

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese/dissertação será disponibilizado somente a partir de 01/01/2024

At the author's request, the full text of this thesis/dissertation will not be available online until July 01, 2024

**BRUNO GAZOLA**

**DESTINO DO NITROGÊNIO APLICADO AO MILHO SEGUNDA SAFRA E SEU  
EFEITO NA SOJA CULTIVADA EM SEGUIDA**

**Botucatu**

**2022**



**BRUNO GAZOLA**

**DESTINO DO NITROGÊNIO APLICADO AO MILHO SEGUNDA SAFRA E SEU  
EFEITO NA SOJA CULTIVADA EM SEGUIDA**

**Tese apresentada à Faculdade de  
Ciências Agrônômicas da Unesp  
Câmpus de Botucatu, para obtenção do  
título de Doutor em Agronomia -  
Agricultura.**

**Orientador: Ciro Antonio Rosolem**

**Coorientador: Eduardo Mariano**

**Botucatu**

**2022**

G291d

Gazola, Bruno

Destino do nitrogênio aplicado ao milho segunda safra e seu efeito na soja cultivada em seguida / Bruno Gazola. -- Botucatu, 2022

111 p. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),  
Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu

Orientador: Ciro Antonio Rosolem

Coorientador: Eduardo Mariano

1. Desnitrificação. 2. Fertilizante marcado. 3. Absorção de nitrogênio. 4. Perdas de nitrogênio. 5. Zea mays L.. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**


TÍTULO DA TESE: DESTINO DO NITROGÊNIO APLICADO AO MILHO SEGUNDA SAFRA E SEU EFEITO NA SOJA CULTIVADA EM SEGUIDA

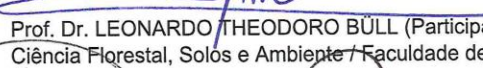
**AUTOR: BRUNO GAZOLA**

**ORIENTADOR: CIRO ANTONIO ROSOLEM**


**COORIENTADOR: EDUARDO MARIANO**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. CIRO ANTONIO ROSOLEM (Participação Presencial)  
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu UNESP

  
Prof. Dr. LEONARDO THEODORO BULL (Participação Presencial)  
Ciência Florestal, Solos e Ambiente / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu - UNESP

  
PROF. DR. GUSTAVO CASTOLDI (Participação Virtual)  
POLO DE INOVAÇÃO / INSTITUTO FEDERAL GOIANO

  
Dr. CRISTIANO MAGALHÃES PARIZ (Participação Virtual)  
Pós-Doutorando - Melhoramento e Nutrição Animal / Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia de Botucatu - UNESP

  
Dra. CAMILA DA SILVA GRASSMANN (Participação Virtual)  
Morrinhos/GO / Bayer Crop Science

Botucatu, 01 de julho de 2022



*Dedico a realização deste trabalho a minha esposa Juliane e a meus pais,  
José Luiz e Aparecida.*





## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela imensa fonte de sabedoria, por me capacitar a cada dia, por ser o único e real sentido da minha vida.

A minha amada esposa, por toda a parceria, paciência, compreensão e incentivo em todos os momentos.

Aos meus familiares, pais e irmãos pelo berço da criação, por serem fonte de inesgotável amor e amparo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Ciro Antonio Rosolem, pela confiança a mim depositada, oportunidade do aprendizado, por acreditar no meu projeto e pela amizade.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Eduardo Mariano, por todos os momentos de aprendizagem, por acreditar em meu potencial e pela amizade.

Aos colaboradores e amigos do Departamento de Produção Vegetal – FCA: Iara, Vinícius, Júlia, Thaís, Dariele, Eliane, Adelina, Valéria, Ciro e Casemiro. Aos alunos estagiários José Barros, Gabriel Bueno e Matheus Cipriano. Obrigado por toda a colaboração e apoio.

Aos amigos da Pós-graduação: Camila Grassmann, Maria Gabriela, Gustavo Dario, Jonas Ferrari, Sérgio Freitas, Laudelino Mota, Jesion Jeibel, Jason Geter. Obrigado por todo apoio, especialmente nos momentos em que julguei não conseguir alcançar meus objetivos.

A UNESP/FCA, instituição a qual sinto orgulho em pertencer, especialmente ao Programa de Pós-graduação em Agronomia/Agricultura, nas pessoas de todos os colaboradores e docentes.

Este trabalho foi realizado com apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (Bolsa de doutorado - Processo nº 2018/15867-3).

A todos os membros do NUCLEUS: Um centro conjunto virtual para oferecer eficiência aprimorada de uso de N por meio de uma abordagem integrada de sistemas solo-

planta para o Reino Unido e o Brasil. Financiado no Brasil pela FAPESP–Fundação de Amparo à Pesquisa de São Paulo (número de concessão 2015/50305-8)

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

E a todos, que direta ou indiretamente colaboraram para o êxito desta pesquisa, agradeço.

## RESUMO

O milho segunda safra apresenta potencial para semeadura em consórcio com forrageiras do gênero *Urochloa* spp. e *Megathyrsus* spp., as quais podem modificar a população microbiana da rizosfera e afetar a dinâmica do nitrogênio (N) no sistema de produção. Esse manejo melhora as condições nutricionais do sistema, e a disponibilidade de N através da ciclagem do nutriente pelos resíduos, podendo ocorrer redução nas perdas de  $\text{NO}_3^-$  por lixiviação e de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). A ciclagem de N favorece a nutrição do milho (*Zea mays* L.), no entanto as quantidades de N fertilizante absorvida por essa cultura em consórcio com forrageiras ainda necessitam ser esclarecidas. Estudos que explorem melhor o potencial agrônomo de forrageiras com o milho, e soja semeada em sucessão são de extrema importância. Para confirmar a hipótese de que as forrageiras apresentam capacidade de melhorar a ciclagem do N, atuando na diminuição das perdas, foram conduzidos estudos entre os anos de 2018 e 2021 em Botucatu, com os objetivos de (1) avaliar a influência das forrageiras no número de cópias dos principais genes relacionados ao ciclo do N e na emissão de  $\text{N}_2\text{O}$  na soja (Capítulo 1), (2) verificar se o consórcio milho – forrageira interfere na recuperação de  $^{15}\text{N}$  fertilizante aplicado na safra e o destino do  $^{15}\text{N}$  na soja em sucessão (Capítulo 2), e (3) avaliar se o consórcio mitiga as emissões de  $\text{N}_2\text{O}$  e qual a influência nas perdas de  $\text{NH}_3$  (Capítulo 3). Para atingir os objetivos propostos foram realizados os seguintes experimentos de campo. Estudo 1; em janeiro de 2018 foi realizada a semeadura das forrageiras *Megathyrsus maximus* (Tanzânia) e *Urochloa ruziziensis* (Ruziziensis comum) que foram conduzidas durante sete meses, o experimento contou também com um manejo sem forrageira. Em sequência ocorreu a semeadura da soja referente a safra 18-19. Para avaliação da abundância de genes foi realizada a amostragem de solo em setembro, outubro de 2018 e janeiro de 2019 e durante o ciclo da soja 18-19 foi realizada a amostragem da emissão de  $\text{N}_2\text{O}$ . Estudos 2 e 3; após a retirada da soja 18-19, em fevereiro de 2019 foi realizada a semeadura do milho segunda safra consorciado com as forrageiras e solteiro. A partir desta safra o experimento teve subparcelas referentes às doses de  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de N e o controle sem N. O manejo com milho segunda safra e soja verão foi realizado por dois anos agrícola, safras 19-20 e 20-21. No estudo 2 foram avaliados o destino do  $^{15}\text{N}$  no sistema solo-planta nas safras de milho e soja, com coletas de plantas e solos. Para o estudo 3 foram realizadas amostragens da emissão de gases de efeito estufa

e  $\text{NH}_3$  durante o ciclo das culturas e na entressafra, com maior intensidade após a semeadura e adubação de cobertura com N no milho. A abundância de genes AOA prevaleceu sobre a AOB, e a soja cultivada sobre essas forrageiras emitiram mais  $\text{N}_2\text{O}$ . Quando absorvido pelo milho o  $^{15}\text{N}$  fertilizante apresentou como principal destino os grãos, no entanto, o solo ainda é o maior reservatório de  $^{15}\text{N}$  fertilizante nas safras de soja. Maiores perdas de  $\text{N}_2\text{O}$  ocorreram no início do experimento em decorrência da movimentação do solo na semeadura, e ao longo do experimento houve predominância de absorção de  $\text{CH}_4$ . Os sistemas com forrageiras não diminuíram o número de cópias de AOB ou AOA, no entanto, essas apresentam boa capacidade de absorção do N, armazenando este na sua parte aérea, possibilitando maior absorção pela soja cultivada em sucessão. O  $\text{CH}_4$  não é menos absorvido com milho fertilizado e soja em rotação, enquanto a principal via de perda gasosa de N é por volatilização de  $\text{NH}_3$  no manejo com e sem forrageira.

**Palavras-chave:** ciclo do N; sistemas de rotação; nitrificação;  $\text{N}_2\text{O}$ ;  $^{15}\text{N}$  fertilizante.

## ABSTRACT

Maize (*Zea mays* L.) second crop has potential for sowing in intercropping with forages of the genus *Urochloa* spp. and *Megathyrsus* spp., which can modify the microbial population of the rhizosphere and affect the dynamics of nitrogen (N) in the production system. This management improves the nutritional conditions of the system, and the availability of N through the cycling of the nutrient by the residues, and there may be a reduction in the losses of  $\text{NO}_3^-$  by leaching and nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ). The N cycling favors the nutrition of maize, however the amount of N fertilizer absorbed by this crop in intercropping with forage still need to be clarified. Studies that better explore the agronomic potential of forages with maize and soybeans sown in succession are extremely important. To confirm the hypothesis that forages have the ability to improve N cycling, acting to reduce losses, studies were conducted between 2018 and 2021 in Botucatu, with the objectives of (1) evaluate the influence of forages on the number of copies of the main genes related to the N cycle and  $\text{N}_2\text{O}$  emission in soybean (Chapter 1), (2) to verify if the maize - forage intercrop interferes in the recovery of  $^{15}\text{N}$  fertilizer applied in the crop and the fate of  $^{15}\text{N}$  in soybean in succession (Chapter 2), and (3) assess whether the consortium mitigates  $\text{N}_2\text{O}$  emissions and what influence it has on  $\text{NH}_3$  losses (Chapter 3). To achieve the proposed objectives, the following field experiments were carried out. Study 1; in January 2018, the sowing of the forages *Megathyrsus maximus* (Guinea grass) and *Urochloa ruziziensis* (Ruzigrass - common) was carried out, which were conducted for seven months, the experiment also had a management without forage. In sequence, the sowing of soybeans for the 18-19 harvest took place. To evaluate gene abundance, soil collection was carried out in September, October 2018 and January 2019 and during the soybean cycle 18-19, sampling of  $\text{N}_2\text{O}$  emission was carried out. Studies 2 and 3; After the removal of soybean 18-19, in February 2019, second crop maize was sowed intercropped with forages and single. From this season, the experiment started to have subplots referring to doses of  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  of N and the control without N. The management with second crop maize and summer soybean was carried out for two crop years, 19-20 and 20-21. In study 2, the fate of  $^{15}\text{N}$  in the soil-plant system in maize and soybean crops was evaluated, with plant and soil collections. For study 3, greenhouse gas and  $\text{NH}_3$  emissions were collected during the crop cycle and in the off-season, with greater intensity after sowing and topdressing with N in maize. The abundance of AOA genes

prevailed over AOB and soybeans cultivated on these forages emitted more  $N_2O$ . When absorbed by maize, the  $^{15}N$  fertilizer presented grains as its main destination, however the soil is still the largest reservoir of  $^{15}N$  fertilizer in soybean crops. Higher  $N_2O$  losses occurred at the beginning of the experiment, and throughout the experiment there was a predominance of  $CH_4$  absorption. The system with forages did not reduce the number of copies of AOB or AOA, however these have a good capacity for N absorption, storing it in their shoots, allowing a greater absorption by the soybean cultivated afterwards.  $CH_4$  is no less absorbed with fertilized maize and soybeans in rotation, while the main route of gaseous N loss is by volatilization of  $NH_3$  in species managed with and without forage.

**Keywords:** N cycle; rotation systems; nitrification;  $N_2O$ ;  $^{15}N$  fertilizer.

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	15
<b>CAPÍTULO 1 - INFLUÊNCIA DO MANEJO NA ABUNDÂNCIA DE GENES RELACIONADOS COM O CICLO DO NITROGÊNIO E EMISSÃO DE N<sub>2</sub>O .</b>	<b>18</b>
RESUMO.....	18
ABSTRACT.....	19
1.1 INTRODUÇÃO .....	20
1.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	21
1.2.1 Descrição do local.....	21
1.2.2 Design experimental e gerenciamento da safra .....	23
1.2.3 Amostragem de solo .....	24
1.2.4 Avaliação laboratorial da nitrificação do solo .....	24
1.2.5 Isolamento de DNA e PCR quantitativo em tempo real.....	25
1.2.6 Análise química do solo .....	25
1.2.7 Amostragem de N <sub>2</sub> O e medições auxiliares.....	26
1.2.8 Determinação de matéria seca da biomassa e produtividade da soja ....	27
1.2.9 Análise estatística .....	28
1.3 RESULTADOS.....	28
1.3.1 Genes relacionados ao ciclo do N e taxa de nitrificação líquida .....	28
1.3.2 Emissão de N <sub>2</sub> O, matéria seca da biomassa e produtividade da soja.....	32
1.3.3 Correlações entre os genes do ciclo do N e propriedades químicas do solo .....	33
1.4 DISCUSSÃO .....	36
1.5 CONCLUSÕES .....	39
Referências .....	40
Material suplementar.....	46
<b>CAPÍTULO 2 - FERTILIZAÇÃO COM <sup>15</sup>N EM FORRAGEIRAS CONSORCIADA COM MILHO E A RECUPERAÇÃO PELA SOJA EM SUCESSÃO.....</b>	<b>48</b>
RESUMO.....	48
ABSTRACT.....	49
2.1 INTRODUÇÃO .....	50
2.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	51
2.2.1 Descrição do estudo .....	51
2.2.2 Design de estudo.....	52
2.2.3 Condução das culturas.....	53
2.2.4 Microparcelas com <sup>15</sup> N fertilizante.....	54
2.2.5 Procedimento de amostragem e análises <sup>15</sup> N.....	55
2.2.6 Cálculos e análises estatísticas .....	56
2.3 RESULTADOS.....	57
2.3.1 Distribuição e destino do <sup>15</sup> N fertilizante aplicado no milho e do <sup>15</sup> N residual na soja.....	57



2.3.2	Porcentagem de <sup>15</sup> N-fertilizante recuperado no solo nas safras de milho e <sup>15</sup> N-residual recuperado no solo nas safras de soja .....	59
2.3.3	Produção de matéria seca da biomassa de plantas .....	63
2.4	DISCUSSÃO.....	67
2.4.1	N derivado do fertilizante e recuperação de <sup>15</sup> N na planta.....	67
2.4.2	N derivado do fertilizante e recuperação de <sup>15</sup> N no solo.....	70
2.5	CONCLUSÕES.....	70
	Referências .....	71
	Material suplementar .....	76
<b>CHAPTER 3 - <sup>15</sup>N GREENHOUSE GASES EMISSION AND AMMONIA VOLATILIZATION FROM A SOYBEAN-MAIZE/FORAGE ROTATION UNDER NO-TIL.....</b>		
	ABSTRACT .....	79
3.1	INTRODUCTION .....	79
3.2	MATERIAL AND METHODS.....	81
3.2.1	Local characterization, treatments and statistical design .....	81
3.2.2	Conducting the experiment.....	82
3.2.3	Gas sampling and analysis .....	82
3.2.4	Ammonia sampling and Analysis.....	83
3.2.5	Dry matter and grain production .....	84
3.2.6	Soil nitrate and ammonium sampling and analysis.....	84
3.2.7	Calculations and statistics.....	84
3.3	RESULTS .....	86
3.3.1	Environmental conditions and soil properties .....	86
3.3.2	Emissions of nitrous oxide, methane, carbon dioxide and ammonia .....	86
3.3.3	N-mineral content in the soil.....	88
3.4.	DISCUSSION.....	88
3.4.1	GHG flux and ammonia volatilization.....	88
3.4.2	Cumulative emissions .....	89
3.4.3	Normalized emissions .....	91
3.5	CONCLUSIONS .....	92
	References .....	93
	Supplementary material .....	105
	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	107
	REFERÊNCIAS .....	1099

## INTRODUÇÃO GERAL

O nitrogênio (N) pode ingressar no sistema solo-planta por fertilizantes, fixação biológica ou deposições atmosféricas, e pode sair do agroecossistema via lixiviação de nitrato (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), emissão de óxido nitroso (N-N<sub>2</sub>O), volatilização de amônia (N-NH<sub>3</sub>), erosão e remoção pelas culturas.

A principal fonte de N para as plantas é a matéria orgânica do solo (MOS), através da sua mineralização (EPSTEIN et al., 1972). A direção dos processos de imobilização–mineralização é dependente do conteúdo de N no material vegetal, relação C/N, quantidade de N no sistema, temperatura, aeração, umidade e pH do solo (ROSOLEM; PACE; CRUSCIOL, 2004). O processo de mineralização se dá inicialmente pela oxidação do N orgânico à NH<sub>3</sub> por microrganismos amonificadores. A NH<sub>3</sub> é então transformada em amônio (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) pela reação com um próton de hidrogênio. A nitrificação, é um processo dependente da amonificação ou de alguma fonte que forneça NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Em meio aeróbico, ocorre a oxidação do NH<sub>4</sub><sup>+</sup> à nitrito (N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) por bactérias do gênero *Nitrosomonas*. O NO<sub>2</sub><sup>-</sup> é rapidamente oxidado por bactérias do gênero *Nitrobacter* e *Nitrospira*, obtendo-se assim o NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Por ser um cátion, o NH<sub>4</sub><sup>+</sup> pode ser adsorvido aos sítios de troca catiônica, aumentando assim seu tempo de residência no solo em comparação ao NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, um ânion livre que pode ser deslocado mais facilmente (ROSOLEM; FOLONI; OLIVEIRA, 2003).

A ocorrência de microsítios anaeróbios podem resultar na utilização do NO<sub>3</sub><sup>-</sup> como fonte aceptora de elétrons por bactérias anaeróbias facultativas. Este ânion é então reduzido a forma volátil, como óxido nitroso (N-N<sub>2</sub>O) e perdido para a atmosfera (SUBBARAO et al., 2013). Além das saídas por lixiviação e emissão de gases por desnitrificação, a volatilização de NH<sub>3</sub> oriundo de fertilizantes nitrogenados e durante a senescência dos vegetais também é de importância econômica e ambiental no ciclo do N (CANTARELLA, 2007). Todas as vias de perdas acima descritas implicam em menor eficiência de uso do N pelas culturas.

Dentre as entradas de N no sistema, a fixação biológica do N<sub>2</sub> atmosférico é um importante processo de conversão do N reativo à NH<sub>3</sub>, ocorrendo por microrganismos em associação simbiótica com as plantas, como também bactérias de vida livre não-simbiontes (VITTI; HEIRINCHS, 2007). O N pode entrar também na forma de óxidos depositado ao solo pela ação de chuvas, como também pode haver contribuição por descargas elétricas e deposição de poeira. Para a soja [*Glycine max* (L) Merrill], o N

é o nutriente mais requerido, principalmente devido ao elevado teor de proteína nos grãos, que pode chegar a  $40 \text{ g kg}^{-1}$  de N (TRZECIAK, 2012). Para suprir a elevada demanda a principal fonte de N para a soja é a fixação biológica de nitrogênio, realizada por bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, chegando a fornecer até  $200 \text{ kg ha}^{-1}$  de N (UNKOVICH et al., 2008). A inoculação de sementes de soja com bactérias diazotróficas é um exemplo clássico de sucesso para a agricultura brasileira, pois a aplicação de fertilizante nitrogenado é dispensada, visto que a FBN supre a demanda do nutriente para a cultura (FAGERIA, 2014).

Contudo, o N proveniente da adubação realizada na safra antecessora pode complementar necessidade caso ocorra, principalmente na fase reprodutiva considerada o período de elevada demanda por N (AMADO; SCHLEINDWEIN; FIORIN, 2010; CÂMARA, 2014). A adubação com N em milho (*Zea mays* L.) segunda safra pode proporcionar aumentos de produtividade na safra de soja cultivada em sucessão (CAIONI et al., 2017), pois o N fertilizante residual que permanece no sistema após o cultivo de milho pode chegar a 50% do fertilizante aplicado (ROCHA et al., 2019).

Assim como para a soja, o N é o nutriente exigido em maior quantidade para o milho, em solos com baixa disponibilidade de N a adubação é indispensável para se obter altas produtividades, pois o aumento da produtividade do milho está diretamente relacionado à aplicação de N fertilizante (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000). O milho pode ser semeado em sucessão ou consórcio com forrageiras do gênero *Urochloa*, utilizadas em sistemas de integração lavoura pecuária (ILP). A ILP é um sistema de produção que possibilita alternar anos ou períodos de culturas graníferas, ou fibrosa com atividade pecuária (MACEDO, 2009). Os benefícios da ILP incluem a recuperação de pastagens degradadas, melhorias nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, (MACEDO, 2009; KLUTHCOUSKI; STONE, 2003) com intuito de recuperar e manter a produção de pastagem e grãos (BALBINO; BARCELLOS; STONE, 2011). Esse sistema de produção torna possível e promissor o cultivo de soja em áreas que estavam sendo ocupadas com pastagem ou cultivadas com forrageiras em consórcio com milho.

As forrageiras apresentam sistema radicular vigoroso, capaz de explorar profundamente o solo, diminuindo perdas de N e favorecendo a ciclagem e aproveitamento do fertilizante aplicado em safras anteriores, melhorando a eficiência de uso do adubo (ROSOLEM et al., 2018). Como desvantagem, a palha das

fORAGEIRAS, assim como os resíduos de raízes, podem resultar em imobilização microbiana do N mineral do solo, devido à alta relação C/N de seus resíduos vegetais (PERIN et al., 2004; ROSOLEM et al., 2012). Silgram e Shepherd (1999) postularam que os resíduos vegetais devem possuir ao menos 15 g kg<sup>-1</sup> de N para atender às necessidades dos microrganismos decompositores sem estes precisarem recorrer ao N mineral do solo. Os sistemas de produção com cultivo consorciado de milho e forrageira apresentam poucos relatos de redução na produtividade de grãos do milho devido à competição pelo N fertilizante exercida pela forrageira (KLUTHICOUSKI; AIDAR, 2003; BROCH; CECCON, 2007; CECCON et al., 2013).

Algumas espécies de manejo do gênero *Urochloa* (sin. *Brachiaria*) inibem a atividade de Nitrosomonas (ISHIKAWA et al., 2003; SUBBARAO et al., 2006), e a liberação de compostos no solo por forrageiras desse gênero pode afetar a biomassa microbiana do solo (ULEHLOVA; KUNC; VANCURA 1988). A supressão da conversão do NH<sub>4</sub><sup>+</sup> a NO<sub>3</sub><sup>-</sup> por compostos de plantas é usualmente denominada inibição biológica da nitrificação (SUBBARAO et al., 2009; SUBBARAO et al., 2012). A inibição da nitrificação tem sido descrita como medida oportuna para aumentar a eficiência de uso do N pelas culturas e também reduzir a poluição ambiental causada pela fertilização. Preservação do N mineral do solo na forma de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> pode favorecer a absorção de N pelo milho, e aumentar a eficiência de uso do nutriente e a produtividade da cultura (MORETA et al., 2020). Em adição, o bloqueio da nitrificação pelo cultivo de forrageiras pode ser útil na mitigação de perdas de N por N<sub>2</sub>O, pois o NO<sub>3</sub><sup>-</sup> está diretamente relacionado à ambos os processos (CAMERON; MOIR, 2013).

Diante do exposto, para confirmar a hipótese de que as forrageiras melhoram a ciclagem do N no sistema, atuando na diminuição das perdas em relação a um sistema sem forrageira, foram conduzidos estudos com os objetivos de verificar (i) a influência na comunidade microbiana relacionada ao ciclo do N no solo, (ii) a absorção de <sup>15</sup>N fertilizante pelo milho e o destino do <sup>15</sup>N na soja, (iii) e a emissão de gases do efeito estufa com as perdas de NH<sub>3</sub> em cada ano agrícola.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de forrageira consorciada com culturas graníferas em rotação com leguminosa possibilita maior tempo de uso da terra. Saber qual dose adequada de N e a espécie de manejo a se utilizar em consórcio com o milho é de grande importância para se obter sucesso no rendimento de grãos em ambas safras. Esses sistemas se mostram sustentáveis, pois a forrageira apresenta alta aptidão para absorção de N, além da capacidade de explorar camadas profundas do solo, e as leguminosas desempenham papel no fornecimento de N, elevando o teor de N mineral do solo. Outro ponto de grande relevância pelas forrageiras é a possibilidade de imobilizar este nutriente na parte aérea, podendo este ser liberado gradualmente durante a próxima safra. Por essas características esse sistema de manejo é classificado como de grande importância mundial, pois busca a redução sustentável da fome. Com isso se torna essencial estudar sistemas eficazes na produção de alimentos, buscando elevar a eficiência de uso deste nutriente e reduzir perdas, visto que o N é o nutriente mais importante para ambas culturas.

Mesmo quando cultivadas por um período de sete meses as forrageiras não diminuíram a emissão de  $N_2O$  na safra seguinte, no entanto, menor taxa de nitrificação, mesmo com aumento na abundância de genes AOB. Quando cultivada em consórcio com milho segunda safra também não foi observado diminuição nas perdas de  $N_2O$ , no entanto, as emissões de  $N_2O$  nesse sistema de manejo utilizado em clima tropical apresentam baixa taxa de perdas, enquanto a principal via de perdas de N foi através da volatilização de  $NH_3$ . Afirmamos também que o manejo de soja em sucessão ao milho fertilizado com N não diminuiu a absorção de  $CH_4$  pelo sistema. O  $^{15}N$  apresenta o solo como principal destino, no entanto, sistemas de manejo com forrageiras diminuem o N presente no solo na safra de milho, mas essa não possibilita reduzir possíveis perdas em relação a um manejo sem forrageira. A quantidade de  $^{15}N$  absorvido pela soja é baixa, mas ocorre maior aproveitamento do nutriente pela cultura quando semeada sobre a palha das forrageiras em anos de baixas absorções no milho.



## REFERÊNCIAS

- AMADO, T. J. C.; SCHLEINDWEIN, J. A.; FIORIN, J. E. Manejo do solo visando à obtenção de elevados rendimentos de soja sob sistema plantio direto. **Soja-Manejo para alta produtividade de grãos. Porto Alegre, UFRGS**, p. 35-97, 2010.
- BALBINO, Luiz Carlos; BARCELLOS, A. de O.; STONE, Luís Fernando. Marco Referencial Integração Lavoura-Pecuária-Floresta/Reference Document for Crop-Livestock-Forestry Integration. **Brasília, DF: Embrapa**, 2011.
- BROCH, Dirceu Luiz; CECCON, Gessi. Produção de milho safrinha com interação lavoura e pecuária. **Embrapa Agropecuária Oeste-Documentos (INFOTECA-E)**, 2007.
- CAIONI, Sheila et al. Efeito residual da adubação nitrogenada e molibídica no milho sobre a soja cultivada em sucessão. **Espacios**, 2017.
- CÂMARA, G. M. S. Fixação biológica de nitrogênio em soja. **Informações agronômicas**, n. 147, p. 1-9, 2014.
- CAMERON, Keith C.; DI, Hong J.; MOIR, James L. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. **Annals of applied biology**, v. 162, n. 2, p. 145-173, 2013.
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds.). Fertilidade do solo Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 375-470. Câmara, G. M. S. Fixação biológica de nitrogênio em soja. **Informações agronômicas**, n. 147, p. 1-9, 2014.
- CECCON, Gessi et al. Legumes and forage species sole or intercropped with corn in soybean-corn succession in midwestern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 204-212, 2013.
- EPSTEIN, Emanuel et al. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**. 1972.
- FAGERIA, Nand Kumar. **Nitrogen management in crop production**. CRC press, 2014. Fageria, N. K. (2014). *Nitrogen management in crop production*. CRC press.
- FANCELLI, Antônio Luiz; DOURADO NETO, Durval. Produção de milho. 2000.
- HERRIDGE, David F.; PEOPLES, Mark B.; BODDEY, Robert M. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. **Plant and soil**, v. 311, n. 1, p. 1-18, 2008.
- ISHIKAWA, T. et al. Suppression of nitrification and nitrous oxide emission by the tropical grass *Brachiaria humidicola*. In: **Roots: The Dynamic Interface between Plants and the Earth**. Springer, Dordrecht, 2003. p. 413-419.
- KLUTHCOUSKI, J.; AIDAR, H. Implantação, condução e resultados obtidos com o sistema Santa Fé. **Integração lavoura-pecuária. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão**, p. 407-442, 2003.

KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F. Desempenho de culturas anuais sobre palhada de braquiária. **Integração lavoura-pecuária. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão**, p. 499-522, 2003.

MACEDO, Manuel Claudio Motta. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, p. 133-146, 2009.

MORETA, Danilo E. et al. Biological nitrification inhibition (BNI) in Brachiaria pastures: A novel strategy to improve eco-efficiency of crop-livestock systems and to mitigate climate change. 2020.

PERIN, Adriano et al. Produção de fitomassa, acúmulo de nutrientes e fixação biológica de nitrogênio por adubos verdes em cultivo isolado e consorciado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 1, p. 35-40, 2004.

ROCHA, Kassiano F. et al. Fate of 15N fertilizer applied to maize in rotation with tropical forage grasses. **Field Crops Research**, v. 238, p. 35-44, 2019.

ROSOLEM, Ciro A. et al. Nitrate leaching in soybean rotations without nitrogen fertilizer. **Plant and soil**, v. 423, n. 1, p. 27-40, 2018.

ROSOLEM, Ciro A.; PACE, Leandro; CRUSCIOL, Carlos AC. Nitrogen management in maize cover crop rotations. **Plant and Soil**, v. 264, n. 1, p. 261-271, 2004.

ROSOLEM, Ciro Antonio et al. Nitrogen immobilization by congo grass roots impairs cotton initial growth. **Journal of Agricultural Science**, p. 126-136, 2012.

ROSOLEM, Ciro Antonio; FOLONI, José Salvador Simoneti; OLIVEIRA, Rosa Honorato de. Dinâmica do nitrogênio no solo em razão da calagem e adubação nitrogenada, com palha na superfície. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 2, p. 301-309, 2003.

SILGRAM, Martyn; SHEPHERD, Mark A. The effects of cultivation on soil nitrogen mineralization. **Advances in agronomy**, v. 65, p. 267-311, 1999.

SUBBARAO, G. V. et al. Biological nitrification inhibition—a novel strategy to regulate nitrification in agricultural systems. **Advances in agronomy**, v. 114, p. 249-302, 2012.

SUBBARAO, G. V. et al. Evidence for biological nitrification inhibition in Brachiaria pastures. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 106, n. 41, p. 17302-17307, 2009.

SUBBARAO, G. V. et al. Scope and strategies for regulation of nitrification in agricultural systems—challenges and opportunities. **Critical reviews in plant sciences**, v. 25, n. 4, p. 303-335, 2006.

SUBBARAO, Guntur V. et al. Potential for biological nitrification inhibition to reduce nitrification and N<sub>2</sub>O emissions in pasture crop–livestock systems. **Animal**, v. 7, n. s2, p. 322-332, 2013.



TRZECIAK, Mário Borges. **Formação de sementes de soja: aspectos físicos, fisiológicos e bioquímicos**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ULEHLOVA, BLANKA; KUNC, FRANTIŠEK; VANCURA, V. Nutrition and energy sources of microbial populations in ecosystems. **Developments in agricultural and managed-forest ecology**, 1988.

UNKOVICH, Murray et al. **Measuring plant-associated nitrogen fixation in agricultural systems**. Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR), 2008.

VITTI, Godofredo Cesar; HEIRINCHS, Reges. Formas tradicionais e alternativas de obtenção e utilização do nitrogênio e do enxofre: uma visão holística. **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**, 2007.