tubos, hermeticamente fechados, foram acondicionados em banho-maria, a 90°C, pelo tempo de 15 min. A reação foi interrompida por meio de uma abrupta redução da temperatura do meio de reação, mediante contato dos tubos de ensaio com gelo; as leituras foram feitas em espectrofotômetro a 570 nm. Os valores foram expressos em μmol de AAST g^{-1} de MS.

4.2.3.4 Quantificação de ureídeos nas folhas da soja

Para a quantificação de ureídeos foi utilizado o método de Vogels e Van Der Drift (1970), adaptado por Hungria (1994). Na extração foi utilizado 0,3 g do material seco (MS), e adicionado 5 mL de tampão fosfato 0,1 M pH 7,0 e 2,5 mL de etanol PA. As amostras foram aquecidas em banho-maria a 80°C por 5 minutos, agitadas, e filtradas. Em tubos de ensaio foram colocados 100 μL do extrato, 650 μL de água destilada, 250 μL de NaOH 0,5 M e foram levados a banho-maria a 100°C durante 8 minutos. Após o resfriamento, adicionou-se 250 μL de HCl 0,65 N e novamente levou-se a banho-maria, a 100°C durante 4 minutos. Em seguida ao resfriamento dos tubos, adicionou-se 250 μL de tampão fosfato 0,4M, pH 7 e 250 μL de fenilhidrazina 0,33 %. Após 5 minutos em temperatura ambiente, os tubos foram incubados em banho de gelo por 5 minutos e foram acrescentados 1,25 mL de HCL concentrado previamente gelado e 250 μL de ferricianeto de potássio 1,65 %. Após 15 minutos em temperatura ambiente, foi realizada a leitura em espectrofotômetro a 535 nm. Os valores foram expressos em μmol de ureídeos g^{-1} de MS.

4.2.3.5 Atividade da enzima urease nas folhas da soja

A atividade da enzima urease foi determinada pelo método adaptado de Hogan *et al.* (1983). Na extração foi utilizado 0,2 g de massa fresca vegetal (MF) e colocadas em tubos de ensaio contendo 8 mL de tampão fosfato com ureia (pH 7,4), para determinação do teor de NH₃. O tampão foi preparado com fosfato monossódico (NaH₂PO₄ 0,2 mol L⁻¹), fosfato de sódio dibásico (Na₂HPO₄ 0,5 mol L⁻¹), n-propanol (0,66 mol L⁻¹) e ureia (CO[NH₂]₂ 0,21 mol L⁻¹). O n-propanol foi utilizado para aumentar a permeabilidade dos tecidos e evitar a formação de amônio (NH₄⁺) pela presença de microrganismos. As amostras foram incubadas a 30°C por 3 horas e foi efetuada agitação em intervalos frequentes. Após a incubação foi retirada uma alíquota de 0,5 mL do extrato vegetal e a NH₃ retida nos tecidos foliares sendo extraída pela adição de 2,5 mL do reagente I: fenol (C₆H₅OH 0,1 mol L⁻¹) e nitroprussiato de sódio (SNP) (Na₂[Fe(CN)₅NO] 170 μmol L⁻¹). Posteriormente foram adicionados aos tubos mais 2,5 mL do reagente II: hidróxido de sódio (NaOH 0,125 mol L⁻¹), fosfato dissódico (Na₂PO₄.12H₂O 0,15 mol L⁻¹) e hipoclorito de sódio (NaOCl) (3% Cl₂). Os tubos foram tampados, para evitar a perda de NH₃, e mantidos em banho-maria a 37°C por 35 minutos. Em seguida foi realizada a leitura da absorbância em espectrofotômetro a 625 nm. A atividade da enzima foi determinada pela quantidade de NH₄⁺ produzido e, os valores obtidos, sendo comparados com uma curva padrão, previamente estabelecida utilizando-se cloreto de amônio (NH₄Cl). Valores expressos em μmol N-NH₄⁺ g⁻¹ MF h⁻¹.

4.2.3.6 Determinação de pigmentos nas folhas da soja

A determinação de clorofila (CHL), em mg de CHL g⁻¹ de MF, foi realizada de acordo com Arnon (1949), onde a extração ocorreu em acetona 80% utilizando-se 2,0 mg de massa fresca. Foi realizada a leitura em espectrofotômetro a 645 nm e 663 nm. A partir dessas leituras, determinou-se a concentração de clorofilas a, b e totais nas soluções de leitura, por meio das seguintes equações:

$$\text{CHL a} = (0,0127 * A_{663}) - (0,00269 * A_{645})$$

$$\text{CHL b} = (0,0229 - A_{645}) - (0,00468 * A_{663})$$

$$\text{CHL total} = (0,0202 * A_{645}) + (0,00802 * A_{663})$$

4.2.3.7 Determinação do N nos trifólios da soja

A determinação do teor de N nos trifólios da soja foi realizada de acordo com Malavolta, Vitti e Oliveira (1997), no qual 1,0 g de massa seca (MS) foi submetida à digestão sulfúrica e em seguida a destilação com liberação da amônia, que é fixada em solução ácida e titulada. Os valores foram expressos em g de N kg⁻¹ de MS.

4.2.4 Produtividade de grãos da cultura da soja

Para estimar a produtividade de grãos, após a sua maturidade fisiológica, as plantas contidas nas duas linhas centrais de cada unidade experimental foram colhidas manualmente, descartando-se 0,5 m de cada extremidade. Após esta operação, as plantas foram trilhadas, os grãos pesados e calculada a produtividade de grãos, em kg ha⁻¹, corrigindo-se o teor de água destes para 13%.

4.2.5 Análise estatística

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância e os efeitos dos tratamentos foram comparados pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade, utilizando-se software estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011).

4.3 Resultados e Discussão

Os carboidratos são produzidos nas plantas por meio da fotossíntese, através da energia fornecida pela luz solar, onde ocorre a conversão do dióxido de carbono (CO₂) e água em glicídios. A energia armazenada na molécula de glicose durante a fotossíntese é liberada na sua degradação, produzindo água e CO₂. A principal função dos carboidratos nas plantas é o fornecimento de energia, sendo que esse processo se denomina glicólise, que é a degradação da glicose com liberação de adenosina trifosfato (ATP) e formação dos ácidos láctico e pirúvico (NELSON; COX, 2019).

Na safra 2017-2018, a adubação nitrogenada na pastagem por fertilizante mineral (M+N) e pelo consórcio com leguminosas (M+G e M+J) refletiu em maior teor de carboidratos nas folhas de soja durante a fase R3 (Tabela 3). Entretanto, na safra 2018-2019, nas fases V5 e R3, os teores de carboidratos na soja foram superiores no manejo M+G e inferiores no M+J. Em áreas de consórcio com leguminosas, as condições são mais propícias ao desenvolvimento de microrganismos, permitindo maior deposição de matéria orgânica no solo e, além disso, ocorre maior exsudação de compostos orgânicos pelas raízes (ALVES *et al.*, 2011; CHÁVEZ *et al.*, 2011), tais condições refletiram em um aumento na taxa fotossintética e conseqüentemente em maiores teores de carboidratos nas folhas de soja. Na safra 2019-2020, observa-se que não houve diferença estatística entre os manejos para os teores de açúcares solúveis totais (carboidratos) (Tabela 3).

TABELA 3 - Teor de carboidratos na soja, safra 2017-2018, 2018-2019, 2019-2020

Manejos	Carboidratos (mg g ⁻¹)				
	Safra 2017-2018	Safra 2018-2019		Safra 2019-2020	
	R3	V5	R3	V5	R3
Mombaça + N	17,85 a	12,95 ab	17,91 ab	19,63 a	19,96 a
Mombaça - N	16,72 b	13,11 ab	17,66 ab	19,60 a	19,99 a
Mombaça + Guandu	18,45 a	14,02 a	18,25 a	19,59 a	20,01 a
Mombaça + Java	18,21 a	11,29 b	17,39 b	19,67 a	19,76 a
DMS	1,12	2,40	0,83	1,04	0,76
CV (%)	2,84	8,47	2,11	2,41	1,73

Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Interpretando as diferenças obtidas entre os estádios fenológicos da soja, observou-se que houve aumento no teor de carboidratos no estágio R3 da cultura durante a safra 2018-2019 (Tabela 4). Provavelmente, isso ocorreu, pois o estágio reprodutivo é o período em que a flor foi ou está sendo polinizada e se tornando fruto, ou seja, início da formação dos estiletes. Dessa forma, a demanda desses drenos reprodutivos aumenta, acelera-se a taxa fotossintética e, conseqüentemente, aumenta a produção de carboidratos. A taxa fotossintética e a variação respiratória na soja acontecem conforme o seu desenvolvimento, devido à alteração na força dreno, na arquitetura e estrutura foliar do dossel vegetativo estar relacionado com a expansão foliar aumentando a taxa fotossintética dessa cultura gradativamente durante o estágio vegetativo para o reprodutivo, atingindo valores máximos no

período de enchimento de grãos (CASAROLI *et al.*, 2007). Entretanto, é necessário destacar que a produção de carboidratos na safra 2018-2019 foi menor quando comparada à safra 2019-2020, talvez isso seja um reflexo da falta de precipitação na safra 2018-2019 (Figura 1). Quando a planta da soja está submetida a fatores adversos como o déficit hídrico, a fixação de CO₂ no processo de fotossíntese é prejudicada, reduzindo suas taxas de transformação, em virtude do aumento na resistência difusiva e conseqüente queda na assimilação do CO₂, refletindo na diminuição do crescimento e produtividade final da planta (CATUCHI *et al.*, 2012).

Na safra 2019-2020, os valores foram mais elevados em comparação às demais safras e não houve diferença entre os estádios (Tabela 4), demonstrando uma situação mais homogênea e estabilizada devido à melhor distribuição de chuvas, exigência climática da cultura que maximiza sua fotossíntese, durante este período. O acúmulo de matéria seca, sob condições favoráveis, para a cultura da soja, melhora a capacidade de desenvolvimento do aparato fotossintético, com isto, elevam os índices de produção e, conseqüentemente, resulta em um maior armazenamento de carboidratos (BOARD; HARVILLE; SAXTON, 1990).

TABELA 4 - Teor de carboidratos na soja em função dos estádios fenológicos

Estádios fenológicos	Carboidratos (mg g ⁻¹)	
	Safra 2018-2019	Safra 2019-2020
V5	12,84 b	19,62 a
R3	17,80 a	19,93 a
F	303,94**	3,46 ^{ns}
CV (%)	5,25	2,36

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade. ** significativo à 1% pelo Teste F. ^{ns} não significativo.

Os teores de proteínas nas safras 2018-2019 e 2019-2020 foram diferentes na fase V5 (Tabela 5), onde foi obtida a maior produção de proteínas solúveis totais nas folhas de soja cultivada nas áreas manejadas com N mineral (M+N) e consórcio com leguminosas (M+J e M+G) na pastagem.

O nitrogênio (N) é considerado elemento essencial para as plantas, pois está presente na composição das mais importantes biomoléculas, tais como ATP, NADH, NADPH, clorofila, proteínas e inúmeras enzimas (TAIZ *et al.*, 2017). Em muitos sistemas de produção, a disponibilidade de N é quase sempre um fator limitante, influenciando o crescimento da planta mais do que qualquer outro nutriente, com

isso verificou-se que os sistemas manejados com adubação mineral de N e fixação biológica de N favoreceram no aumento do teor de proteínas das folhas de soja.

TABELA 5 - Teor de proteínas solúveis totais na soja, safra 2017-2018, 2018-2019, 2019-2020

Manejos	Proteínas solúveis totais (mg g ⁻¹)				
	Safra 2017-2018		Safra 2018-2019		Safra 2019-2020
	R3	V5	R3	V5	R3
Mombaça + N	7,99 a	6,76 a	6,88 a	6,56 a	7,11 a
Mombaça - N	8,57 a	5,31 b	6,87 a	4,23 b	6,51 a
Mombaça + Guandu	9,01 a	5,38 ab	7,74 a	6,78 a	6,94 a
Mombaça + Java	6,51 a	6,76 a	6,64 a	6,12 a	6,69 a
DMS	4,05	1,38	1,99	1,59	0,83
CV (%)	22,89	10,36	12,79	12,19	5,50

Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Houve aumento no teor de proteínas solúveis totais no estágio reprodutivo (R3) da cultura nas duas safras avaliadas (Tabela 6). Em estudos com a cultura da soja, alguns autores concluem que a variação fotossintética e respiratória da soja ocorre de acordo com seu desenvolvimento, devido à alteração na força dreno, na arquitetura e estrutura foliar (PORRAS; CAYÓN; DELGADO, 1997; PEREIRA, 2002). Na fase reprodutiva, a hidrólise de proteínas e a mobilização de aminoácidos nas folhas são normalmente intensas a fim de fornecer N para a síntese proteica no grão (HILDEBRANDT *et al.*, 2015). Durante o florescimento ocorre acúmulo de matéria seca e de nutrientes nas partes vegetativas (folhas, pecíolos, ramos e raízes), sendo que a massa seca consiste de tudo que se encontra na planta, como carboidratos, proteínas, lipídeos e nutrientes minerais (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005).

TABELA 6 - Teor de proteínas solúveis totais na soja em função dos estádios fenológicos

Estádios fenológicos	Proteínas solúveis totais (mg g ⁻¹)	
	Safra 2018-2019	Safra 2019-2020
V5	6,05 b	5,92 b
R3	7,03 a	6,81 a
F	14,30**	20,61**
CV (%)	11,21	8,71

Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade. ** Significativo à 1% pelo Teste F.

A maioria dos cultivares de soja apresenta um teor médio de 37% de proteína nos grãos e os mesmos são compostos pela ligação de determinados aminoácidos (EMBRAPA, 2019). Além da síntese de proteínas, os aminoácidos têm como principais funções: compostos intermediários de hormônios, efeito complexante em nutrientes, maior resistência ao estresse hídrico e altas temperaturas, tolerância ao ataque de doenças e pragas (CASTRO; CARVALHO, 2014).

Na Tabela 7 têm-se os resultados das análises de aminoácidos livres totais nos trifólios da soja, onde é possível observar que os manejos aplicados na pastagem não influenciaram nas safras 2017-2018 e 2018-2019. Provavelmente, a FBN foi suficiente para garantir o N necessário para as plantas e as condições de clima e solo garantiram o teor de C necessário para a planta durante o ciclo dela. O uso de sistemas consorciados colabora para os estoques de matéria orgânica do solo, melhorando a nutrição das plantas por meio da ciclagem de nutrientes, particularmente pela ligação dos ciclos do N e C, contribuindo com o fluxo e armazenamento de água, elevando a qualidade do solo (RYSCHAWY *et al.*, 2017). Além disso, a ILP ajuda no aumento de C devido ao alto desenvolvimento da planta, tanto na parte aérea como na raiz combinada com o pastoreio de animais, o que atua como um catalisador do sistema, pois modifica as taxas e os fluxos dos processos sistêmicos, decompondo o material orgânico e determinando a dinâmica e a ciclagem dos nutrientes entre os seus compartimentos (FRANZLUEBBERS; STUEDEMANN, 2009).

TABELA 7 - Teor de aminoácidos livres totais na soja, safra 2017-2018, 2018-2019, 2019-2020

Manejos	Aminoácidos livres totais ($\mu\text{mol g}^{-1}$)				
	Safr 2017-2018		Safr 2018-2019		Safr 2019-2020
	R3	V5	R3	V5	R3
Mombaça + N	41,74 a	197,44 a	51,28 a	74,16 a	101,54 ab
Mombaça - N	42,54 a	202,09 a	53,51 a	68,51 a	90,93 b
Mombaça + Guandu	44,97 a	197,76 a	51,38 a	81,94 a	87,90 b
Mombaça + Java	38,87 a	186,64 a	58,30 a	79,82 a	112,77 a
DMS	9,75	22,16	20,00	14,38	19,01
CV (%)	10,51	5,12	16,89	8,56	8,76

Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Entretanto, na última safra avaliada (2019-2020) foi possível constatar uma diferença no teor de aminoácidos livres totais entre os manejos adotados, sendo que o destaque na fase R3 foi para o manejo M+J, que se assemelhou com o M+N (Tabela 7), demonstrando que um maior tempo de implantação desse sistema na área pode contribuir para o aumento dos teores de metabólitos primários na soja, como no caso dos aminoácidos, uma vez que o valor obtido foi superior de que todas as safras anteriores em R3. Além disso, a decomposição do resíduo da java é mais rápida do que do guandu oferecendo N para a soja mais rapidamente.

Considerando os dois estádios fenológicos da soja, V5 e R3, constatou-se que o teor de aminoácidos nas folhas foi maior no V5 na safra 2018-2019, enquanto que na safra 2019-2020 o teor de aminoácidos foi superior no estágio R3 (Tabela 8). Provavelmente, o teor de aminoácidos livres superior na fase V5 na safra 2018-2019 possa estar relacionado ao estresse hídrico sofrido pela planta (Figura 2), propiciando maior acúmulo de aminoácidos nas folhas devido ao ajustamento osmótico. A produção de aminoácidos pode ser alterada por estresse hídrico, devido à redução da disponibilidade de água para os processos associados ao transporte, afetando o metabolismo do nitrogênio (SANTOS *et al.*, 2010). As plantas alteram o metabolismo de diversas maneiras para ajustar-se a esse distúrbio, incluindo a produção de compostos como o aminoácido prolina, que atua como osmorregulador antioxidante e protetor de atividades enzimáticas, restringindo o acúmulo de proteínas (TAIZ *et al.*, 2017).

O acúmulo de aminoácidos livres em plantas sob seca, geralmente está relacionado com o decréscimo na concentração de proteínas (KHOYERD; SHAMSHIRI; ESTAJI, 2016). Entretanto, a concentração de proteínas solúveis na safra 2018-2019 (Tabela 5) em que houve déficit hídrico não apresentou diferença com as outras safras. Essa resposta pode estar relacionada com o acúmulo de diversos grupos de proteínas envolvidas na resposta ao estresse, como por exemplo, chaperonas moleculares, osmotinas e proteínas sinalizadoras (WANG *et al.*, 2016; CAO *et al.*, 2017), e essas proteínas desempenham um papel importante na resposta à seca.

Na safra 2019-2020 não ocorreu deficiência hídrica e o teor de aminoácidos foi maior em R3 (Tabela 8). Os aminoácidos estão ligados à via fotossintética e transporte de produtos, na qual a ordem de prioridade é determinada em função do

estágio de desenvolvimento da cultura. No estágio vegetativo, a planta está mobilizando massivamente para a reserva, enquanto no reprodutivo inicia-se a mobilização para a reprodução, tudo com enfoque na relação fonte-dreno (PORRAS; CAYÓN; DELGADO, 1997), e no acúmulo de matéria seca e nutrientes nas partes vegetativas.

TABELA 8 - Teor de aminoácidos livres totais na soja em função dos estádios fenológicos

Estádios fenológicos	Aminoácidos livres totais ($\mu\text{mol g}^{-1}$)	
	Safra 2018-2019	Safra 2019-2020
V5	195,98 a	76,11 b
R3	53,62 b	98,28 a
F	1463,70**	72,50**
CV (%)	8,43	8,45

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade. ** Significativo à 1% pelo Teste F.

Estudos demonstraram que, em algumas leguminosas, a maior parte do nitrogênio atmosférico (N_2) reduzido nos nódulos é translocada no xilema para a parte aérea na forma de ureídeos, excedendo em quantidade a amida asparagina, considerada até então o principal composto transportador de N nessas plantas (THU *et al.*, 2020). Aproximadamente 90% do N presente na seiva do xilema da soja é transportado na forma de ureídeos em direção à parte aérea da planta para participar do metabolismo nitrogenado (BARAL; SILVA; IZAGUIRRE-MAYORAL, 2016). Os ureídeos podem ser acumulados em altas concentrações nos tecidos de diferentes órgãos das plantas (BARAL; IZAGUIRRE-MAYORAL, 2017).

O teor de ureídeos encontrados nas folhas da soja (Tabela 9) foi menor no manejo que recebeu adubação nitrogenada (M+N) durante o manejo da pastagem, no estágio R3 das primeira e última safras (2017-2018 e 2019-2020). A aplicação de fertilizantes nitrogenados na cultura da soja prejudica a nodulação, pois reduz a disponibilidade de oxigênio para a respiração nodular e restringe os carboidratos ao metabolismo dos nódulos (DENINSON; HARTER, 1995). Vale ressaltar que no presente estudo a adubação com N foi na pastagem, houve extração de N pela gramínea, exportação de N pelo pastejo dos animais e imobilização de N no solo na matéria orgânica. E, ainda assim, houve um residual de N no solo para aproveitamento da soja que prejudicou a FBN.

Em solos com baixo teor de matéria orgânica e N mineral residual, a fixação biológica fornece a maior parte do N adquirido pelas leguminosas. No entanto, muitos solos contêm grandes quantidades de matéria orgânica e N mineral. Nesses solos, o N mineral diminui a formação de nódulos, de modo que a fixação biológica pode fornecer relativamente pouco N para o crescimento e reprodução da soja (YAMASHITA *et al.*, 2019).

TABELA 9 - Teor de ureídeos na soja, safra 2017-2018, 2018-2019, 2019-2020

Manejos	Ureídeos ($\mu\text{mol g}^{-1}$)				
	Safra 2017-2018	Safra 2018-2019		Safra 2019-2020	
	R3	V5	R3	V5	R3
Mombaça + N	8,47 b	27,48 a	60,10 ab	6,86 a	11,02 b
Mombaça - N	12,31 ab	21,46 a	33,50 b	5,87 a	30,82 a
Mombaça + Guandu	10,01 ab	36,19 a	34,95 b	7,86 a	32,47 a
Mombaça + Java	12,90 a	24,61 a	81,45 a	6,39 a	22,68 ab
DMS	4,19	15,62	32,05	4,54	16,46
CV (%)	17,36	25,77	27,65	30,48	30,75

Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Considerando os estádios fenológicos da cultura, constatou-se o maior teor de ureídeos no estágio R3 (Tabela 10), ou seja, no estágio de pleno florescimento e início de formação de vagens. A partir da expansão do 3º ou 4º trifólio (V4 a V5) a nodulação aumenta em intensidade, acompanhando o incremento de matéria seca da parte aérea e de raízes, refletindo no aumento do crescimento do número e da massa seca de nódulos. Esse incremento na nodulação atinge um primeiro pico no pleno florescimento das plantas (estádios R1 e R2), em resposta ao primeiro pico de atividade fotossintética, observado por ocasião do início do florescimento (DORNHOFF; SHIBLES, 1970; KOLLER; NYQUIST; CHORUSH, 1986). Durante o florescimento a taxa de fixação de N_2 pelos nódulos aumenta rapidamente (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005). A partir dos dados obtidos, é possível constatar ainda que na safra 2018-2019 o teor de ureídeos foi maior, isso porque o metabolismo de N nas folhas, ou seja, a incorporação de N em esqueletos carbônicos foi prejudicada pela seca. Nascimento Júnior *et al.* (2016) constataram que a restrição hídrica aumentou os ureídeos na seiva e reduziu o N foliar em R2, enquanto que para Cerezini *et al.* (2014), a restrição hídrica aumentou em 85% os teores de ureídeos nas folhas em genótipos de soja suscetíveis à seca. O aumento

no teor de ureídeos pode ser atribuído a um comprometimento da assimilação e transporte de compostos causados pela seca, o que pode levar a uma inibição por retroalimentação do processo de FBN (KING; PURCELL, 2005), ou seja, um feedback desse composto nitrogenado nos nódulos, por sua não degradação nas folhas.

TABELA 10 - Teor de ureídeos na soja em função dos estádios fenológicos

Estádios fenológicos	Ureídeos ($\mu\text{mol g}^{-1}$)	
	Safra 2018-2019	Safra 2019-2020
V5	27,44 b	6,75 b
R3	52,50 a	24,25 a
F	42,71**	75,16**
CV (%)	27,14	36,84

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade. ** Significativo à 1% pelo Teste F.

As ureases desempenham diversas funções biológicas nas plantas (CARLINI; LIGABUE-BRAUN, 2016). A amônia, produto da atividade da urease, é incorporada em compostos orgânicos, principalmente, pela atividade da glutamina sintetase. Portanto, a urease está envolvida na remobilização e assimilação do N necessário para o desenvolvimento das plantas (CAO *et al.* 2010). Além disso, a urease exerce um papel importante no metabolismo da ureia derivada do catabolismo de ureídeos, que são os principais compostos que transportam o N fixado a partir de nódulos em plantas de soja (McCLURE; ISRAEL, 1979). A folha, portanto, é o principal órgão em que a ureia é metabolizada. Desta forma, a enzima urease, em plantas de soja que apresentam elevados teores de ureídeos derivados da FBN, tem a função na assimilação do N.

A atividade da enzima urease nas folhas da soja, safra 2017-2018, foi maior na área de pastagem consorciada com feijão guandu (M+G), diferindo apenas do manejo M-N. Na safra 2018-2019 não houve diferença na atividade desta enzima na soja entre os manejos em nenhum dos estádios fenológicos. Já na safra 2019-2020, no estágio V5, o manejo de adubação com N mineral na pastagem (M+N) proporcionou aumento na atividade da urease na soja em relação aos demais (Tabela 11). Estudos mostraram que em plantas de soja com sementes enriquecidas com níquel (Ni) exibem elevada atividade de urease variando de 43 a 660 $\mu\text{mol N-NH}_4^+ \text{ g MF}^{-1} \text{ h}^{-1}$, respectivamente para as doses baixa e alta (KUTMAN; KUTMAN;

CAKMAK, 2013). Estes valores nos mostram que apesar de não ter tido aplicação de Ni no presente estudo, a introdução do manejo sucessão pastagem-soja no sistema de produção proporcionou aumento na atividade da urease, obtendo valores semelhantes aos mencionados por Kutman, Kutman e Cakmak (2013).

TABELA 11 - Atividade da enzima urease na soja, safra 2017-2018, 2018-2019, 2019-2020

Manejos	Urease ($\mu\text{mol N-NH}_4^+ \text{ g MF}^{-1} \text{ h}^{-1}$)				
	Safr 2017-2018		Safr 2018-2019		Safr 2019-2020
	R3	V5	R3	V5	R3
Mombaça + N	92,16 ab	105,02 a	172,75 a	261,27 a	421,38 a
Mombaça - N	61,30 b	106,17 a	185,90 a	125,81 bc	408,30 a
Mombaça + Guandu	128,74 a	111,60 a	145,60 a	172,18 b	439,96 a
Mombaça + Java	99,31 ab	116,17 a	146,46 a	102,74 c	364,51 a
DMS	66,19	40,29	102,47	61,83	99,65
CV (%)	31,42	16,63	28,52	16,92	11,05

Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A atividade da enzima urease aumentou nas folhas coletadas no estágio R3 da cultura nas duas safras avaliadas (Tabela 12). Nas plantas, o N pode ser remobilizado de folhas senescentes para folhas em expansão no estágio vegetativo, bem como para o desenvolvimento de sementes no estágio reprodutivo (MASCLAUX-DAUBRESSE *et al.*, 2010). O aumento da atividade da urease favorece o metabolismo do N e aumenta a remobilização do N nas folhas velhas para folhas novas (KUTMAN *et al.*, 2013), enquanto que a inibição da atividade da urease promove o acúmulo de ureia nas folhas, ocasionando o aparecimento de manchas necróticas, bem como impedindo o desenvolvimento da cultura e em casos mais severos provocando até a morte das plantas (DECHEN; NACHTIGAL, 2007). A remobilização de N e outros nutrientes minerais é crucial para a formação de grãos de soja (BENDER; HAEGELE; BELOW, 2015; ISLAM *et al.*, 2016).

Observou-se que na safra 2019-2020 (Tabela 12), a atividade da enzima urease aumentou em relação à anterior, os anos de manejo contribuiu para isso, além das condições edafoclimáticas, que foram melhores nesta safra.

TABELA 12 - Atividade da enzima urease na soja em função dos estádios fenológicos

Estádios fenológicos	Urease ($\mu\text{mol N-NH}_4^+ \text{ g MF}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	
	Safra 2018-2019	Safra 2019-2020
V5	109,74 b	165,50 b
R3	162,68 a	408,54 a
F	19,98**	249,45**
CV (%)	24,60	15,16

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade. ** Significativo à 1% pelo Teste F.

A clorofila, pigmento típico de organismos fotossintetizantes, fica estruturada dentro dos cloroplastos e tem sua manutenção dependente da presença de luminosidade. Os cloroplastos sob as condições de escuro podem ser revertidos em estiloplastos podendo também ser convertidos em cromoplastos.

A clorofila B atua como pigmento acessório na fotossíntese, absorvendo luz de comprimento de onda entre 425-475 nm e transferindo sua energia para a clorofila A, que por sua vez tem a função de ser o pigmento utilizado na primeira etapa da fotossíntese, desempenhando um papel de suma importância para a produção de oxigênio e conversão de energia pela fotossíntese (TAIZ *et al.*, 2017).

Os teores de clorofila total (clorofila a + b) nos trifólios da soja que se desenvolveram em áreas de pastagem (Tabela 13), na safra 2017-2018, foram superiores no manejo M+G, diferindo do manejo M+J e M-N. Na safra 2018-2019, os valores, em geral, foram menores em comparação às outras safras, isso porque o déficit hídrico (Figura 2) pode ter desfavorecido a produção de clorofilas, devido ao maior direcionamento para produção de outros compostos nitrogenados. É interessante destacar que no manejo em que não houve adubação na pastagem (M-N), os valores de clorofila total nos trifólios da soja foram superiores ou se assemelharam em alguns anos aos demais manejos, demonstrando que na soja ocorre a FBN sendo possível manter os seus níveis de clorofila. Na safra 2019-2020 (Tabela 13) é interessante destacar que a situação ficou mais homogênea e com valores superiores à segunda safra, provavelmente devido ao clima estabilizado, com boa distribuição de chuvas neste período.

TABELA 13 - Teor de clorofila total na soja, safra 2017-2018, 2018-2019, 2019-2020

Manejos	Clorofila total (mg g ⁻¹)				
	Safra 2017-2018	Safra 2018-2019		Safra 2019-2020	
	R3	V5	R3	V5	R3
Mombaça + N	2,58 ab	2,14 b	1,65 b	2,79 ab	2,83 a
Mombaça - N	2,47 b	2,32 ab	2,14 a	2,21 b	3,04 a
Mombaça + Guandu	2,78 a	2,17 b	1,88 ab	2,24 b	3,05 a
Mombaça + Java	2,49 b	2,52 a	2,12 a	2,91 a	2,95 a
DMS	0,24	0,35	0,30	0,63	0,37
CV (%)	4,18	6,87	6,88	11,25	5,69

Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Ao considerar os valores de clorofila total em função dos estádios fenológicos observou-se que foram superiores no V5, na safra 2018-2019 (Tabela 14). O déficit hídrico (Figura 2) sofrido pela soja na safra 2018-2019 pode ter reduzido os teores de clorofila total na fase R3. Plantas expostas ao estresse hídrico reduzem seu status hídrico, potencial hídrico foliar, conteúdo relativo de água e condutância estomática, sendo que a diminuição da condutância estomática reduz as trocas gasosas, o que contribui para a diminuição da absorção de CO₂ e favorece o aumento da temperatura foliar das plantas. Sob baixa disponibilidade de água no solo, as plantas fecharam seus estômatos para evitar a perda de água por transpiração, manter o turgor celular e regular a absorção de CO₂ (JAVADI *et al.*, 2017; ZANDALINAS *et al.*, 2018; SCHNEIDER *et al.*, 2020).

Além do déficit hídrico, as temperaturas estavam elevadas durante este período, acima de 35°C, entre janeiro e fevereiro de 2019 (Figura 1), e de acordo com Lopes e Lima (2015), altas temperaturas reduzem a atividade fotossintética, pela inativação térmica de enzimas, dissecação de tecido e fechamento dos poros dos estômatos das folhas. O aumento de temperatura nas folhas pode contribuir para a degradação dos pigmentos fotossintéticos, ou mesmo alteração na biossíntese desses pigmentos por terem sido reduzidos (SCHNEIDER *et al.*, 2020).

TABELA 14 - Teor de clorofila total na soja em função dos estádios fenológicos

Estádios fenológicos	Clorofila total (mg g ⁻¹)	
	Safra 2018-2019	Safra 2019-2020
V5	2,29 a	2,54 b
R3	1,95 b	2,97 a
F	50,87**	28,25**
CV (%)	6,41	8,31

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade. ** Significativo à 1% pelo Teste F.

Na safra 2019-2020, os teores de clorofila foram superiores na fase R3. Considera-se que no início da fase vegetativa (entre V1 e V3), os trifólios jovens são expostos a radiação solar incidente no dossel, porém, eles possuem baixa atividade fotossintética em relação aos trifólios totalmente desenvolvidos (JIANG *et al.*, 2004). A relação entre crescimento da cultura e fotossíntese foi abordada por Wells (1991), observando que a relação entre interceptação e fotossíntese aparente foi positiva e linear nos primeiros 70 dias após a semeadura, referente ao estágio reprodutivo R1. Esses valores são resultantes do viçoso desenvolvimento inicial das folhas do dossel e por grande parte dessas folhas estarem ligadas com a atividade fotossintética.

Em geral, não houve diferença estatística entre os manejos para o teor de N total obtido no terceiro trifólio da soja no estágio R3 (Tabela 15), exceto na última safra em que se observou um maior teor de N nos trifólios da soja no estágio vegetativo (V5) no manejo M+N. É interessante destacar que a soja de desenvolveu bem em todas as áreas de manejo e apresentou teores de N considerados adequados (45 a 55 g kg⁻¹) (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997), em parte graças à FBN nas áreas M-N, M+J, M+G e em parte devido a adubação mineral na M+N.

TABELA 15 - Teor de N total nos trifólios da soja, safra 2017-2018, 2018-2019, 2019-2020

Manejos	N total (g kg ⁻¹)				
	Safra 2017-2018	Safra 2018-2019		Safra 2019-2020	
	R3	V5	R3	V5	R3
Mombaça + N	40,54 a	56,73 a	47,19 a	58,20 a	47,87 a
Mombaça - N	43,45 a	53,43 a	47,86 a	54,87 b	47,01 a
Mombaça + Guandu	38,60 a	54,39 a	50,74 a	54,96 b	47,61 a
Mombaça + Java	43,78 a	52,38 a	49,27 a	54,63 b	48,04 a
DMS	7,40	6,54	4,42	2,92	5,86
CV (%)	8,06	5,46	4,10	2,37	5,57

Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Considerando os estádios fenológicos, verificou-se o maior teor de N nos trifólios da soja na fase V5 (Tabela 16). Na fase vegetativa, os ápices caulinares e raízes, apresentam-se como dreno e quando na fase reprodutiva, isso é atribuído às sementes e frutos (TAIZ *et al.*, 2017).

TABELA 16 - Teor de N total nos trifólios da soja em função dos estádios fenológicos

Estádios fenológicos	N total (g kg ⁻¹)	
	Safra 2018-2019	Safra 2019-2020
V5	54,23 a	55,66 a
R3	48,77 b	47,63 b
F	36,83**	109,64**
CV (%)	4,94	4,20

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade. ** Significativo à 1% pelo Teste F.

Por fim, na Tabela 17, é possível observar a produtividade obtida nas três safras avaliadas. Os manejos realizados na pastagem, antecedendo ao cultivo da soja, não propiciaram diferenças na produtividade de grãos da soja nas duas primeiras safras, destacando que o rendimento de grãos na safra 2018-2019 foi muito baixo. Isso se deve ao déficit hídrico intenso sofrido pela cultura durante o ciclo (Figura 1). A água constitui aproximadamente 90% do peso da planta, atuando em, praticamente, todos os processos fisiológicos e bioquímicos, desempenhando a função de solvente, através do qual, gases, mineiras e outros solutos entram nas células e movem-se através da planta. Apresenta, ainda, papel essencial na regulação térmica da planta, atuando no resfriamento bem como na manutenção e distribuição do calor (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007).

TABELA 17 - Produtividade de grãos da soja, safras 2017-2018, 2018-2019 e 2019-2020

Manejos	Produtividade (kg ha ⁻¹)		
	Safra 2017-2018	Safra 2018-2019	Safra 2019-2020
Mombaça + N	4472,18 a	137,15 a	4374,96 a
Mombaça - N	4004,59 a	209,34 a	3791,63 ab
Mombaça + Guandu	3687,46 a	219,75 a	3243,02 b
Mombaça + Java	4078,66 a	258,77 a	3821,72 ab
DMS	1265,99	211,23	798,08
CV (%)	14,12	46,38	9,49

Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A disponibilidade de água é importante, especialmente em dois períodos do desenvolvimento da cultura: germinação-emergência e floração-enchimento. A necessidade de água na cultura da soja aumenta conforme o desenvolvimento da planta, atingindo o máximo durante a floração-enchimento de grãos (7 a 8 mm/dia) (FARIAS *et al.*, 2007). Com essa informação, é notório observar que a soja sofreu déficit hídrico, pois a Figura 1 demonstra que apesar do volume total de água durante todo o ciclo ter valores próximos a 600 mm, os rendimentos alcançados não foram altos em função da má distribuição da precipitação, especialmente na fase reprodutiva. A ocorrência de veranicos tem impacto considerável na agricultura, pois são períodos com pouca ou nenhuma chuva durante a estação das águas (SILVA; RAO, 2002), podendo ser um período de, pelo menos, três dias consecutivos sem chuva (MINUZZI *et al.*, 2005). Usman e Reason (2004) determinaram que 5 dias de precipitação média diária inferior a 1 mm como sendo a condição suficiente para impactar a agricultura.

A cultura da soja, para apresentar um bom desempenho, necessita, além de um volume de água adequado, uma boa distribuição das chuvas ao longo do ciclo, satisfazendo suas necessidades, principalmente durante as fases mais críticas (FARIAS *et al.*, 2007). Cabe ressaltar que a ausência de chuvas, isoladamente, não significa, obrigatoriamente, ocorrência de déficit hídrico, uma vez que a planta busca um ajuste entre a absorção de água e a transpiração, e o limite a este ajuste representa o início do déficit hídrico. Toda a dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera ocorre em função da demanda evaporativa da atmosfera, que, em última análise, determina a magnitude da perda de água por transpiração e, conseqüentemente, a necessidade de absorção pelas raízes (BERGAMASCHI *et al.*, 1999). Diante do balanço hídrico no sistema de produção durante o ciclo (Figura 2), observou-se que na fase crítica de enchimento de grãos (janeiro a março de 2019) ocorreu deficiência hídrica intensa. A cultura foi submetida a 22 dias de estiagem severa, sendo este um fator determinante para a obtenção da baixa produtividade.

É possível destacar que a produtividade da soja na área que recebeu N mineral na pastagem (M+N), teve um incremento de 468 e 583 kg ha⁻¹ comparada ao M-N, nas safras 2017-2018 e 2019-2020, respectivamente (Tabela 17). A soja semeada na área que recebeu adubação mineral na pastagem (M+N), apesar de ter

reduzido a produção de ureídeos (Tabela 9), respondeu positivamente em relação à produtividade de grãos, ou seja, o residual de N mineral no solo foi suficiente para manter a planta bem nutrida (sem deficiência) e produzindo relativamente bem.

Existem estudos que mostram que a adubação da soja com N mineral pode trazer aumento na produção de grãos de soja, entretanto sem viabilidade econômica RAY; HEATHERLY; FRITSCHI, 2006; PARENTE *et al.*, 2015). De acordo com Hungria *et al.* (2006), a demanda da soja por N pode ser suprida pela mineralização da matéria orgânica do solo e pela fixação biológica do N, desde que a inoculação e a suplementação com molibdênio e cobalto sejam realizadas de acordo com as recomendações técnicas. E a partir dos resultados obtidos no presente estudo, é possível verificar que a adubação de N mineral na pastagem trouxe ganhos na produtividade de grãos da soja, sendo assim o cultivo da soja em um sistema de integração com a pecuária trará benefícios diante do N no sistema.

Alguns estudos também mostraram que a adição de N via leguminosa pode influenciar positivamente o cultivo da soja. Tanaka *et al.* (1992) observaram aumentos no rendimento de soja, principalmente após o cultivo de leguminosas como crotalária e mucuna-preta no sistema de produção. Laroca *et al.* (2018) constataram que o consórcio com feijão-caupi e guandu na pastagem promoveu aumento na produtividade da soja de 416 e 338 kg ha⁻¹, respectivamente. Já no presente estudo, a área onde foi cultivada a leguminosa java proporcionou condições para o aumento de 391 e 578 kg ha⁻¹ na produtividade da soja na safra 2017-2018 e 2019-2020, respectivamente, comparado à área de cultivo de guandu, e 74 e 30 kg ha⁻¹, respectivamente, comparado à área que não recebeu adubação (M-N) (Tabela 17), demonstrando que o manejo com leguminosas como a java (M+J) foi muito interessante diante dos ganhos em produtividade.

Considerando apenas o conteúdo dos metabólitos avaliados no terceiro trifólio da folha da soja no estágio R3 e da produtividade da soja por safra avaliada (Tabela 18), observou-se que os teores obtidos de N total nas duas últimas safras foram superiores à primeira, coincidindo também com os maiores teores totais de carboidratos, aminoácidos, clorofila e atividade da enzima urease na última safra, demonstrando que um maior tempo de manejo de adubação nitrogenada, FBN e adição de MO ao solo colaboram com o sistema e maximizam as variáveis fisiológicas na soja.

Entretanto, alguns parâmetros avaliados foram afetados pela deficiência hídrica que ocorreu na segunda safra (2018-2019), como, no teor de ureídeos das folhas da soja que foi superior 79% em relação à primeira safra (2017-2018) e 54% em relação à terceira safra (2019-2020), bem como no baixo rendimento de grãos (Tabela 18). Entretanto, mesmo com o baixo rendimento, o teor de N foi elevado e semelhante estatisticamente à última safra. A seca prejudicou o metabolismo e a distribuição/redistribuição de componentes para os grãos.

TABELA 18 - Teor de N total, carboidratos, clorofila, aminoácidos, ureídeos, proteínas, atividade da enzima urease nos trifólios e produtividade de grãos da soja em função das safras avaliadas

Safras	N total (g kg ⁻¹)	Carboidratos (mg g ⁻¹)	Clorofila (mg g ⁻¹)	Aminoácidos (μmol g ⁻¹)	Ureídeos (μmol g ⁻¹)	Proteínas (mg g ⁻¹)	Urease (μmol g ⁻¹ h ⁻¹)	Produtividade (kg ha ⁻¹)
2017-2018	41,59 b	17,81 b	2,58 b	42,03 c	10,95 c	8,02 a	95,38 c	4060,72 a
2018-2019	48,77 a	17,80 b	1,95 c	53,62 b	52,50 a	7,03 ab	162,68 b	205,83 b
2019-2020	47,63 a	19,62 a	2,97 a	98,28 a	24,25 b	6,81 b	408,54 a	3807,83 a
F	29,11**	71,04**	198,38**	167,33**	89,40**	5,10*	238,56**	409,31**
CV (%)	6,21	2,71	5,86	14,21	30,73	15,62	19,21	15,84

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade. ** Significativo à 1% pelo Teste F. * Significativo à 5% pelo Teste F.

4.4 Conclusão

- No decorrer das três safras avaliadas houve aumento do teor de N total, carboidratos, clorofila, aminoácidos livres totais e atividade da enzima urease demonstrando a melhoria na resposta fisiológica da soja, especialmente nos sistemas de manejo M+N e M+J.

- A FBN da cultura foi capaz de suprir a exigência da soja em nitrogênio.

- A adubação nitrogenada mineral (M+N) realizada na pastagem reduziu a produção de ureídeos na soja, porém não afetou a produtividade de grãos.

- Introduzir no sistema de produção a integração com a pastagem adubada (M+N) e em consórcio com leguminosas principalmente a java (M+J) trouxe ganhos na produtividade de grãos da soja e na fisiologia da planta.

Referências

- ALVES, T. S. *et al.* Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejos. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 341-347, 2011.
- ARNON, D. I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. **Plant physiology**, v. 24, n. 1, p. 1, 1949.
- BARAL, B.; IZAGUIRRE-MAYORAL, M. L. **Purine-derived ureides under drought and salinity**. In: SPARKS, D. (ed). **Advances in agronomy**. Finland: Academic Press, 2017. p. 167-204.
- BARAL, B.; SILVA, J. A. T.; IZAGUIRRE-MAYORAL, M. L. Early signaling, synthesis, transport and metabolism of ureides. **Journal of Plant Physiology**, v. 193, p. 97-109, 2016.
- BENDER, R. R.; HAEGELE, J. W.; BELOW, F. E. Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern soybean varieties. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 2, p. 563-573, 2015.
- BERGAMASCHI *et al.* Diferença de temperatura dossel-ar como um indicador de déficit hídrico em milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 5-11, 1999.
- BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, v. 72, p. 248-254, 1976.
- BOARD, J. E.; HARVILLE, B. G.; SAXTON, A. M. Narrow-row seed-yield enhancement in determinate soybean. **Agronomy Journal**, v. 82, n. 1, p. 64-68, 1990.
- CAO, F. Q. *et al.* Identification and characterization of proteins involved in rice urea and arginine catabolism. **Plant physiology**, v. 154, n. 1, p. 98-108, 2010.
- CAO, Y. *et al.* Physiological and proteomic analyses of the drought stress response in *Amygdalus Mira* (Koehne) Yü et Lu roots. **BMC plant biology**, v. 17, n. 1, p. 53, 2017.
- CARLINI, C. R.; LIGABUE-BRAUN, R. Ureasas as multifunctional toxic proteins: a review. **Toxicon**, v. 110, p. 90-109, 2016.
- CARVALHO, J. S. *et al.* Evolução de atributos físicos, químicos e biológicos em solo hidromórfico sob sistemas de integração lavoura-pecuária no bioma Pampa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, p.1131-1139, 2016.
- CASAROLI, D. *et al.* Radiação solar e aspectos fisiológicos na cultura de soja - uma revisão. **Revista da FZVA**, Uruguaiana, v. 14, n. 2, p. 102-120, 2007.

CASTRO, P. R. C.; CARVALHO, M. E. A. **Aminoácidos e suas aplicações na agricultura**. Piracicaba: ESALQ (Série Produtor Rural, 57), 2014, 58p.

CATUCHI, T. A. *et al.* Respostas fisiológicas de cultivares de soja à adubação potássica sob diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 4, p. 519-527, 2012.

CEREZINI, P. *et al.* Gas exchanges and biological nitrogen fixation in soybean under water restriction. **American Journal of Plant Sciences**, v. 5, p. 4011-4017, 2014.

CHAVARRIA, G. *et al.* Restrição fotossintética de plantas de soja sob variação de disponibilidade hídrica. **Ciência Rural**, v. 45, n. 8, p. 1387-1393, 2015.

CHÁVEZ, L. F. *et al.* Diversidade metabólica e atividade microbiana no solo em sistema de integração lavoura pecuária sob intensidades de pastejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 1254-1261, 2011.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Brasília: CONAB, 2020. Disponível em: www.conab.gov.br. Acesso em: 28 set. 2020.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. III Elementos requeridos à nutrição de plantas. *In*: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 91- 132.

DENINSON, R. F.; HARTER, B. L. Nitrate effects on nodule oxygen permeability and leghemoglobin: nodule oximetry and computer modeling. **Plant Physiology**, v. 107, p. 1355-1364, 1995.

DORNHOFF, G. M.; SHIBLES, R. M. Varietal differences in net photosynthesis of soybean leaves. **Crop Science**, v. 10, p. 42-45, 1970.

DUBOIS, M. *et al.* Colorimetric method for determination of sugars and relates substances. **Analytical Chemistry**, v. 28, p. 350-356, 1956.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de solo, 1997. 212 p.

EMBRAPA. **Teor de proteína da soja brasileira 2019**. Brasília: Embrapa Soja, 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/teordeproteina>. Acesso em: 04 dez. 2020.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 9 p. (Embrapa Soja. Circular técnica, 48).

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia (UFLA)**, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FRANCHINI, J. C. *et al.* Soja em solos arenosos: papel do sistema Plantio Direto e da integração lavoura-pecuária. **Embrapa Soja-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 10 p., 2016.

FRANZLUEBBERS, A. J.; STUEDEMANN, J. A. Soil-profile organic carbon and total nitrogen during 12 years of pasture management in the Southern Piedmont USA. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 129, p. 28-36, 2009.

HILDEBRANDT, T. M. *et al.* Amino acid catabolism in plants. **Molecular plant**, v. 8, n. 11, p. 1563-1579, 2015.

HOGAN, M. E.; SWIFT, I. E.; DONE, H. J. Urease assay and ammonia release from tissue. **Phytochemistry**, v. 22, n. 1, p. 663-667, 1983.

HUNGRIA, M. Metabolismo do carbono e do nitrogênio nos nódulos. *In*: HUNGRIA, M; ARAUJO, R. S. (Ed.). **Manual de métodos empregados em estudos de microbiologia agrícola**. Brasília: Embrapa-SPI, 1994. p. 249-283.

HUNGRIA, M. *et al.* Nitrogen nutrition of soybean in Brazil: Contributions of biological N₂ fixation and N fertilizer to grain yield. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 86, n. 4, p. 927-939, 2006.

ISLAM, M. M. *et al.* Nitrogen redistribution and its relationship with the expression of GmATG8c during seed filling in soybean. **Journal of plant physiology**, v. 192, p. 71-74, 2016.

JAVADI, T. *et al.* Mitigating the adverse effects of drought stress on the morpho-physiological traits and anti-oxidative enzyme activities of *Prunus avium* through β -amino butyric acid drenching. **Scientia Horticulturae**, v. 218, p. 156-163, 2017.

JAWORSKI, E. G. Nitrate reductase assay in intact plant tissues. **Biochemical and Biophysical Research communications**, v. 43, p. 1274-1279, 1971.

JIANG, A. C. D. *et al.* Leaf orientation, photorespiration and xanthophyll cycle protect young soybean leaves against high irradiance in field. **Environmental and Experimental Botany**, v. 30, n. 2, p. 1-10, 2004.

KHOYERDI, F. F.; SHAMSHIRI, M. H.; ESTAJI, A. Changes in some physiological and osmotic parameters of several pistachio genotypes under drought stress. **Scientia horticulturae**, v. 198, p. 44-51, 2016.

KING, C. A.; PURCELL, L. C. Inhibition of N₂ fixation in soybean is associated with elevated ureides and amino acids. **Plant Physiology**, v. 137, p. 1389-1396, 2005.

KOLLER, H. R.; NYQUIST, W. F.; CHORUSH, I. S. Growth analysis of the soybean community. **Crop Science**, v. 10, p. 407-412, 1986.

KUTMAN, B. Y.; KUTMAN, U. B.; CAKMAK, I. Nickel-enriched seed and externally supplied nickel improve growth and alleviate foliar urea damage in soybean, **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 363, p. 61-75, 2013.

LAROCCA, J. V. S. *et al.* Soil quality and soybean productivity in crop-livestock integrated system in no-tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 11, p. 1248-1258, 2018.

LOPES, N. F.; LIMA, M. G. S. **Fisiologia da produção**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2015. 492 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319 p.

MASCLAUX-DAUBRESSE, C. *et al.* Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. **Annals of botany**, v. 105, n. 7, p. 1141-1157, 2010.

MCCLURE, P. R.; ISRAEL, D. W. Transport of nitrogen in the xylem of soybean plants. **Plant Physiology**, v. 64, n. 3, p. 411-416, 1979.

MINUZZI, R. B. *et al.* El Niño: ocorrência e duração dos veranicos do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 364-371, 2005.

MUNDSTOCK, C. M.; THOMAS, A. L. **SOJA: Fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos**. Porto Alegre: Departamento de Plantas de Lavoura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Evangraf, 2005. 31 p.

NASCIMENTO JUNIOR, *et al.* Biological nitrogen fixation in soybean under water restriction and exposed to 1-methylcyclopropene. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 7, p. 818-823, 2016.

NELSON, D. L.; COX, M. M. **Princípios de bioquímica de Lehninger**. 7. ed. Porto Alegre: Artmed, 2019. 1272 p.

NELSON-SCREIBER, B. M.; SCHWEITZER, L. E. Limitations on leaf nitrate reductase activity during flowering and pod fill in soybean. **Plant Physiology**, v. 80, p. 454-458, 1985.

PARENTE, T. L. *et al.* Adubação nitrogenada em genótipos de soja associada à inoculação em SEMEADURA direta no cerrado. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 10, p. 249-255, 2015.

PEOPLES, M. B. *et al.* **Methods for evaluating nitrogen fixation by nodulated legumes in the field**. Canberra: Australian International Center of Agricultural Research, 1989, 76 p.

PORRAS, C. A; CAYÓN, D. G.; DELGADO, O. A. Comportamiento fisiológico de genótipos de soja en diferentes arreglos de siembra. **Acta Agronomica**, v. 47, n. 1, p. 9-15, 1997.

RAIJ, B. VAN *et al.* **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285 p.

RAY, J. D.; HEATHERLY, L. G.; FRITSCHI, F. B. Influence of large amounts of nitrogen on nonirrigated and irrigated soybean. **Crop Science**, v. 46, p. 52-60, 2006.

RYSCHAWY, J. *et al.* Designing crop–livestock integration at different levels: toward new agroecological models? **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.108, p.5-20, 2017.

SÁ, J. C. M. de. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: SIQUEIRA, J. O. *et al.* (Eds.). **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Lavras: SBCS/UFLA, 1999. p. 297-319.

SANTOS, M. M. *et al.* Épocas de aplicação de nitrogênio em cobertura na cultura do milho em plantio direto, e alocação do nitrogênio na planta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1185-1194, 2010.

SCHNEIDER, J. R. *et al.* Soybean Plant Metabolism under Water Deficit and Xenobiotic and Antioxidant Agent Application. **Biology**, v. 9, n. 9, p. 266, 2020.

SILVA, F. A. S.; RAO, T. V. R. Regimes pluviais, estação chuvosa e probabilidade de ocorrência de veranicos no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 453-459, 2002.

SOUZA, W. J. O.; MELO, W. J. Teores de nitrogênio no solo e nas frações da matéria orgânica sobre diferentes sistemas de produção de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 885-896, 2000.

STREETER, J. G. Allantoin and allantoic acid in tissues and stem exudate from field-grown soybean plants. **Plant Physiology**, v. 63, p. 478-480, 1979.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.

TANAKA, R. T. *et al.* Cultivo da soja após incorporação de adubo verde e orgânico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 27, p. 1477-1483, 1992.

THU, S. W. *et al.* Role of ureides in source-to-sink transport of photoassimilates in non-fixing soybean. **Journal of Experimental Botany**, v. 71, n. 15, p. 4495-4511, 2020.

USDA. United States Department of Agriculture (USDA), Disponível em: <https://www.usda.gov/topics/farming/crop-production>. USA: USDA, 2020. Acesso em 28 set. 2020.

USMAN, M. T.; REASON, C. J. C. Dry spell frequencies and their variability over southern Africa. **Climate Research**, v. 26, p. 199-211, 2004.

VARGAS, M. A. T.; HUNGRIA, M. Fixação biológica do nitrogênio em soja. In: VARGAS, M. A. T.; HUNGRIA, M. (Ed.) **Biologia dos solos de cerrados**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1997. p. 295-360.

WANG, X. *et al.* Drought-responsive mechanisms in plant leaves revealed by proteomics. **International journal of molecular sciences**, v. 17, n. 10, p. 1706, 2016.

WELLS, R. Soybean growth response to plant density: relationships among canopy photosynthesis, leaf area, and light interception. **Crop Science**, v. 31, p. 755-761, 1991.

YAMASHITA, N. *et al.* Effects of different chemical forms of nitrogen on the quick and reversible inhibition of soybean nodule growth and nitrogen fixation activity. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 131, 2019.

ZANDALINAS, S. I. *et al.* Plant adaptations to the combination of drought and high temperatures. **Physiologia plantarum**, v. 162, n. 1, p. 2-12, 2018.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No sistema de produção agrícola estudado, a soja foi beneficiada pelo manejo de consorciação da pastagem com leguminosas e pela adubação mineral realizada na pastagem, visto que houve maximização dos parâmetros fisiológicos, bem como, maior produtividade de grãos da cultura. É importante destacar que a adubação mineral realizada na pastagem afetou a fixação biológica de N na cultura da soja, pois houve redução na formação de ureídeos nos nódulos desta leguminosa. Entretanto, como a produtividade de grãos nas áreas de pastagem adubada com N mineral foi maior comparado aos demais manejos ficando evidente que a soja aproveitou o N mineral para manter a produção de biomassa e de grãos.

Dentro deste contexto, em um sistema de produção que envolva cultivo frequente de soja após o manejo de pastagem em solos arenosos, o cultivo da gramínea em consorciação com leguminosas como a java pode trazer resultados promissores na adição de N ao sistema sem influenciar demasiadamente na fixação biológica de N. É importante avaliar também os custos de produção, mas com certeza todo o sistema será beneficiado com o manejo. A comprovação disso, é que no decorrer dos anos de manejo houve aumento nos estoques de C e N e redução das perdas de CO₂ por emissão e da NH₃ por volatilização do solo. Avaliando o panorama de aquecimento global, a redução da emissão de gases de efeito estufa (GEE) proveniente da agricultura também é benéfica.

E finalmente, acredita-se que, se bem manejada em outros quesitos agrônômicos e zootécnicos, a pastagem que sucederá a soja no ciclo de produção seguinte será beneficiada nutricionalmente pelo manejo da leguminosa no verão, pois a mesma contribui, por exemplo, para o aumento do estoque de nitrogênio no solo, proporcionado o uso eficiente do nitrogênio em sistemas agrícolas, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa e o impacto aos ecossistemas.

ANEXO A - IMAGENS

FIGURA 1 - Delineamento da área experimental



FIGURA 2 - Semeadura da gramínea e das leguminosas



FIGURA 3 - Detalhes da sementeira



FIGURA 4 - Detalhes da sementeira



FIGURA 5 - Início da formação do pasto



FIGURA 6 - Início da formação do pasto



FIGURA 7 - Pastagem



FIGURA 8 - Pastagem consorciada



FIGURA 9 - Pastejo de animais na área experimental



FIGURA 10 - Dessecação da área experimental



FIGURA 11 - Aplicação de gesso agrícola



FIGURA 13 - Sementes da soja (cultivar TMG-7062 IPRO®)



FIGURA 14 - Detalhes da semeadura da soja



FIGURA 15 - Soja em estágio vegetativo



FIGURA 16 - Soja em estágio vegetativo



FIGURA 17 - Soja em estágio reprodutivo



FIGURA 18 - Soja em estágio reprodutivo



FIGURA 19 - Soja em estágio reprodutivo



FIGURA 20 - Trifólio da soja



FIGURA 21 - Soja em maturação plena



FIGURA 22 - Soja em maturação plena



FIGURA 23 - Colheita da soja



FIGURA 24 - Grãos da soja



FIGURA 25 - Abertura de trincheira durante a pastagem para coleta de amostras de solo



FIGURA 26 - Abertura de trincheira durante a soja para coleta de amostras de solo



FIGURA 27 - Trincheira



FIGURA 28 - Coleta de amostras de solo



FIGURA 29 - IRGA Licor LI-8100A



FIGURA 30 - IRGA Licor LI-8100A

FIGURA 31 - Coletor de NH₃FIGURA 32 - Coletor de NH₃

FIGURA 33 - Detalhes do coletor de NH_3
(espuma a 20 cm do solo)



FIGURA 34 - Detalhes do coletor de NH_3
(espuma a 10 cm do solo)

