

**MURILO DE SOUZA**

**NITROGÊNIO NO SISTEMA SOLO-PLANTA APÓS A APLICAÇÃO DE  
CALCÁRIO E GESSO EM SISTEMA DE PRODUÇÃO**

**Botucatu**

**2022**



**MURILO DE SOUZA**

**NITROGÊNIO NO SISTEMA SOLO-PLANTA APÓS A APLICAÇÃO DE  
CALCÁRIO E GESSO EM SISTEMA DE PRODUÇÃO**

Tese apresentada à Faculdade de  
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus  
de Botucatu, para obtenção do título de  
Doutor em Agronomia (Agricultura).

Orientador: **Ciro Antonio Rosolem**

**Botucatu**

**2022**

S729n

Souza, Murilo De

Nitrogênio no sistema solo-planta após a aplicação de calcário e gesso em sistema de produção / Murilo De Souza. -- Botucatu, 2022  
91 p. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),  
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu  
Orientador: Ciro Antonio Rosolem

1. corretivos de solo. 2. soja. 3. milho segunda safra. 4. carbono Microbiano. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: NITROGÊNIO NO SISTEMA SOLO-PLANTA APÓS A APLICAÇÃO DE CALCÁRIO E GESSO EM SISTEMA DE PRODUÇÃO

AUTOR: MURILO DE SOUZA

ORIENTADOR: CIRO ANTONIO ROSOLEM

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



Prof. Dr. CIRO ANTONIO ROSOLEM (Participação Virtual)  
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP



P/ Dr. DANILO SILVA ALMEIDA (Participação Virtual)  
/ Yara Brasil Fertilizantes SA



P/Pesquisador ESTÉVÃO VICARI MELLIS (Participação Virtual)  
Centro de Solos e Recursos Agroambientais, Fertilidade do Solo / Instituto Agronômico de Campinas



P/ Prof. Dr. FÁBIO RAFAEL ECHER (Participação Virtual)  
Produção Vegetal / Universidade do Oeste Paulista



P/ Prof. Dr. JOSÉ LAVRES JUNIOR (Participação Virtual)  
Departamento de Isótopos Estáveis / Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA/USP

Botucatu, 02 de fevereiro de 2022



À minha amada tia,

Nelma,

dedico



## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus, que me deu forças e esperança até aqui.

Aos meus queridos pais, Nélcio e Marilza, pelos conselhos e amor incondicional.

Ao meu irmão Gustavo, que quando precisei sempre me apoiou e me ajudou.

Ao Prof. Dr. Ciro Antonio Rosolem, pela orientação, ensinamentos, paciência, amizade e exemplo de professor, além de me proporcionar a oportunidade de evolução crescimento.

Ao departamento de Agricultura da FCA – UNESP e ao programa de Pós Graduação que abriram as portas para mim e me deram suporte para que eu pudesse alcançar esse importante objetivo em minha carreira profissional.

À equipe da Fazenda Lageado, FCA – UNESP, que me auxiliou com insumos agrícolas e nas atividades de campo para aquisição de resultados de alta qualidade.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro, concedido por meio de bolsa de doutorado (Processo nº 2017/22134-0) e bolsa estágio de pesquisa no exterior BEPE (Processo nº 2019/15042-7).

Ao CENA e ESALQ-USP, em especial ao professor Paulo Cesar Ocheuze Trivelin e suas respectivas equipes, pelo apoio e ensinamentos à parte deste trabalho, que foi realizado em parceria.

Aos amigos e colegas que sempre estiveram juntos nas atividades teóricas, intelectuais e práticas, de campo e laboratório deste curso, mantendo a mais elevada qualidade e confiabilidade de resultados, posso dizer que sem eles nada disso teria acontecido, mas que também estiveram juntos nos momentos de festas e descontração, amigos que levarei para sempre comigo.

Muito obrigado!



## RESUMO

O milho tem sido cultivado em segunda safra no sistema de semeadura direta (SSD), após a soja, mas ainda não há informações precisas sobre sua resposta ao nitrogênio (N) nesse sistema de cultivo, principalmente quando consorciado com gramíneas forrageiras, bem como sobre as consequências na próxima cultura da soja, e processos do ciclo do carbono (C) no solo. O objetivo do trabalho foi avaliar a eficiência do uso de N pela cultura do milho em consórcio com o capim colonião cv. Tanzânia (*Megathyrsus maximus*) na segunda safra, crescimento radicular das culturas em SSD, produtividade das culturas e eficiência de uso do carbono (EUC) em função da correção da acidez do solo utilizando calcário e gesso. Foi conduzido um experimento com a cultura da soja e subsequente à soja, foi cultivado o milho em consórcio com capim cv. Tanzânia, nos anos agrícolas de 2017, 2018 e 2019. Os tratamentos constaram da aplicação de calcário, calcário + gesso e controle (sem aplicação de corretivos) na cultura da soja, e quatro doses de N (0, 80, 160 e 240 kg ha<sup>-1</sup>) aplicadas na cultura do milho. No tratamento com 160 kg ha<sup>-1</sup> N foi realizada aplicação de sulfato de amônio enriquecido em <sup>15</sup>N, para avaliação do aproveitamento do N fertilizante. A aplicação dos corretivos de acidez do solo foi eficiente em promover maior crescimento radicular, sendo mais evidente com a aplicação de calcário associado ao gesso. A correção do solo também promoveu maior absorção do N pelas plantas de milho consorciado com capim cv. Tanzânia, conseqüentemente, resultou em maior eficiência de uso do fertilizante nitrogenado. Além disso, há evidências que a adição de N e P pode aumentar a eficiência do uso de carbono adicionado em solos com acidez corrigida, sugerindo que a comunidade microbiana do solo é limitada pelas restrições de nutrientes minerais.

**Palavras-chave:** corretivos de solo; soja; milho segunda safra; sistemas de consórcio; carbono microbiano.



## ABSTRACT

Maize has been cultivated as a relay crop in the no tillage system (NTS), after soybean, but there is still no accurate information about its response to nitrogen (N) in this cultivation system, especially when intercropped with forage grasses, as well as about the consequences on the next soybean crop, and carbon (C) cycle processes in the soil. The objective of this work was to evaluate the fertilizer N use efficiency (NUE) by maize as a relay crop intercropped with Guinea grass (*Megathyrsus maximus*), root growth of crops in NTS, crop yield and carbon use efficiency (CUE) as a function of soil acidity alleviation using lime and gypsum. An experiment was carried out with soybean crop and subsequent to soybean, maize was cultivated intercropped with Guinea grass, in the 2017, 2018 and 2019 seasons. The treatments consisted of the application of lime, lime + gypsum and control (without amendments application) in the soybean crop, and four N doses (0, 80, 160 and 240 kg ha<sup>-1</sup>) applied to maize. In the treatment with 160 kg N ha<sup>-1</sup>, ammonium sulfate enriched with <sup>15</sup>N was applied, to evaluate the N-fertilizer recovery. The amendments application was efficient in promoting greater root growth, being more evident with the lime associated with gypsum application. Acidity soil correction also promoted greater N uptake by maize plants intercropped with Guinea grass, consequently, resulted in greater fertilizer NUE. Furthermore, there is evidence that the addition of N and phosphorus (P) can increase the use efficiency of the added carbon in acid-corrected soils, suggesting that the soil microbial community is limited by mineral nutrient restrictions.

**Keywords:** soil amendments; soybean; maize as a relay crop; intercropped system; microbial carbon.



## SUMÁRIO

|                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUÇÃO GERAL.....                                                                                                                                           | 15 |
| CAPÍTULO 1 - CORREÇÃO DA ACIDEZ DO SOLO E APLICAÇÃO DE N AO MILHO EM UM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO MELHORA O CRESCIMENTO E A PRODUTIVIDADE DA RAIZ DA SOJA ..... | 17 |
| RESUMO.....                                                                                                                                                     | 17 |
| ABSTRACT.....                                                                                                                                                   | 18 |
| 1.1 INTRODUÇÃO.....                                                                                                                                             | 18 |
| 1.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....                                                                                                                                    | 20 |
| 1.2.1 Descrição da área experimental.....                                                                                                                       | 20 |
| 1.2.2 Delineamento experimental e tratamentos.....                                                                                                              | 22 |
| 1.2.3 Condução do experimento.....                                                                                                                              | 22 |
| 1.2.4 Amostragem de raiz e determinação de matéria seca.....                                                                                                    | 23 |
| 1.2.5 Amostragem de solo e análises químicas.....                                                                                                               | 23 |
| 1.2.6 Análises estatísticas.....                                                                                                                                | 23 |
| 1.3 RESULTADOS.....                                                                                                                                             | 24 |
| 1.3.1 Produtividade de grãos.....                                                                                                                               | 31 |
| 1.4 DISCUSSÃO.....                                                                                                                                              | 33 |
| 1.4.1 Produtividade de grãos.....                                                                                                                               | 35 |
| 1.5 CONCLUSÕES.....                                                                                                                                             | 38 |
| REFERÊNCIAS.....                                                                                                                                                | 39 |
| CAPÍTULO 2 - CHANGES IN SOIL PHYSICAL PROPERTIES WITH TROPICAL CROPPING SYSTEMS UNDER LONG-TERM NO-TILL CONDITIONS.....                                         | 46 |
| RESUMO.....                                                                                                                                                     | 46 |
| ABSTRACT.....                                                                                                                                                   | 46 |
| 2.1 INTRODUÇÃO.....                                                                                                                                             | 47 |
| 2.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....                                                                                                                                    | 49 |
| 2.2.1 Caracterização da área.....                                                                                                                               | 49 |
| 2.2.2 Delineamento experimental e tratamentos.....                                                                                                              | 50 |
| 2.2.3 Instalação e condução do experimento.....                                                                                                                 | 50 |

|       |                                                                                                                                                        |    |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.4 | Produção e aplicação do sulfato de amônio enriquecido com 15N, amostragem do solo e das plantas de milho e do <i>Panicum maximum</i> cv. Tanzânia..... | 51 |
| 2.2.5 | Análises de dados.....                                                                                                                                 | 52 |
| 2.3   | RESULTADOS.....                                                                                                                                        | 54 |
| 2.3.1 | Nitrogênio residual no solo proveniente do fertilizante.....                                                                                           | 54 |
| 2.3.2 | Recuperação do nitrogênio proveniente do fertilizante pelo milho...                                                                                    | 56 |
| 2.3.3 | Nitrogênio residual recuperado.....                                                                                                                    | 57 |
| 2.4   | DISCUSSÃO.....                                                                                                                                         | 59 |
| 2.4.1 | Nitrogênio residual no solo proveniente do fertilizante.....                                                                                           | 59 |
| 2.4.2 | Recuperação do nitrogênio proveniente do fertilizante pelo milho...                                                                                    | 60 |
| 2.4.3 | Recuperação total do nitrogênio proveniente do fertilizante.....                                                                                       | 61 |
| 2.5   | CONCLUSÕES.....                                                                                                                                        | 63 |
|       | REFERÊNCIAS.....                                                                                                                                       | 64 |
|       | CAPÍTULO 3 - USO E EFICIÊNCIA DE CARBONO APÓS A APLICAÇÃO DE CALCÁRIO E GESSO EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO.....                                        | 68 |
|       | RESUMO.....                                                                                                                                            | 68 |
|       | ABSTRACT.....                                                                                                                                          | 69 |
| 3.1   | INTRODUÇÃO.....                                                                                                                                        | 69 |
| 3.2   | MATERIAIS E MÉTODOS.....                                                                                                                               | 71 |
| 3.2.1 | Características do local do solo coletado.....                                                                                                         | 71 |
| 3.2.2 | Experimento 1 - Eficiência de uso do C .....                                                                                                           | 72 |
| 3.2.3 | Experimento 2. - Controles estequiométricos na decomposição de carbono.....                                                                            | 73 |
| 3.2.4 | Análises estatísticas.....                                                                                                                             | 74 |
| 3.3   | RESULTADOS.....                                                                                                                                        | 74 |
| 3.4   | DISCUSSÃO.....                                                                                                                                         | 78 |
| 3.5   | CONCLUSÕES.....                                                                                                                                        | 81 |
|       | REFERÊNCIAS.....                                                                                                                                       | 82 |
|       | CONSIDERAÇÕES FINAIS.....                                                                                                                              | 87 |
|       | REFERÊNCIAS.....                                                                                                                                       | 89 |
|       | ANEXO A.....                                                                                                                                           | 91 |

## INTRODUÇÃO GERAL

Os solos ácidos apresentam níveis tóxicos de  $\text{Al}^{3+}$  e baixos teores de cátions básicos e pH, tornando usual a realização da correção da acidez do solo nas áreas agrícolas do Brasil (CAIRES; BANZATTO; FONSECA, 2000; FAGERIA et al., 2013), sendo fundamental para o desenvolvimento do sistema radicular e maior exploração do solo, além de melhorar a absorção de água e nutrientes (ROSOLEM et al., 2017).

A correção da acidez do solo com aplicação de calcário em sistema semeadura direta (SSD) sem incorporação, em geral é lenta nas camadas do subsolo (COSTA; ROSOLEM, 2007). Entretanto, pode-se alcançar alteração de forma mais imediata na acidez no subsolo após a aplicação de gesso, por proporcionar elevação dos níveis de cátions em subsuperfície, além de reduzir a toxicidade de alumínio e favorecer o desenvolvimento radicular em profundidade (ROSOLEM et al., 1998).

No SSD a aplicação do calcário em superfície, evitando a mobilização do solo, resulta em uma superdose nos primeiros centímetros do perfil (ROSOLEM; FOLONI; OLIVEIRA, 2003), exatamente na camada de maior densidade de raízes e na camada onde se aplica o fertilizante nitrogenado. Assim, nesta região do solo, o pH é relativamente alto em razão da calagem e da presença de palha em superfície, o que favorece a nitrificação. A planta, por sua vez, dependendo da forma do nitrogênio (N), pode colaborar para a acidificação ou para a elevação do pH. Portanto a disponibilidade de N para as plantas pode ser influenciada pelas condições de acidez do solo. Além de interferir nos processos de decomposição e mineralização da matéria orgânica (SILVA et al., 1999), o pH do solo interfere nas reações de nitrificação (SILVA; DO VALE, 2000), promovendo um incremento na mineralização do N.

Em Latossolos do sul de Minas Gerais, Silva; Vale; Guilherme (1994) verificaram que a calagem elevou a intensidade de nitrificação no solo, e consequentemente a disponibilidade de nitrato. Com aplicação de fertilizantes amoniacais nos solos corrigidos, grande quantidade é reduzida a  $\text{NO}_3^-$  e a acidez do subsolo pode ser afetada por meio da lixiviação de  $\text{NO}_3^-$ , resultando na movimentação de  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  o que pode auxiliar na dissolução do calcário e gesso para o subsolo (CAIRES, 2013).

O efeito da calagem associada aos fertilizantes nitrogenados aplicados na superfície e o movimento do calcário em profundidade foram demonstrados em diferentes sistemas (ABRUNA et al., 1964; ADAMS et al., 1967), mas ainda tem sido

pouco estudado no Brasil, principalmente em sistemas de produção utilizando o milho consorciado com gramíneas forrageiras. Existem observações em solos ácidos do Brasil de que a calagem incorporada aumenta o  $\text{NO}_3^-$  na camada arável do solo, mas não sua lixiviação. O sulfato de amônio intensifica a movimentação descendente de  $\text{Ca}^{2+}$  abaixo de 20 cm de profundidade no solo somente quando o calcário é incorporado (FOLONI; ROSOLEM, 2008).

Ao elevar o pH do solo, a calagem também eleva a atividade microbiana (EKENLER; TABATABAI, 2003; MIJANGOS et al., 2006), o que acarreta, em um curto período, na decomposição mais acelerada da matéria orgânica do solo (MOS) (YAO et al., 2009). Porém, esse efeito em longo prazo no SSD, em relação à calagem, pode ser diferente em razão dos efeitos ocasionados pelo não revolvimento do solo, o que promove maior proteção da MOS (CAIRES et al., 2006).

A hipótese é que o milho cultivado em SSD, em consórcio com capim colônia cv. Tanzânia (*Megathyrsus maximus*), em áreas corrigidas por meio da aplicação de calcário e gesso, apresenta maior desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, maior eficiência no aproveitamento do N residual após a cultura da soja. Além disso, o milho consorciado com Tanzânia, através do maior aporte de matéria seca com adubação nitrogenada, pode afetar positivamente a soja cultivada em seguida.

Assim, os objetivos do presente trabalho foram avaliar a aplicação de calcário isolado ou associado ao gesso e o fornecimento de N, o efeito no desenvolvimento do sistema radicular bem como na produtividade de grãos das culturas em SSD, além da eficiência da adubação nitrogenada em milho consorciado com Tanzânia na segunda safra, em sucessão a cultura da soja; verificar a recuperação do N do fertilizante no milho segunda safra em consórcio com capim cv. Tanzânia, bem como a abundância de N proveniente do fertilizante nas plantas e no perfil do solo; avaliar o uso e eficiência do C através da evolução do  $\text{CO}_2$  liberado da respiração microbiana.

## CAPÍTULO 1

### CORREÇÃO DA ACIDEZ DO SOLO E APLICAÇÃO DE N AO MILHO EM UM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO MELHORA O CRESCIMENTO E A PRODUTIVIDADE DA RAIZ DA SOJA<sup>1</sup>

#### RESUMO

Grande parte do milho brasileiro é cultivado em segunda safra após a soja. A correção da acidez e a aplicação de gesso aumentam o crescimento radicular e a eficiência do uso de nitrogênio no milho, que tem um sistema radicular mais agressivo do que a soja. No entanto, não há informações sobre como esses fatores interagem nos sistemas de produção e como a soja responde a isso. Nossa hipótese é que a aplicação de N ao milho poderia resultar em maior crescimento radicular e produtividade da soja, além do efeito de correção da acidez do subsolo. O objetivo do estudo foi avaliar o crescimento radicular da soja e a produtividade de grãos em função da correção da acidez do solo com calcário e gesso, e aplicação de doses de N no milho consorciado com capim colonião cv. Tanzânia (*Megathyrsus maximus*). A aplicação de calcário resultou em maior crescimento radicular para ambas as culturas; no entanto, o calcário associado ao gesso resultou em um crescimento radicular ainda mais pronunciado. A produtividade de grãos de milho foi maior quando o gesso foi associado ao calcário; entretanto, a correção da acidez do solo favoreceu a produtividade de grãos de soja apenas em condições de restrição hídrica. A adubação com nitrogênio aumenta a produtividade de grãos de milho, com aumento mais expressivo com a aplicação das doses 160 e 240 kg ha<sup>-1</sup>, e a produtividade de grãos de soja acumulada é afetada positivamente quando as maiores doses de N são aplicadas ao milho.

**Palavras-chave:** gesso; calcário; capim colonião; sistemas de consórcio; perda de Ca no solo.

---

<sup>1</sup> Capítulo redigido de acordo com as normas do periódico **Field Crops**

## ABSTRACT

The majority of the Brazilian maize is grown as a relay crop after soybean. Correcting acidity and applying gypsum increases root growth and nitrogen use efficiency in maize, which has a more aggressive root system than soybean. However, there is no information on how these factors interact in production systems and how soybean responds to this. Our hypothesis is that the application of N to maize could result in greater root growth and soybean yield, in addition to the effect of correcting subsoil acidity. The objective of the study was to evaluate soybean root growth and grain yield as a function of soil acidity correction with lime and gypsum, and application of N rates in maize intercropped with grass cv. Tanzania (*Megathyrsus maximus*). Lime application resulted in greater root growth for both crops; however, lime associated with gypsum resulted in even more pronounced root growth. Maize grain yield was higher when gypsum was associated with lime; however, soil acidity correction favored soybean grain yield only under water restriction conditions. Nitrogen fertilization increases maize grain yield, with a more expressive increase with the application of doses of 160 and 240 kg ha<sup>-1</sup>, and the accumulated soybean grain yield is positively affected when higher doses of N are applied to maize.

**Keywords:** gypsum; lime; *Megathyrsus maximus*; intercropped system; Ca loss in the soil.

## 1.1 INTRODUÇÃO

A acidez do solo afeta aproximadamente 30% da área potencial de produção de alimentos do mundo (Jones and Ryan, 2017) porque os solos tropicais ácidos geralmente apresentam deficiência de cálcio (Ca) e toxicidade de alumínio (Al), que inibem o crescimento das raízes, afetando a produção agrícola (Ritchey et al., 1995; Rosolem et al., 2017). A calagem superficial tem sido eficaz na correção da acidez da camada superior do solo; no entanto, corrigir a acidez do subsolo usando apenas calcário é um grande desafio devido à sua baixa solubilidade (Caires et al., 2006). O gesso agrícola, sulfato de cálcio hidratado (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O), tem sido utilizado em solos ácidos associado ao calcário como alternativa para aumentar os teores de cálcio (Ca) e aliviar a toxicidade do Al no subsolo, devido a sua alta mobilidade no perfil do solo. O gesso altera a solução do solo, aumentando os teores de Ca<sup>2+</sup> e SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>s (Raij, 1992) que podem ser lixiviados. Alguns estudos em sistema de semeadura direta mostram

que o calcário afeta o subsolo mesmo quando espalhado na superfície do solo; no entanto, isso leva tempo (Caires et al., 2011; Costa e Rosolem, 2007), enquanto que o alívio da acidez do subsolo é muito rápido com a aplicação de gesso, pois aumenta os cátions e reduz a toxicidade do alumínio, favorecendo o crescimento das raízes em profundidade (Pivetta et al., 2019; Raij, 2008). Um melhor desenvolvimento do sistema radicular resulta em maior exploração do solo (Galdos et al., 2020; Maeght et al., 2013) e desempenha um papel crucial na aquisição de água e eficiência de uso de nitrogênio (Jing et al., 2010; Shu et al., 2007; Williamson et al., 2001) evitando a lixiviação de N (Rosolem et al., 2017). Além disso, foi demonstrado que a adubação com N melhora a ramificação e o crescimento da raiz do milho (Souza Junior et al., 2019), o que pode aumentar ainda mais o crescimento da raiz no perfil do solo.

O milho cultivado em segunda safra após a soja representou quase 77% da área total de milho em 2021 no Brasil (CONAB, 2021). Em muitos anos, esse período é caracterizado pela escassez de chuvas em regiões de clima tropical, com diminuição da produtividade das lavouras devido ao estresse hídrico. Portanto, melhores condições de subsolo para permitir o estabelecimento de um sistema radicular profundo são fundamentais para o sucesso da cultura (Farina et al., 2000; Sumner, 1995). Consequentemente, maiores respostas da cultura ao gesso foram relatadas em estações de cultivo com deficiência de água (Nora et al., 2017; Tiecher et al., 2018). Além disso, um sistema radicular mais profundo resulta em aumento da absorção de N pelas plantas de milho e menos perda de N por lixiviação (Rosolem et al., 2017).

Gramíneas forrageiras com sistemas radiculares vigorosos têm sido cultivadas como culturas de cobertura ou em associação/consórcio com milho ou soja em sistemas integrados em regiões subtropicais e tropicais, e capim colonião tem se mostrado melhor que Braquiária quando cultivado em consórcio com milho, principalmente sob adubação com N (Rocha et al., 2020). Não há recomendação confiável de adubação com N para sistemas de consórcio milho/forragem no Brasil, principalmente quando cultivado após a soja, e presume-se que parte do N atmosférico fixado pela soja estará disponível para o milho. Portanto, considerando o menor potencial de rendimento do milho neste sistema, e a contribuição da soja, a taxa ótima de N seria menor do que quando o milho é cultivado como cultura única.

Apesar da crença geral de que a aplicação do N mineral é desnecessária para soja inoculada, uma vez que o nutriente pode ser totalmente fornecido pela

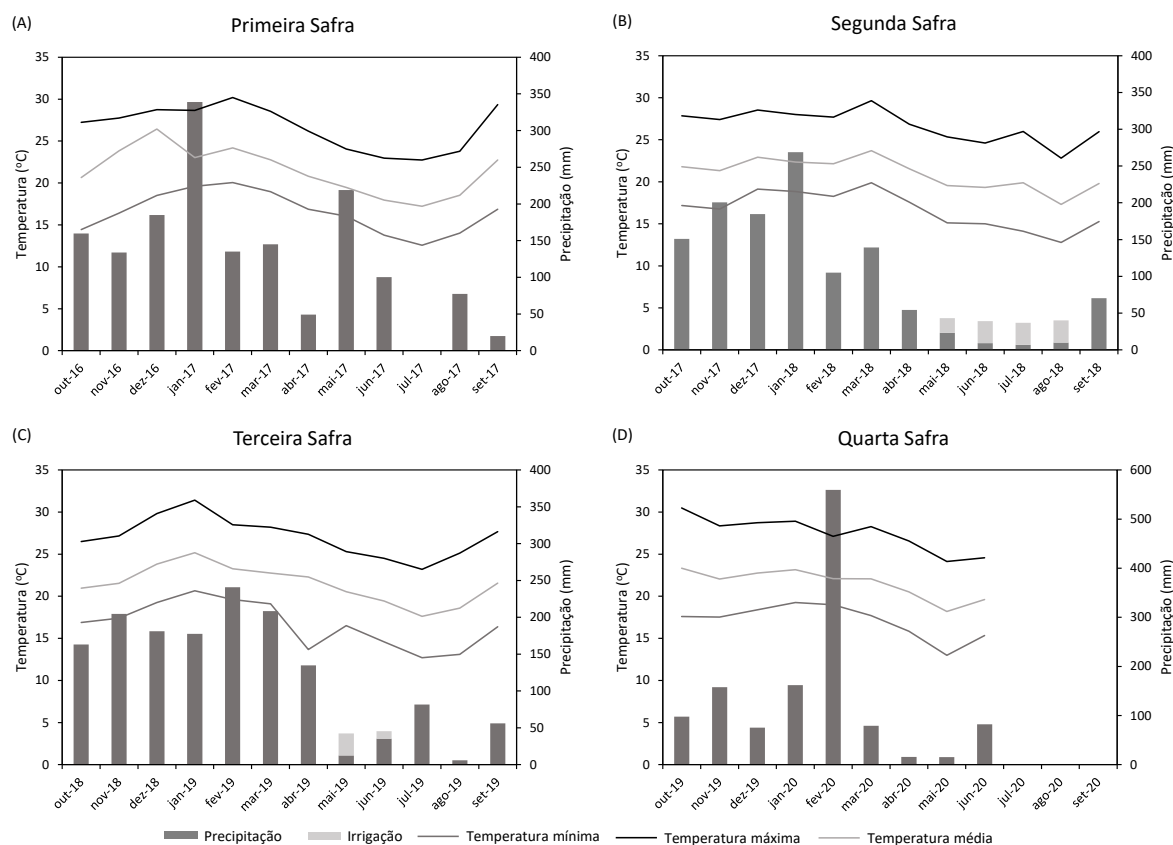
fixação biológica de N ou pelo solo (Hungria et al., 2006), Salvagiotti et al. (2008) relataram que a soja de alto rendimento requer grandes quantidades de N para sustentar a biomassa acima do solo e sementes com alto teor de proteína. Segundo os autores, o fornecimento de N sem diminuir a atividade do nódulo pode aumentar a produtividade da cultura, e opções promissoras incluem o fornecimento de N antes da semeadura ou em profundidades abaixo da zona de nodulação, ou seja, aumentando a disponibilidade de N no perfil do solo.

Portanto, a hipótese é que o alívio da acidez do solo com calcário e gesso em um sistema de produção com milho cultivado em consórcio com capim colonião como segunda safra após a soja aumentará a profundidade de crescimento das raízes, resultando em altos rendimentos, enquanto um melhor crescimento das raízes das gramíneas junto com a adubação com N e maior produção de matéria seca podem melhorar o crescimento e a produtividade da raiz da soja. O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos do alívio da acidez do solo com uso de calcário isolado ou associado a gesso e adubação com N no crescimento radicular e na produtividade de grãos das culturas em sistema de plantio direto.

## **1.2 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **1.2.1 Descrição da área experimental**

O experimento foi realizado em Botucatu, Estado de São Paulo, Brasil, no período de 2017 a 2020, em um Latossolo Vermelho distrófico (USDA, 2014), localizado a 48°25'38.84" W, 22°49'50.90" S, 790 m acima do nível do mar. O clima é Cwa, tropical com inverno seco e quente, verão chuvoso, de acordo com a classificação de Köppen. A precipitação e a temperatura foram registradas durante o experimento em uma estação meteorológica localizada a 300 m da área experimental (Figura 1).

**Figura 1 - Precipitação e temperaturas mínimas, médias e máximas**

Primeira (A), segunda (B), terceira (C) e quarta (D) safras, 2016/2017, 2017/2018, 2018/2019 e 2019/2020, respectivamente.

Antes do experimento a área estava em pousio, com uma mistura de gramíneas e algumas folhas largas. Em setembro de 2016, o solo foi amostrado para análises de caracterização química (Raij et al., 2001) e os resultados estão apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 - Características químicas do solo em quatro profundidades na área experimental antes de iniciar o experimento, Agosto de 2016**

| Profundidade<br>m | pH <sup>#</sup><br>CaCl <sub>2</sub> | MO <sup>†</sup><br>g dm <sup>-3</sup> | P<br>mg dm <sup>-3</sup> | S  | K   | Ca | Mg | Al | H+Al | CTC <sup>‡</sup> | SB <sup>§</sup> |
|-------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|----|-----|----|----|----|------|------------------|-----------------|
|                   |                                      |                                       |                          |    |     |    |    |    |      |                  |                 |
| 0.00 – 0.10       | 4.4                                  | 18                                    | 13                       | 5  | 2.1 | 12 | 12 | 9  | 52   | 78               | 32              |
| 0.10 – 0.20       | 4.3                                  | 14                                    | 10                       | 5  | 1.1 | 9  | 8  | 9  | 48   | 66               | 27              |
| 0.20 – 0.40       | 4.1                                  | 11                                    | 6                        | 22 | 0.5 | 4  | 4  | 12 | 55   | 63               | 13              |
| 0.40 – 0.60       | 4.0                                  | 11                                    | 6                        | 21 | 0.4 | 3  | 4  | 20 | 90   | 97               | 8               |

<sup>#</sup> pH do solo medido em solução de cloreto de cálcio.

<sup>†</sup> Matéria Orgânica.

<sup>‡</sup> Capacidade de troca catiônica.

<sup>§</sup> Saturação por Bases.

### 1.2.2 Delineamento experimental e tratamentos

Os tratamentos foram calcário, calcário + gesso, e uma testemunha, e 0, 80, 160 e 240 kg ha<sup>-1</sup> de N aplicado no milho arranjado em esquema fatorial 3 x 4 em blocos ao acaso com quatro repetições. A dose de calcário foi calculada para aumentar a saturação de bases do solo para 70% e a dose de gesso foi calculada usando o teor médio de argila do solo de 0 a 40 cm multiplicado por seis. As doses correspondentes a 2,92 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário e 2,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso foram aplicadas na superfície do solo. O gesso foi aplicado nas respectivas parcelas logo após a aplicação do calcário. Em setembro de 2017, o calcário e o gesso foram reaplicados. As quatro doses de N foram aplicadas anualmente ao milho consorciado com capim colonião cv. Tanzânia (*Megathyrsus maximus*).

### 1.2.3 Condução do experimento

As parcelas consistiam de 10 linhas de soja ou milho com distância de 0,45 m entre linhas e com 10 m de comprimento. A vegetação espontânea foi dessecada com glifosato (2,30 Kg<sup>-1</sup> i.a.). A soja, cv. TMG 7062 IPRO (Tropical Melhoramento & Genética), foi semeada todos os anos em novembro, sobre os resíduos dessecados das espécies espontâneas anteriores ou milho/capim colonião, que foi dessecado duas semanas antes do plantio de soja a cada ano. As sementes foram inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum*. O fósforo (P) e potássio (K) foram aplicados no sulco de plantio nas doses 26 kg ha<sup>-1</sup> e 50 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, em cada ano, como superfosfato triplo e cloreto de potássio. A soja foi colhida 125, 145, 136 e 128 dias após emergência, nas safras 2017, 2018, 2019 e 2020, respectivamente, e o rendimento de grãos foi corrigido para 13% de umidade.

O milho, híbrido Dow AgroSciences 2B 587 RRBTPW, foi semeado todos os anos após a colheita da soja, com uma população de 55.000 plantas ha<sup>-1</sup>, consorciada com capim colonião usando 10 kg ha<sup>-1</sup> de sementes vivas. As sementes da forrageira foram misturadas ao fertilizante fosfatado e aplicadas a 0,08 m de profundidade. Cada parcela recebeu 35 kg ha<sup>-1</sup> de P como superfosfato triplo. O cloreto de potássio foi utilizado para fornecer K aplicando 82 kg ha<sup>-1</sup> na semeadura e mais 41 kg ha<sup>-1</sup> no estágio fenológico V4, com quatro folhas completamente desenvolvidas, e o sulfato de amônio foi aplicado para fornecer N utilizando 30 kg ha<sup>-1</sup> na semeadura, e completados com 50, 130, 210 kg ha<sup>-1</sup>, em faixas a 0,1 m ao lado da linha de semeadura aos respectivos tratamentos no estágio V4. O milho foi colhido aos 155,

122 e 132 dias após emergência das plantas nas safras 2017, 2018, e 2019, respectivamente. A umidade dos grãos foi corrigida para 13%.

#### **1.2.4 Amostragem de raiz e determinação de matéria seca**

As amostras de raízes foram coletadas nas profundidades 0 a 0,1, 0,1 a 0,2, 0,2 a 0,4, 0,4 a 0,6 m, usando uma sonda de aço com 0,075 m de diâmetro interno. Cinco subamostras de raízes foram coletadas aleatoriamente por parcela para soja e milho, na linha e entrelinha de semeadura. Para soja, as amostragens foram realizadas no estádio R2 – pleno florescimento (Fehr et al., 1971), em 24 de janeiro de 2017, 8 de janeiro de 2018, 15 de janeiro de 2019 e 13 de janeiro de 2020. Para o milho consorciado ao capim colômbio, as amostras foram coletadas em 22 de junho de 2017, 29 de julho de 2018 e 7 de julho de 2019. As raízes foram cuidadosamente separadas do solo e outros resíduos lavando sob um fluxo de água corrente em uma peneira de malha 0,5 mm. Em seguida, as raízes foram imersas em uma solução de álcool etílico a 30%, acondicionadas em potes plásticos com tampas e armazenadas sob refrigeração a 2 °C. As raízes foram digitalizadas usando um scanner óptico (Scanjet 4C/T, HP) com a resolução de 250 dpi e analisadas com “Win Rhizo” versão 3,8-b (Regent Instrument Inc., Quebec, Canadá), com base em Tennant (1975). Em seguida, as amostras de raiz foram secas em um forno de ar forçado a 60 °C por 48 horas para determinar a matéria seca.

#### **1.2.5 Amostragem de solo e análises químicas**

Amostras de solo foram coletadas aos 12, 24 e 36 meses após a primeira aplicação de calcário, em setembro de 2017, 2018 e 2019, respectivamente, até 0,6 m de profundidade. Quatro subamostras foram coletadas aleatoriamente e combinadas em uma amostra composta e o Ca trocável foi extraído com resina de troca iônica (Raij et al., 2001).

#### **1.2.6 Análises estatísticas**

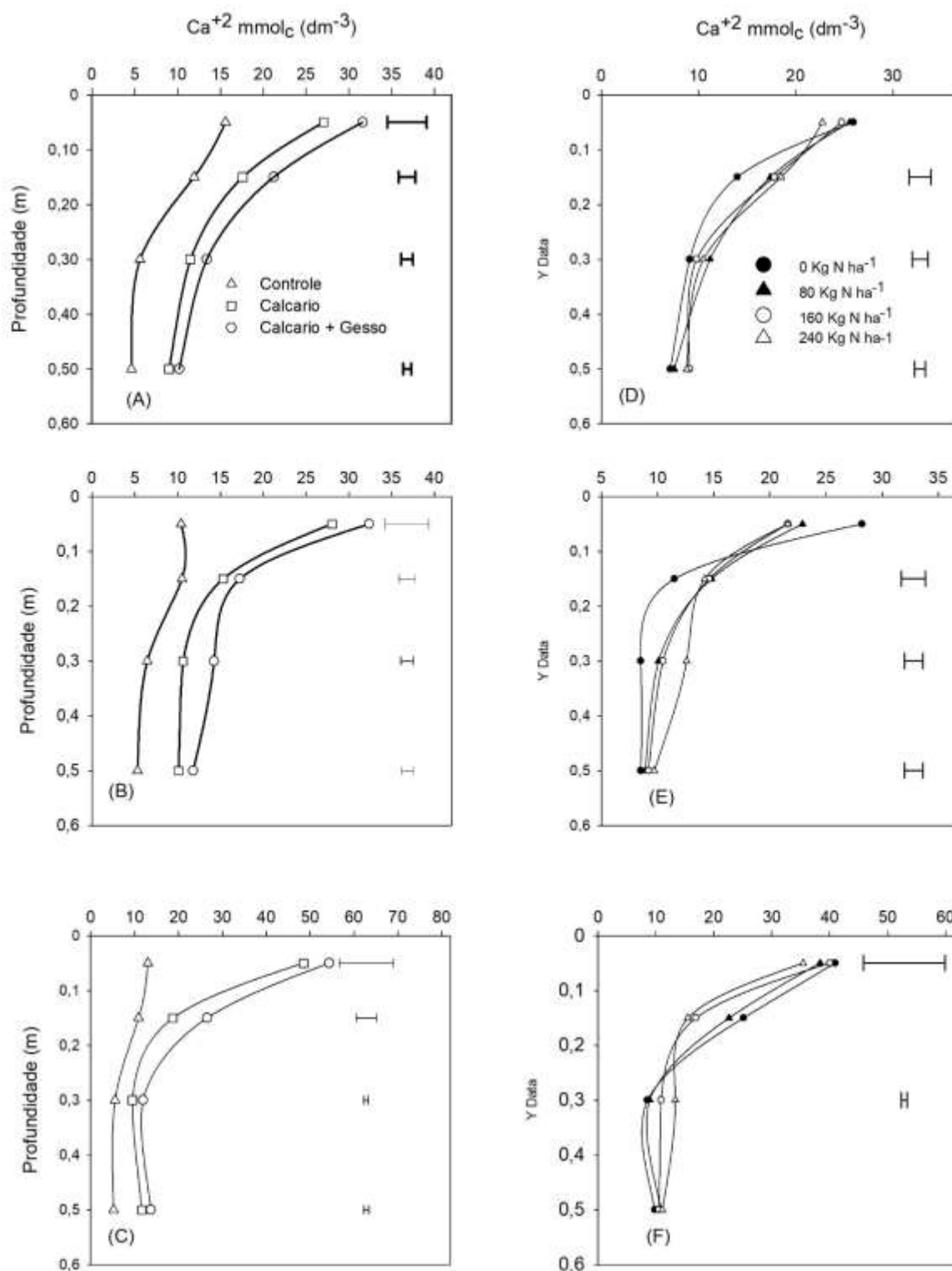
Os dados de cada ano e de cada camada de solo foram analisados separadamente. Após os testes de normalidade e homocedasticidade, os dados de densidade de comprimento radicular, massa de matéria seca radicular e rendimento de grãos foram submetidos à análise de variância (ANAVA). Os blocos foram considerados efeitos aleatórios e, para a primeira safra de soja, foi utilizada a ANAVA

de um fator. Para os anos restantes, uma ANAVA fatorial foi usada com base em um delineamento de blocos casualizados completos com dois fatores (corretivo, taxas de nitrogênio). Quando o resultado da ANAVA foi significativo, o teste t modificado diferença mínima significativa protegida de Fisher (LSD) em  $p \leq 0,05$ ] foi usado para separar as médias. Foi utilizado o software SAS, versão 9.4. Os coeficientes de correlação de Pearson entre as densidades de comprimento radicular de milho e soja foram determinados ( $p \leq 0.05$ ).

### 1.3 RESULTADOS

Curiosamente, o  $\text{Ca}^{2+}$  do solo aumentou em função da calagem na segunda, terceira e quarta safras de cultivo até 0,60-m de profundidade (Figura 2. A, B e C). Porém, quando o gesso foi associado ao calcário, as concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  foram maiores no perfil do solo. A aplicação de nitrogênio aumentou ainda mais a percolação de  $\text{Ca}^{2+}$  através do perfil do solo para as doses acima de  $160 \text{ kg ha}^{-1}$ , mas na quarta safra, de modo geral não houve efeito significativo da adubação de N no  $\text{Ca}^{2+}$  do solo (Figura 2. F).

**Figura 2 - Teor de cálcio (Ca) no solo**

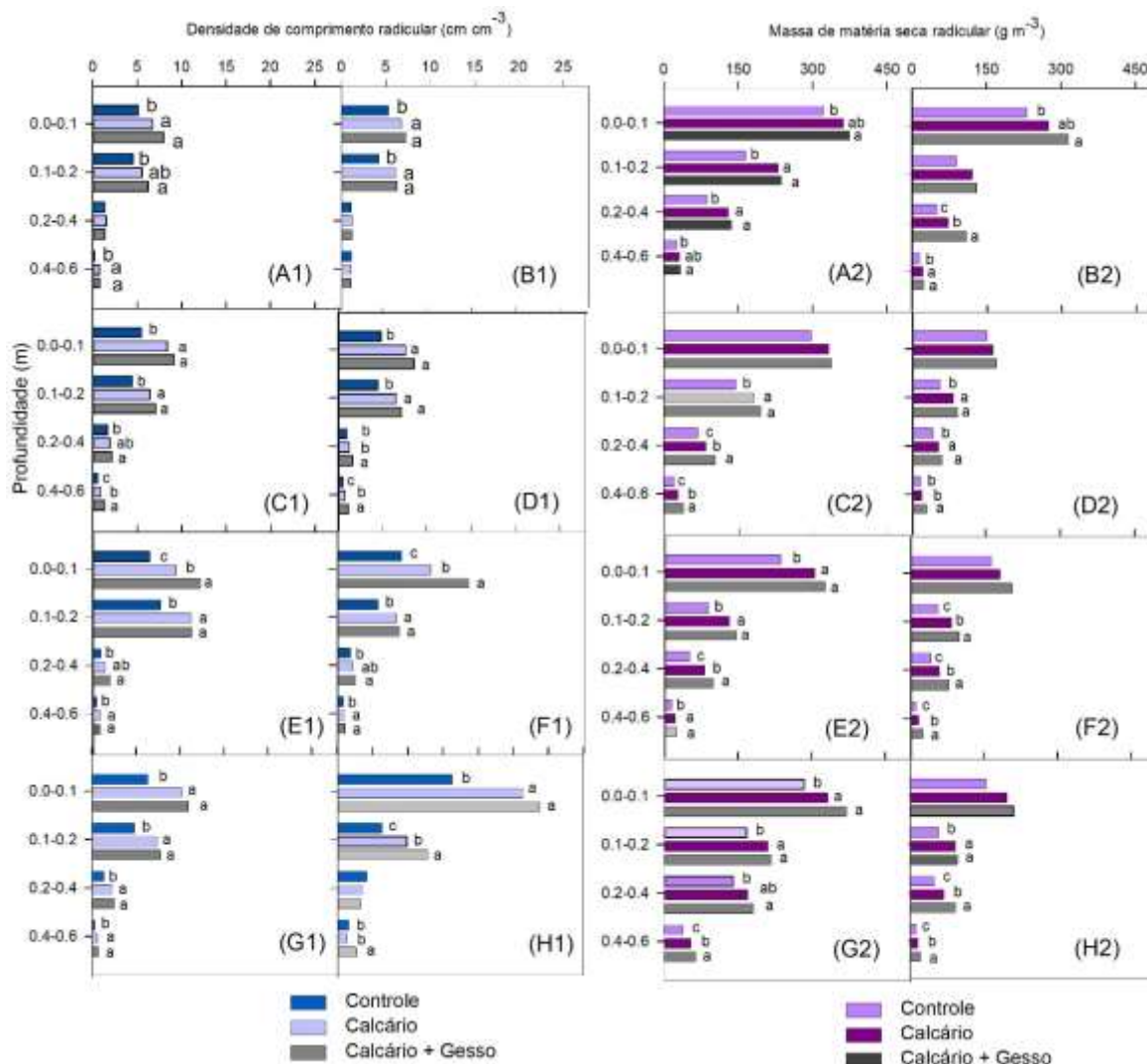


Em função da aplicação de calcário e calcário + gesso nas safras 2017 (A), 2018 (B), 2019 (C) e doses de N nas safras 2017 (D), 2018 (E), 2019 (F)

Não houve interações significativas de correção da acidez do solo e doses de N para densidade de comprimento radicular (DCR), massa de matéria seca

radicular (MMSR), níveis de  $\text{Ca}^{2+}$  no solo e produtividade de grãos para nenhuma das culturas e em nenhuma das safras avaliadas (Figura 3).

**Figura 3 - Densidade de comprimento radicular e massa de matéria seca radicular da soja em função da aplicação de calcário e gesso**



Densidade de comprimento radicular nas linhas de semeadura, safras 2016/2017 (A1), 2017/2018 (C1), 2018/2019 (E1), 2019/2020 (G1) e entrelinhas, safras 2016/2017 (B1), 2017/2018 (D1), 2018/2019 (F1), 2019/2020 (H1), e massa de matéria seca radicular nas linhas, safras 2016/2017 (A2), 2017/2018 (C2), 2018/2019 (E2), 2019/2020 (G2) e entrelinhas, safras 2016/2017 (B2), 2017/2018 (D2), 2018/2019 (F2), 2019/2020 (H2)

Nas camadas superficiais do solo, o DCR foi em geral maior, tanto na linha de semeadura de soja quanto na entrelinha, com calcário ou calcário associado ao gesso em comparação ao controle (Figura 3), exceto na primeira safra de cultivo (2016/2017), na camada 0,1 a 0,2 m (Figura 3. A1). Na terceira safra, o DCR foi maior quando o calcário foi associado ao gesso em comparação ao calcário isolado, tanto

na linha de semeadura de soja quanto na entrelinha, na camada 0 a 0,1 m (Figura 3. E1 e F1). Na quarta safra (2019/2020) também foi observado maior DCR na entrelinha da soja, na camada 0,1 a 0,2 m, quando foi aplicado calcário associado ao gesso, com valores superiores aos demais tratamentos (Figura 3. H1).

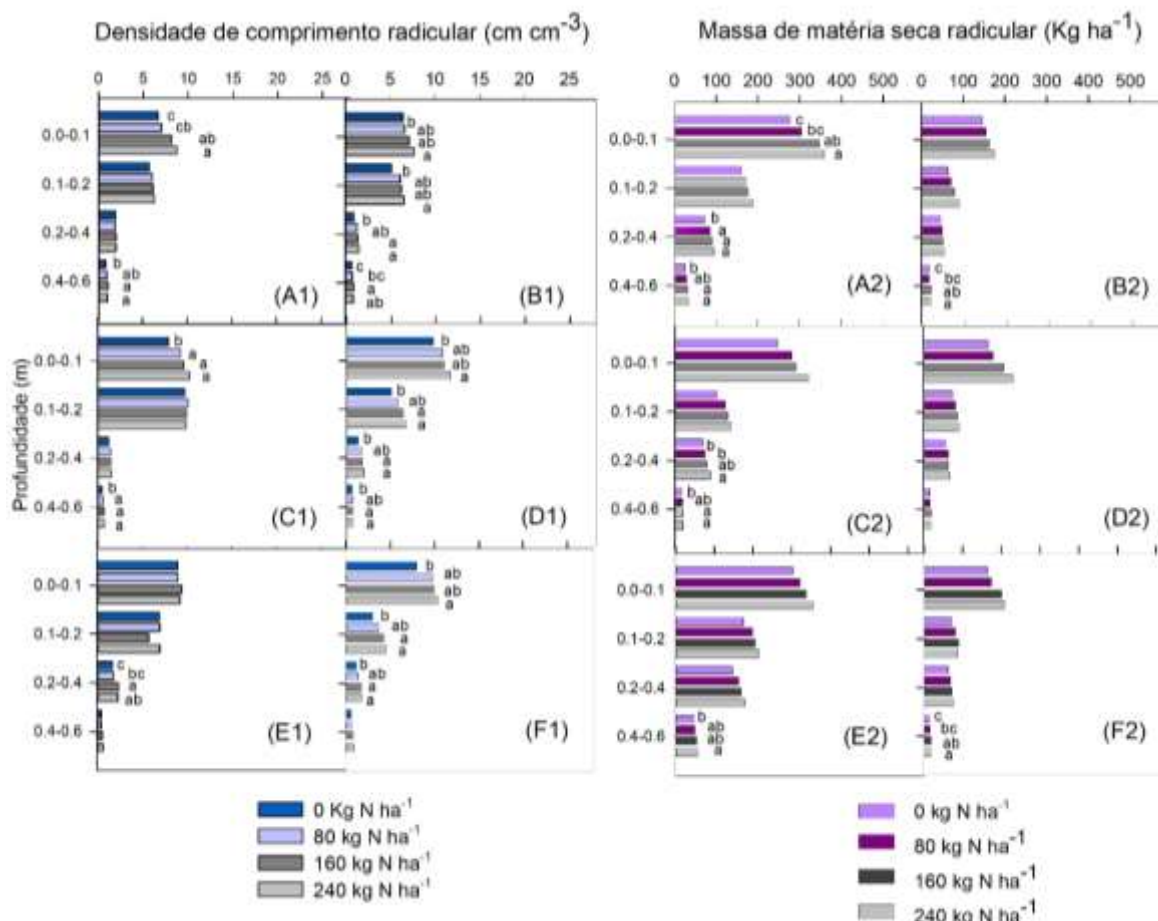
No subsolo (camada 0,4-0,6m), a aplicação de calcário associado ao gesso aumentou o DCR em relação ao controle, exceto para a entrelinha da soja na primeira safra (Figura 3. B1). Na terceira e quarta safras, não houve diferença entre calcário e calcário associado ao gesso na linha de semeadura de soja (Figura 3. E1 e G1). No entanto, na quarta safra, o DCR na entrelinha da soja foi maior quando o calcário foi associado ao gesso (Figura 3. H1).

A MMSR da soja foi maior em quase todo o perfil do solo após a correção da acidez (Figura 3). No entanto, na camada 0 a 0,1 m não houve diferença na linha de semeadura na segunda safra (2017-2018) e na entrelinha na segunda, terceira e quarta safras. Na primeira safra de cultivo, ao comparar o calcário com o controle, também não houve maior MMSR na camada 0 a 0,1 m (Figura 3. A2 e B2). Além disso, calcário mais gesso resultou em maior MMSR apenas na terceira safra de cultivo na camada 0,1 a 0,2 m.

O uso de calcário associado ao gesso resultou em maior MMSR da soja no subsolo em comparação ao controle (Figura 3), independente do local amostrado. Comparando calcário associado ao gesso com calcário, houve efeito no MMSR apenas na linha da planta na camada de 0,2 a 0,4 m, na segunda e terceira safras (Figura 3. C2 e E2) e na camada de 0,4 a 0,6 m profundidade, na segunda e quarta safras (Figura 3. C2 e G2). Porém, nas entrelinhas, o MMSR foi maior na camada de 0,2 a 0,4 m de profundidade, terceira e quarta safras (Figura 3. B2, F2, H2) e na camada de 0,4 a 0,6 m profundidade, na segunda, terceira e quarta safras (Figura 3. D2, F2, H2). Provavelmente, as diferenças encontradas nos resultados para linha e entrelinha de semeadura ocorreram devido ao déficit hídrico durante o experimento (Figura 1).

Quando o N foi aplicado ao milho nas doses 160 e 240 kg ha<sup>-1</sup>, a DCR da soja foi maior na linha da planta na camada superficial do solo de 0 a 0,1 m de profundidade e no subsolo (0,4-0,6 m de profundidade), na segunda safra de soja (Figura 4. A1).

**Figura 4 - Densidade de comprimento radicular e massa de matéria seca radicular da soja em função da aplicação de doses de N**



Densidade de comprimento radicular da soja nas linhas de semeadura, safras 2017/2018 (A1), 2018/2019 (C1), 2019/2020 (E1) e entrelinhas, safras 2017/2018 (B1), 2018/2019 (D1), 2019/2020 (F1), e massa de matéria seca radicular nas linhas, safras 2017/2018 (A2), 2018/2019 (C2), 2019/2020 (E2) e entrelinhas, safras 2017/2018 (B2), 2018/2019 (D2), 2019/2020 (F2)

Na entrelinha da soja, o DCR foi maior com 240 kg N ha<sup>-1</sup> até 0,2 m, e no subsolo o maior DCR da soja foi observado nos tratamentos que receberam 160 e 240 kg N ha<sup>-1</sup> (Figura 4. B1). Na terceira safra, uma maior DCR foi observado na camada superficial e na camada de subsolo de 0,4 a 0,6 m de profundidade, na linha da planta, quando a soja foi cultivada após o milho adubado com N, independentemente da dose aplicada (Figura 4. C1). Porém, na entrelinha da soja (Figura 4. D1), o DCR foi maior nos tratamentos que receberam 160 e 240 kg N ha<sup>-1</sup>, exceto na camada de 0 a 0,1 m, onde o aumento foi observado apenas com 240 kg ha<sup>-1</sup> em comparação ao controle.

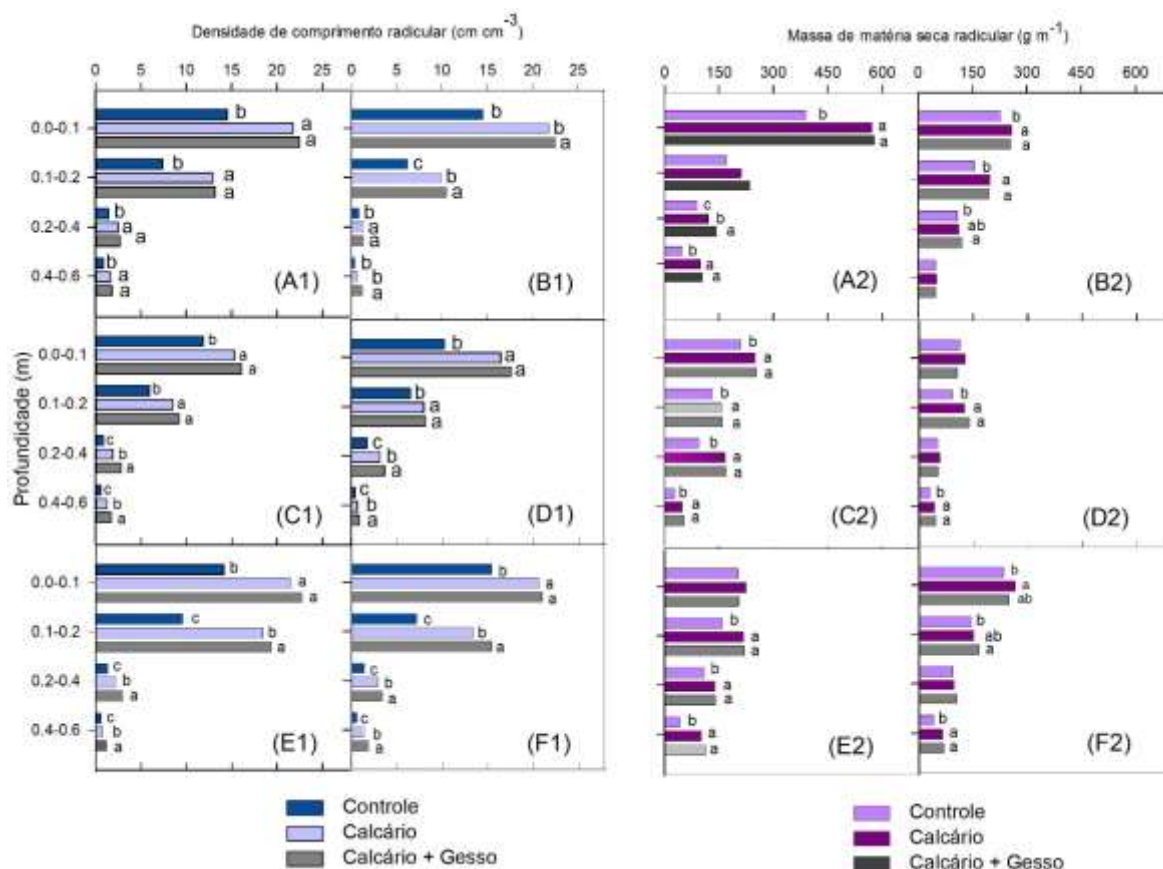
Na quarta safra, a DCR da soja aumentou na linha após aplicação de N até 160 kg ha<sup>-1</sup>, apenas na camada de 0,2 a 0,4 m de profundidade (Figura 4. E1).

A MMSR da soja foi maior na linha da planta com o uso de maiores doses de

N em comparação ao controle na camada mais superficial do solo (Figura 4. A2). No subsolo (camada de 0,2-0,4 m de profundidade), a MMSR foi maior nos tratamentos com N na segunda (Figura 4. A2) e na terceira (Figura 4. C2) safras em comparação ao controle. Na camada de 0,4 a 0,6 m, tanto na linha da planta quanto na entrelinha, as doses de 160 e 240 Kg N ha<sup>-1</sup> resultaram em maior MMSR em comparação ao tratamento sem N na segunda, terceira e quarta safras (Figura 4. A2, B2, C2, E2 e F2), exceto na entrelinha da terceira safra (Figura 4. D2).

O DCR no consórcio de milho/capim colômbio aumentou com a aplicação de calcário associado ou não ao gesso em todas as safras de cultivo, tanto na linha quanto na entrelinha das plantas, com algumas exceções (Figura 5).

**Figura 5 - Densidade de comprimento radicular e massa de matéria seca radicular do milho em função da aplicação de calcário e gesso**



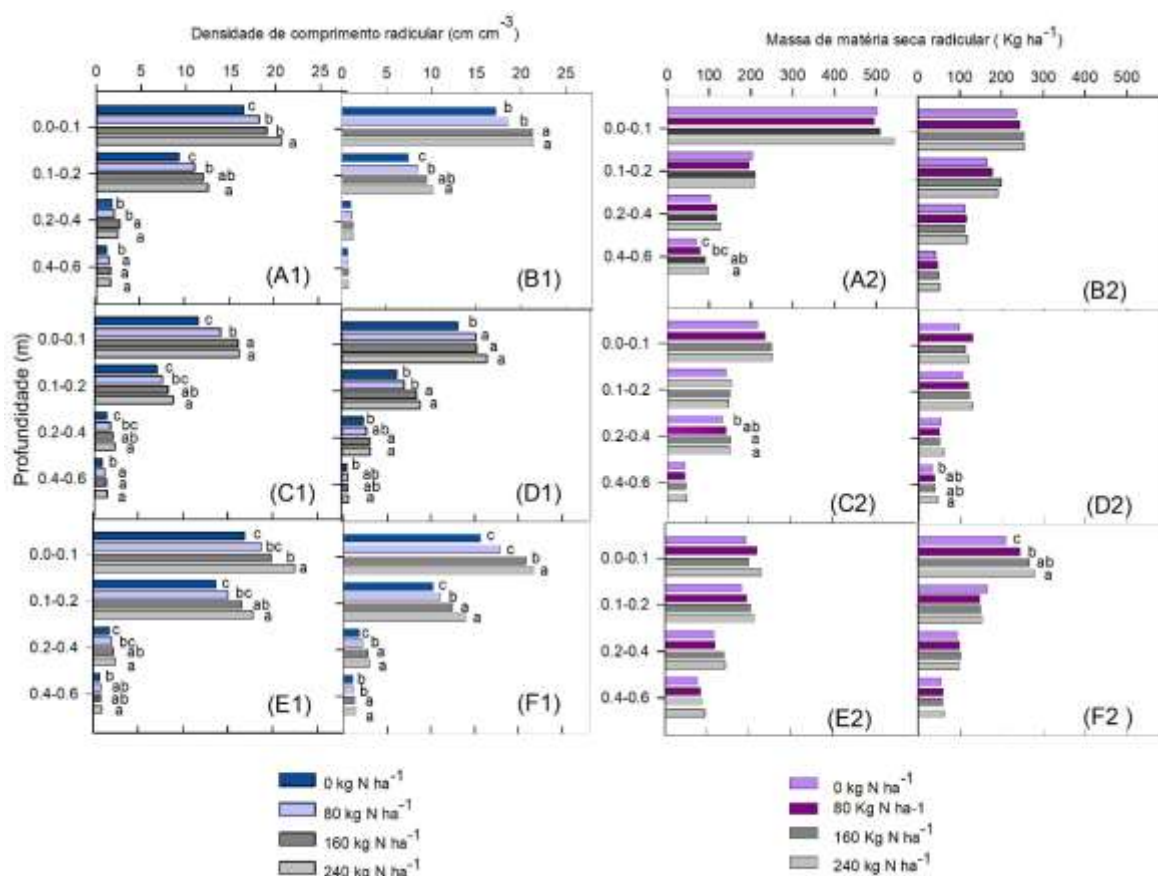
Densidade de comprimento radicular do milho consorciado com capim colômbio nas linhas de semeadura, safras 2017 (A1), 2018 (C1), 2019 (E1) e entrelinhas, safras 2017 (B1), 2018 (D1), 2019 (F1), e massa de matéria seca radicular nas linhas, safras 2017 (A2), 2018 (C2), 2019 (E2) e entrelinhas, safras 2017 (B2), 2018 (D2), 2019 (F2)

Na segunda e terceira safras, o DCR foi maior de 0,2 a 0,6 m (Figura 5. C1, D1,

E1 e F1) quando o calcário foi associado ao gesso. Em geral, foi maior com o uso de gesso no subsolo do que quando o calcário foi aplicado isoladamente. No entanto, geralmente não houve diferença no MMSR quando o calcário foi aplicado com ou sem gesso (Figura 5. A2, B2, C2, D2, E2 e F2).

A resposta de DCR ao N no consórcio milho/capim colômbio foi significativa até 240 kg ha<sup>-1</sup> em quase todas as camadas do solo (Figura 6).

**Figura 6 - Densidade de comprimento radicular e massa de matéria seca radicular do milho em função da aplicação de doses de N**



Densidade de comprimento radicular do milho consorciado com capim colômbio nas linhas de semeadura, safras 2017 (A1), 2018 (C1), 2019 (E1) e entrelinhas, safras 2017 (B1), 2018 (D1), 2019 (F1), e massa de matéria seca radicular nas linhas, safras 2017 (A2), 2018 (C2), 2019 (E2) e entrelinhas, safras 2017 (B2), 2018 (D2), 2019 (F2)

No entanto, a aplicação de N não aumentou a MMSR na linha de plantas (Figura 6), exceto para a camada 0,4 a 0,6 m na primeira safra de cultivo (Figura 6. A2) e camada 0,2 a 0,4 m na segunda safra (Figura 6. C2). Nas entrelinhas, um aumento no MMSR foi observado apenas na segunda safra de cultivo, na camada de 0,4 a 0,6 m, para a maior dose (Figura 6. D2) e na terceira safra, camada de 0 a 0,1

m, para todas as doses de N em comparação ao controle (Figura 6. F2).

É interessante observar que a DCR da soja foi correlacionada com a DCR do consórcio milho/capim colonião em todas as safras e profundidades do solo, com algumas exceções (Tabela 2).

**Tabela 2 - Coeficientes de correlação da densidade do comprimento radicular entre milho consorciado com capim colonião e soja (linhas e entrelinhas de plantas) nas safras 2017/2018, 2018/2019 e 2019/2020**

| Profundidade<br>(m) | 2017/2018 |                     | 2018/2019 |            | 2019/2020 |                      |
|---------------------|-----------|---------------------|-----------|------------|-----------|----------------------|
|                     | Linha     | Entrelinha          | Linha     | Entrelinha | Linha     | Entrelinha           |
| 0-0,10              | 0,641**   | 0,588**             | 0,733**   | 0,686**    | 0,493**   | 0,597**              |
| 0,10-0,20           | 0,481**   | 0,630**             | 0,319*    | 0,544**    | 0,407**   | 0,661**              |
| 0,20-0,40           | 0,292*    | 0,269 <sup>ns</sup> | 0,433**   | 0,302*     | 0,565**   | -0,066 <sup>ns</sup> |
| 0,40-0,60           | 0,699**   | 0,732**             | 0,735**   | 0,448**    | 0,387**   | 0,462**              |

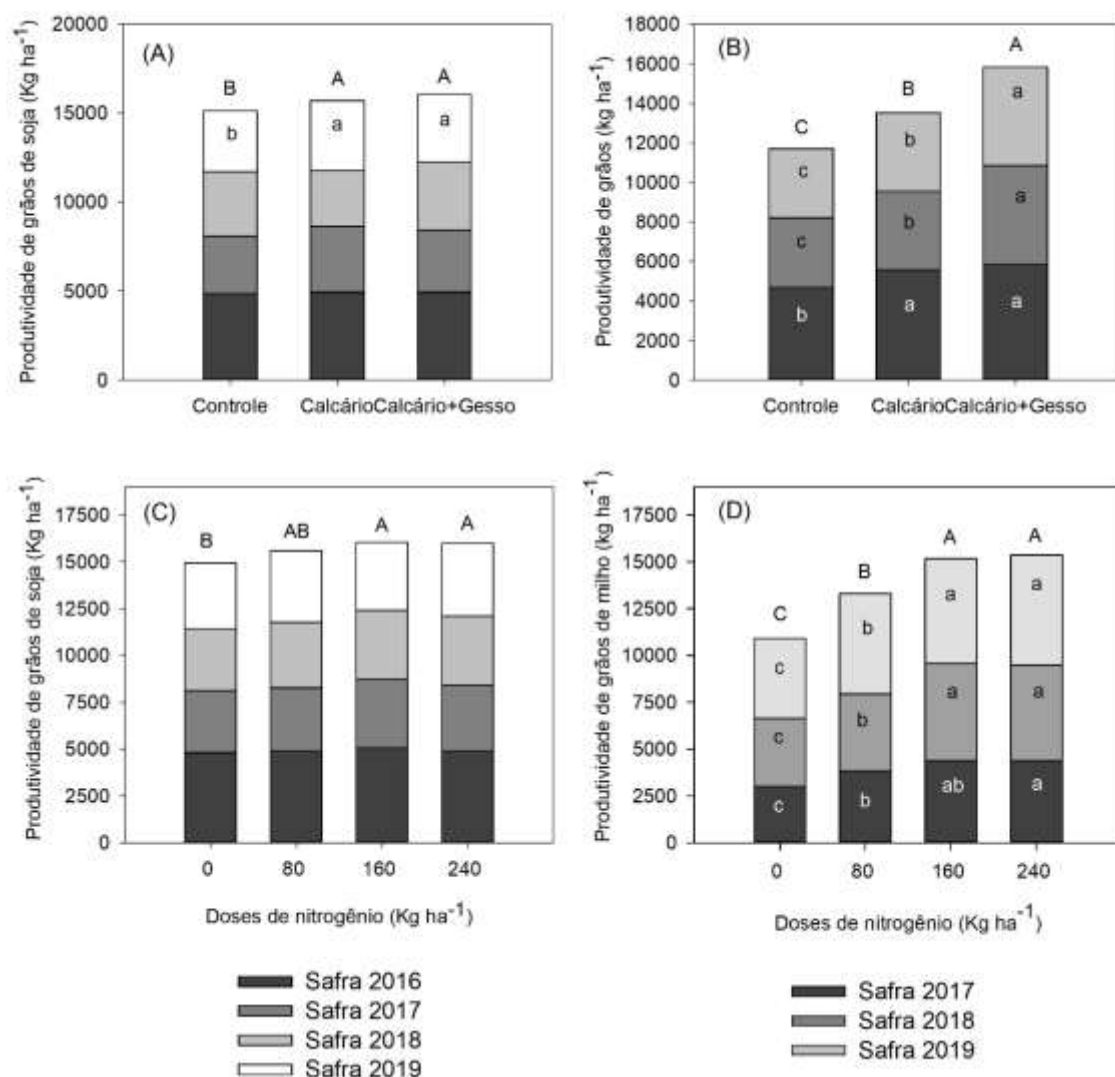
\* Significante P<0,05; \*\* Significante P<0,01

### 1.3.1 Produtividade de grãos

Quando os efeitos do calcário e gesso foram comparados ano a ano, não houve diferença no rendimento de grãos da soja até a terceira safra. No entanto, na quarta safra, o calcário aumentou o rendimento de grãos em 10,8% em comparação ao controle, e nenhum aumento foi observado com a sua associação ao gesso. Porém, ao se observar o rendimento de grãos da soja acumulado, a resposta ao calcário também foi 5,8% maior do que no controle (Figura 7. A).

Novamente, não houve efeito das doses de N no rendimento de grãos da soja quando analisado ano a ano. Porém, a produtividade de grãos acumulada foi maior com 160 e 240 kg ha<sup>-1</sup> aplicados ao consórcio milho/capim colonião em relação ao tratamento sem N (Figura 7. C). É importante ressaltar que na primeira safra de soja não foi considerado o efeito das doses de N, uma vez que o nitrogênio foi aplicado apenas na cultura do milho.

**Figura 7 - Produtividade de grãos de soja e milho em função da aplicação de calcário e gesso (A e B, respectivamente) e de doses de N (C e D, respectivamente).**



Médias seguidas pela mesma letra, minúscula para safras e maiúscula para acumulada, não são significativamente diferentes entre corretivos ou doses de N (LSD,  $p < 0,05$ ).

O milho foi mais responsivo do que a soja à calagem (Figura 7.B). No ano de 2017, a aplicação de calcário e calcário associado ao gesso resultou em aumento médio de 17,8% em relação ao controle. Porém, em 2018 a associação do gesso ao calcário resultou em maiores rendimentos de grãos de milho: 20,5% e 29,8% maior em relação ao calcário isolado e ao controle, respectivamente. Em 2019, novamente a adição de gesso aumentou o rendimento de grãos em 7,2% em comparação com

ao calcário e 20,2% em comparação ao controle, e esses aumentos foram refletidos nos rendimentos de grãos acumulados (Figura 7. B).

O Milho cultivado em consórcio com o capim colonião em segunda safra após a soja respondeu à adubação com N até 160 kg ha<sup>-1</sup> (Fig 7.B). Embora a dose de 80 kg N ha<sup>-1</sup> tenha proporcionado um aumento na produtividade de 2.988 kg ha<sup>-1</sup> em relação ao controle, quando foram aplicados 160 e 240 kg N ha<sup>-1</sup> houve um aumento de 5.104 kg ha<sup>-1</sup>, em média, na produtividade de grãos acumulada.

#### 1.4 DISCUSSÃO

O enriquecimento do perfil do solo com Ca após a aplicação do gesso era esperado; no entanto, isso raramente foi observado quando apenas calcário é aplicado (Caires et al., 2006; Rosolem et al., 2004). O gesso é considerado uma alternativa importante para melhorar a distribuição do sistema radicular no perfil do solo (Rosolem et al., 2017), e sua associação ao calcário é eficiente para melhorar o teor de Ca<sup>2+</sup> no solo.

Conforme nossa hipótese, a lixiviação de Ca para o subsolo foi melhorada pela adubação com N (Figura 2. D, E e F). Esse resultado pode ser explicado, pois quando o calcário é aplicado na superfície do solo, ocorre um aumento acentuado do pH próximo à superfície, e o N do fertilizante é transformado em nitrato. O nitrato é móvel no perfil do solo e tende a seguir o fluxo de infiltração da água, o que é facilitado no sistema de semeadura direta devido à menor evaporação e melhor estruturação do perfil do solo (Rosolem et al., 2003). Pearson et al. (1962) relataram que a adubação com nitrogênio aumentou o movimento de Ca<sup>2+</sup> ao longo do perfil do solo quando foram aplicados corretivos de acidez. Os autores atribuíram o efeito à formação de sais solúveis como o Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, sujeitos à lixiviação pelo movimento descendente da água. Além disso, o movimento de pequenas partículas de calcário (Caires et al., 2006) pode ter desempenhado um papel no aumento de Ca no perfil do solo.

O crescimento radicular foi positivamente influenciado pela correção da acidez do solo (Figura 3). O Ca é essencial para o alongamento das raízes (Hanson, 1984), e assim o desenvolvimento radicular é prejudicado em solos ácidos ou sob baixos níveis de Ca, especialmente no subsolo (Rosolem et al., 2017). Existem relatos de crescimento regular de raízes de soja com 10 mmolc dm<sup>-3</sup> de Ca (Ritchey et al., 1982) e espera-se que a resposta seja baixa quando os níveis no solo estiverem acima de

12 mmolc dm<sup>-3</sup> (Rosolem et al., 1995), mas a resposta foi significativa com maiores teores de Ca nas camadas mais profundas do solo neste estudo. Isso pode ser devido às condições climáticas, em resposta a períodos de seca.

No presente estudo, embora o calcário tenha se mostrado eficiente em aumentar o sistema radicular da soja, observou-se maior desenvolvimento no subsolo com a sua associação ao gesso (Tabela 1), provavelmente devido ao maior teor de Ca nesta profundidade (Figura 2). Apesar de relatos de maior crescimento radicular da soja quando houve aumento no teor de Ca<sup>2+</sup> após a aplicação de gesso, o efeito do Ca no crescimento radicular após a correção da acidez do solo foi inconsistente para a soja (Costa and Crusciol, 2016).

O efeito da correção da acidez do solo e do subsolo no crescimento radicular no consórcio milho/capim colonião foi mais evidente do que o observado na soja após a calagem, associado ou não ao gesso. Isso sugere que o milho é mais responsivo à correção da acidez do solo. As variações nas respostas entre as diferentes espécies de plantas ocorrem por causa de fatores genéticos ligados à eficiência da planta em adquirir Ca do solo, uma vez que ocorre apenas em partes novas e não suberizadas das raízes, e a disponibilidade de Ca no local é fundamental para a absorção constante por raízes muito jovens. Portanto, a melhor distribuição radicular no subsolo observada no presente estudo pode estar relacionada aos teores de Ca, uma vez que a aplicação de gesso associada à adubação com N foi eficiente em aumentar seus teores no subsolo em relação aos observados apenas com a aplicação de calcário. Em média, o teor de Ca no subsolo aumentou neste estudo (Figura 2), chegando a 20,0 mmolc dm<sup>-3</sup> (camada 0,2-0,6). No entanto, há evidências de respostas da raiz do milho a níveis mais elevados de Ca, na ordem de 15 mmolc dm<sup>-3</sup> (Rosolem et al., 1994).

Além disso, um efeito no crescimento radicular foi observado em todo o perfil do solo após o fornecimento de N (Figuras 4 e 6). O nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) é conhecido por desempenhar um papel regulador de sinal em muitos processos fisiológicos, incluindo o crescimento radicular e uma interconexão entre os níveis de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e Ca<sup>2+</sup> (Chen and Kao, 2012; Hasenstein and Evans, 1986; Sun et al., 2017) com auxina (Muday and Haworth, 1994). Esses processos são controlados por vários níveis de transcrição gênica, que são regulados por NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Vidal and Gutiérrez, 2008). Estudos têm mostrado que o crescimento do sistema radicular é regulado por NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e vias de sinalização de auxina (Guo et al., 2002; Walch-Liu and Forde, 2008). Galdos et al.

(2020) demonstraram que os sistemas consorciados com gramíneas forrageiras são eficientes no aproveitamento de N, evitando a lixiviação do N, e há relatos que o capim colômbio é altamente exigente em N (Rocha et al., 2019).

Além disso, o crescimento radicular em profundidade também pode ter sido favorecido pela presença de capim colômbio, que tem um sistema radicular agressivo, que estava vivo até a dessecação antes da próxima safra de soja. De acordo com Calonego and Rosolem (2010), o crescimento radicular da soja é melhorado como resultado do crescimento anterior das raízes das plantas de cobertura, provavelmente devido aos bioporos presentes no perfil do solo. No plantio direto, sem revolvimento do solo, canais contínuos são formados por raízes em decomposição que servem como caminhos que favorecem o crescimento das raízes das safras subsequentes no perfil do solo (Calonego and Rosolem, 2010; Ehlers et al., 1983; Williams and Weil, 2004). Isso é amparado pela correlação positiva entre o crescimento radicular da soja e a densidade do comprimento radicular do consórcio (Tabela 2). Como as espécies de braquiária possuem um sistema radicular vigoroso, abundante e profundo, essas plantas podem explorar um grande volume de solo e absorver maiores quantidades de nutrientes disponíveis em regiões de solo distantes das raízes da lavoura produtora de grãos do consórcio, que geralmente são mais superficiais e mais esparsas (Rosolem et al., 2017). Além disso, seu sistema radicular agressivo melhora a condição física do solo, aumentando a continuidade dos poros (Galdos et al., 2020).

#### **1.4.1 Produtividade de grãos**

As produtividades da soja foram maiores quando a acidez do solo foi corrigida, com diferenças significativas para a última safra e para as produtividades acumuladas. Existem diversos estudos que não mostram respostas de produtividade da soja à aplicação superficial de calcário e/ou gesso quando não há restrição hídrica (Oliveira and Pavan, 1996; Caires et al., 2005) e, portanto, a falta de resposta foi atribuída às condições adequadas de chuva durante o desenvolvimento da cultura. Além disso, o maior acúmulo de matéria orgânica e nutrientes na superfície do solo sob plantio direto diminui a toxicidade do Al através da formação de complexos Al-orgânicos (Franchini et al., 1999). Isso pode explicar a falta de resposta da soja nas três primeiras safras deste estudo, uma vez que não houve restrição hídrica neste período (Figura 1). No entanto, a safra 2018/2019 foi marcada por baixa precipitação (precipitação total de 493 mm) e, eventualmente, a produtividade da soja foi menor no tratamento controle

(3,4 Mg ha<sup>-1</sup>) do que após a aplicação de calcário (3,9 Mg ha<sup>-1</sup>) e calcário associado ao gesso (3,8 Mg ha<sup>-1</sup>), corroborando observações anteriores. De acordo com Nora et al. (2017) o aumento na produtividade de grãos pode estar associado ao aumento dos níveis de Ca<sup>2+</sup> no solo. Os autores observaram respostas na produtividade de grãos da soja quando as condições de precipitação eram desfavoráveis, aplicando dose de gesso semelhante à utilizada no presente estudo. Assim, o aumento do teor de Ca<sup>2+</sup> no solo (Figura 6) com a aplicação de calcário e gesso melhorou o desenvolvimento radicular (Figura 3), o que amenizou os efeitos da restrição hídrica. Este estudo demonstra que a correção da acidez do solo é eficiente para aumentar a produtividade da soja ao longo das safras, justificando a necessidade de correção mesmo quando as comparações ano a ano não apresentam diferenças significativas.

A aplicação de doses de N de 160 e 240 kg ha<sup>-1</sup> ao milho consorciado com capim colonião afetou positivamente a produtividade acumulada de grãos da soja (Figura 7). A fixação biológica de nitrogênio (FBN) pode suprir a necessidade de N da soja por meio do uso de cepas de rizóbio adaptadas selecionadas para condições tropicais (Hungria et al., 2006). No entanto, há estudos relatando que a diminuição na FBN geralmente observada após a floração pode restringir a disponibilidade de N para a soja, que não seria capaz de adquirir quantidades adequadas do nutriente para altos rendimentos.

Salvagiotti et al. (2008) analisou vários estudos de campo em diferentes regiões após uma revisão abrangente da literatura e observou que a soja de alto rendimento requer grandes quantidades de N para sustentar a biomassa acima do solo e sementes ricas em proteínas. Segundo os autores, o fornecimento de N sem diminuir a atividade do nódulo pode aumentar a produtividade da cultura e, como opções promissoras, sugeriram o fornecimento de N antes da semeadura ou em profundidades abaixo da zona de nodulação, ou seja, aumentando a disponibilidade de N no perfil do solo. Apesar da eficiência do fornecimento de N pela FBN para soja em solos tropicais (Hungria et al., 2006), houve resposta ao N aplicado previamente ao milho. Resíduos de lavouras e de cobertura acumulados na superfície do solo constituem importante reserva de nutrientes, cuja disponibilidade pode ser rápida e intensa (Rosolem et al., 2003) ou lento e gradual, dependendo da precipitação, temperatura, atividade microbiana do solo, qualidade e quantidade de resíduos vegetais (Pariz et al., 2011). De acordo com Mendonça et al. (2015) o capim colonião tem uma alta capacidade de ciclar N no sistema. Portanto, a quantidade de N reciclado

pelo capim colônia certamente aumentou o N total disponível à medida que o sistema progredia. No entanto, neste estudo, a concentração de N nas folhas da soja não foi afetada pela aplicação de N no milho (Anexo 1). Portanto, o efeito da adubação com N do milho na produtividade da soja não foi um efeito direto do nutriente, mas sim uma consequência de uma melhoria geral do sistema.

Na primeira safra de milho consorciado com capim colônia, o rendimento de grãos aumentou com a calagem, sem aumento adicional quando o gesso foi aplicado (Figura 7). As condições favoráveis de chuva nesta safra (Figura 1) explicam este resultado como Nora et al. (2017) relataram maior resposta da cultura ao gesso sob restrição de água.

Na segunda e terceira safras do milho consorciado com capim colônia, o calcário associado ao gesso resultou em maior produtividade quando comparado ao calcário isolado. Além disso, o rendimento de grãos de milho acumulado foi maior quando o gesso foi associado ao calcário (Figura 7). Esses resultados confirmam que o uso de gesso é uma ferramenta importante para aumentar a produtividade do milho quando cultivado após a soja, em um período em que costuma ocorrer diminuição da disponibilidade de água no solo. Caires et al. (1999) também observaram aumentos significativos na produtividade do milho devido à maior disponibilidade de Ca em profundidade, e os autores relacionaram os resultados a uma melhor distribuição do sistema radicular da cultura. Caires et al. (2010), em um experimento de longa duração com milho, concluiu que a aplicação combinada de gesso e calcário resultou em aumento de 17% na produtividade, destacando a importância desta ferramenta na maximização do rendimento de grãos desta espécie quando há restrição hídrica durante o desenvolvimento da cultura. Penariol et al. (2003) mostraram que a produtividade de grãos do milho pode ser comprometida se houver restrição hídrica durante o período de floração, fase que determina o número de óvulos a serem fertilizados e, conseqüentemente, a produção de grãos. Isso explica os rendimentos mais baixos observados na safra 2018 em comparação com 2017 e 2019.

Em geral, um aumento na produtividade de grãos de milho foi observado quando o N foi adicionado após a correção da acidez do solo em comparação ao tratamento controle, mesmo quando uma dose baixa ( $80 \text{ kg ha}^{-1}$ ) foi aplicada. Esses resultados sugerem uma resposta do milho cultivado como segunda safra a menores doses de N, o que pode ser explicado pelos altos resíduos de N depositados na

superfície do solo pela soja, mais o N reciclado pelo capim. Há rápida decomposição dos resíduos da soja devido à baixa relação C/N, que beneficia a próxima safra.

As recomendações de adubação com N em sistema consorciado ainda não são claras. Os melhores rendimentos foram obtidos neste estudo com a aplicação de 160 kg N ha<sup>-1</sup>, o que é comparável ao estudo de Souza and Soratto (2006), que também observaram aumento na produtividade de grãos de milho cultivado em segunda safra quando foram aplicados 120 kg N ha<sup>-1</sup>. Esses resultados sugerem que o consórcio de milho com capim colonião é uma alternativa para evitar perdas de nitrogênio (Rocha et al., 2019) devido ao seu potencial para exploração profunda do solo.

## 1.5 CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo fornecem informações importantes sobre os efeitos da correção da acidez do solo e do suprimento de N em sistema de semeadura direta sobre o crescimento do sistema radicular da soja e do milho.

A correção da acidez do solo e o suprimento de N resultam na melhor distribuição dos sistemas radiculares da soja e do milho no perfil do solo, aumentando a exploração do solo, favorecendo a extração de água em períodos de escassez e absorção de nutrientes nas camadas mais profundas do solo, resultando, eventualmente, em maiores produtividades.

A associação de calcário ao gesso é uma alternativa importante para aumentar os níveis de Ca no perfil do solo e melhorar a distribuição do sistema radicular da cultura, e a adubação com N auxilia na melhoria do sistema, resultando não apenas em maiores rendimentos de milho, mas também melhorando a produtividade da soja.

## REFERÊNCIAS

- Caires, E.F., Alleoni, L.R.F., Cambri, M.A., Barth, G., 2005. Surface Application of Lime for Crop Grain Production Under a No-Till System. *Agronomy Journal* 97. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.0207>
- Caires, E.F., Fonseca, A.F., Mendes, J., Chueiri, W.A., Madruga, E.F., 1999. Produção de milho, trigo e soja em função das alterações das características químicas do solo pela aplicação de calcário e gesso na superfície, em sistema de plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 23. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000200016>
- Caires, E.F., Garbuio, F.J., Alleoni, L.R.F., Cambri, M.A., 2006. Calagem superficial e cobertura de aveia preta antecedendo os cultivos de milho e soja em sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 30. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000100010>
- Caires, E.F., Joris, H.A.W., Churka, S., 2011. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. *Soil Use and Management* 27. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00310.x>
- Caires, E.F., Joris, H.A.W., Churka, S., 2010. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. *Soil Use and Management* 27. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00310.x>
- Calonego, J.C., Rosolem, C.A., 2010. Soybean root growth and yield in rotation with cover crops under chiseling and no-till. *European Journal of Agronomy* 33. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.06.002>
- Chen, Y.H., Kao, C.H., 2012. Calcium is involved in nitric oxide- and auxin-induced lateral root formation in rice. *Protoplasma* 249. <https://doi.org/10.1007/s00709-011-0277-2>
- CONAB, 2021. Série Histórica das Safras [WWW Document]. <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>.

- Costa, A., Rosolem, C.A., 2007. Liming in the transition to no-till under a wheat–soybean rotation. *Soil and Tillage Research* 97. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.09.014>
- Costa, C.H.M., Crusciol, C.A.C., 2016. Long-term effects of lime and phosphogypsum application on tropical no-till soybean–oat–sorghum rotation and soil chemical properties. *European Journal of Agronomy* 74. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.12.001>
- Ehlers, W., Köpke, U., Hesse, F., Böhm, W., 1983. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil & Tillage Research* 3, 261–275.
- Farina, M.P.W., Channon, P., Thibaud, G.R., 2000. A Comparison of Strategies for Ameliorating Subsoil Acidity I. Long-Term Growth Effects. *Soil Science Society of America Journal* 64. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642646x>
- Fehr, W.R., Caviness, C.E., Burmood, D.T., Pennington, J.S., 1971. Stage of Development Descriptions for Soybeans, *Glycine Max* (L.) Merrill <sup>1</sup>. *Crop Science* 11. <https://doi.org/10.2135/cropsci1971.0011183X001100060051x>
- Franchini, J.C., Miyazawa, M., Pavan, M.A., Malavolta, E., 1999. Dinâmica de íons em solo ácido lixiviado com extratos de resíduos de adubos verdes e soluções puras de ácidos orgânicos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 34. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999001200014>
- Galdos, M. v., Brown, E., Rosolem, C.A., Pires, L.F., Hallett, P.D., Mooney, S.J., 2020. Brachiaria species influence nitrate transport in soil by modifying soil structure with their root system. *Scientific Reports* 10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61986-0>
- Guo, F., Wang, R., Crawford, N.M., 2002. The Arabidopsis dual-affinity nitrate transporter gene AtNRT1.1 (CHL1) is regulated by auxin in both shoots and roots. *Journal of Experimental Botany* 53. <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.370.835>
- Hanson, J.B., 1984. The functions of calcium in plant nutrition. *Advances in plant nutrition*.

- Hasenstein, K.-H., Evans, M.L., 1986. Calcium Dependence of Rapid Auxin Action in Maize Roots. *Plant Physiology* 81. <https://doi.org/10.1104/pp.81.2.439>
- Hungria, M., Franchini, J.C., Campo, R.J., Crispino, C.C., Moraes, J.Z., Sibaldelli, R.N.R., Mendes, I.C., Arihara, J., 2006. Nitrogen nutrition of soybean in Brazil: Contributions of biological N<sub>2</sub> fixation and N fertilizer to grain yield. *Canadian Journal of Plant Science* 86. <https://doi.org/10.4141/P05-098>
- Jing, J., Rui, Y., Zhang, F., Rengel, Z., Shen, J., 2010. Localized application of phosphorus and ammonium improves growth of maize seedlings by stimulating root proliferation and rhizosphere acidification. *Field Crops Research* 119. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.08.005>
- Jones, D.L., Ryan, P.R., 2017. Aluminum Toxicity, in: *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00120-9>
- Maeght, J.-L., Rewald, B., Pierret, A., 2013. How to study deep roots—and why it matters. *Frontiers in Plant Science* 4. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00299>
- Mendonça, V.Z. de, Mello, L.M.M. de, Andreotti, M., Pariz, C.M., Yano, É.H., Pereira, F.C.B.L., 2015. LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES DA PALHADA DE FORRAGEIRAS CONSORCIADAS COM MILHO E SUCESSÃO COM SOJA. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 39. <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20150666>
- Muday, G.K., Haworth, P., 1994. Tomato root growth, gravitropism, and lateral development: correlation with auxin transport. *Plant physiology and biochemistry : PPB* 32, 193–203.
- Nora, D.D., Amado, T.J.C., Nicoloso, R. da S., Gruhn, E.M., 2017. Modern High-Yielding Maize, Wheat and Soybean Cultivars in Response to Gypsum and Lime Application on No-Till Oxisol. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 41. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160504>
- Oliveira, E.L., Pavan, M.A., 1996. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. *Soil and Tillage Research* 38. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(96\)01021-5](https://doi.org/10.1016/0167-1987(96)01021-5)

- Pariz, C.M., Andreotti, M., Buzetti, S., Bergamaschine, A.F., Ulian, N. de A., Furlan, L.C., Meirelles, P.R. de L., Cavasano, F.A., 2011. Straw decomposition of nitrogen-fertilized grasses intercropped with irrigated maize in an integrated crop-livestock system. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 35. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600019>
- Pearson, R.W., Abruna, F., Vicente-Chandler, J., 1962. Effect of lime and nitrogen applications on downward movement of calcium and magnesium in two humid tropical soils of Puerto Rico. *Soil Science* 93.
- Penariol, F.G., Fornasieri Filho, D., Coicev, L., Bordin, L., Farinelli, R., 2003. Comportamento de Cultivares de Milho Semeadas em Diferentes Espaçamentos entre Linhas e Densidades Populacionais, na Safrinha. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo* 2. <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v2n2p52-60>
- Pivetta, L.A., Castoldi, G., Pivetta, L.G., Maia, S.C.M., Rosolem, C.A., 2019. Gypsum application, soil fertility and cotton root growth. *Bragantia* 78. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20180183>
- Raij, B., Andrade, J.C., Cantarella, H., Quaggio, J.A., 2001. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas.
- Raij, B. van, 2008. Gesso na agricultura. Instituto Agronomico de Campinas, Campinas.
- Raij, B. van, 1992. Reações de gesso em solos ácidos, in: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA. Ibrafos, Uberaba, pp. 105–120.
- Ritchey, D.K., Feldhake, C.M., Clark, R.B., de Sousa, D.M.G., 1995. Improved Water and Nutrient Uptake from Subsurface Layers of Gypsum-Amended Soils, in: Karlen, D., Wright, R., Kemper, W. (Eds.), *Agricultural Utilization of Urban and Industrial By-Products*. <https://doi.org/10.2134/asaspecpub58.c8>
- Ritchey, K.D., Silva, J.R., Costa, U.F., 1982. Calcium deficiency in clayey B horizons of savanna oxisols. *Soil Science*.

- Rocha, K.F., de Souza, M., Almeida, D.S., Chadwick, D.R., Jones, D.L., Mooney, S.J., Rosolem, C.A., 2020. Cover crops affect the partial nitrogen balance in a maize-forage cropping system. *Geoderma* 360. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114000>
- Rocha, K.F., Mariano, E., Grassmann, C.S., Trivelin, P.C.O., Rosolem, C.A., 2019. Fate of 15N fertilizer applied to maize in rotation with tropical forage grasses. *Field Crops Research* 238. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.018>
- Rosolem, C.A., Bicudo, S.J., Marubayashi, O.M., 1995. Soybean yield and root growth as affected by lime rate and quality, in: *Plant-Soil Interactions at Low PH: Principles and Management*. Springer Netherlands, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-0221-6\\_83](https://doi.org/10.1007/978-94-011-0221-6_83)
- Rosolem, C.A., Foloni, J.S.S., Oliveira, R.H. de, 2003. Dinâmica do nitrogênio no solo em razão da calagem e adubação nitrogenada, com palha na superfície. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 38. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000200018>
- Rosolem, C.A., Pace, L., Crusciol, C.A.C., 2004. Nitrogen management in maize cover crop rotations. *Plant and Soil* 264. <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000047761.50641.a3>
- Rosolem, C.A., Ritz, K., Cantarella, H., Galdos, M. v., Hawkesford, M.J., Whalley, W.R., Mooney, S.J., 2017. Enhanced Plant Rooting and Crop System Management for Improved N Use Efficiency. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.07.002>
- Rosolem, C.A., Vale, L.S.R., Grassi Filho, H., Moraes, N.H., 1994. Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 18, 491–497.
- Salvagiotti, F., Cassman, K.G., Specht, J.E., Walters, D.T., Weiss, A., Dobermann, A., 2008. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Research* 108. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.03.001>
- Shu, L., Shen, J., Rengel, Z., Tang, C., Zhang, F., 2007. Cluster Root Formation by *Lupinus Albus* is Modified by Stratified Application of Phosphorus in a Split-Root

System. Journal of Plant Nutrition 30.  
<https://doi.org/10.1080/01904160601118075>

Souza, E.F.C., Soratto, R.P., 2006. Efeito de Fontes e Doses de Nitrogênio em Cobertura, no Milho Safrinha, em Plantio Direto. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo* 5. <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v5n3p395-405>

Souza Junior, J.C. de, Nogueirol, R.C., Monteiro, F.A., 2019. Nitrate and ammonium proportion plays a key role in copper phytoextraction, improving the antioxidant defense in Tanzania guinea grass. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 171. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.013>

Sumner, M.E., 1995. Amelioration of subsoil acidity with minimum disturbance, in: Jayawardane, N.S., Stewart, B.A. (Eds.), *Advances in Soil Science: Subsoil Management Techniques*. Lewis Publishers, Boca Raton, pp. 147–185.

Sun, C.-H., Yu, J.-Q., Hu, D.-G., 2017. Nitrate: A Crucial Signal during Lateral Roots Development. *Frontiers in Plant Science* 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00485>

Tiecher, T., Pias, O.H. de C., Bayer, C., Martins, A.P., Denardin, L.G. de O., Anghinoni, I., 2018. Crop Response to Gypsum Application to Subtropical Soils Under No-Till in Brazil: a Systematic Review. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 42. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20170025>

USDA, 2014. *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed. Soil Survey Staff.

Vidal, E.A., Gutiérrez, R.A., 2008. A systems view of nitrogen nutrient and metabolite responses in *Arabidopsis*. *Current Opinion in Plant Biology* 11. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2008.07.003>

Walch-Liu, P., Forde, B.G., 2008. Nitrate signalling mediated by the NRT1.1 nitrate transporter antagonises l-glutamate-induced changes in root architecture. *The Plant Journal* 54. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2008.03443.x>

Williams, S.M., Weil, R.R., 2004. Crop Cover Root Channels May Alleviate Soil Compaction Effects on Soybean Crop. *Soil Science Society of America Journal* 68. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1403>

Williamson, L.C., Ribrioux, S.P.C.P., Fitter, A.H., Leyser, H.M.O., 2001. Phosphate Availability Regulates Root System Architecture in Arabidopsis. *Plant Physiology* 126. <https://doi.org/10.1104/pp.126.2.875>

## CAPÍTULO 2

### RECUPERAÇÃO DE NITROGÊNIO PELO MILHO SEGUNDA SAFRA CONSORCIADO COM CAPIM TANZANIA

#### RESUMO

A correção da acidez do solo pode aumentar a eficiência de uso do nitrogênio (N) pelas plantas de milho consorciado com capim cv. Tanzânia (*Megathyrsus maximus*) cultivado em segunda safra, após a cultura da soja. Desta forma, a exigência do fertilizante nitrogenado para o milho cultivado após a soja pode ser menor, devido à entrada de N no solo pela fixação biológica da leguminosa. Assim, objetivou-se verificar a recuperação de N do fertilizante pela cultura do milho consorciado com capim cv. Tanzânia após a correção da acidez do solo, utilizando a técnica de isótopo estável  $^{15}\text{N}$ . Foi conduzido um experimento com a cultura da soja e, subsequente à soja, foi cultivado milho em consorcio com capim cv. Tanzânia nos anos agrícolas 2017/2018, 2018/2019 e 2019/2020. Os tratamentos consistiram da aplicação de calcário, calcário + gesso e controle (sem aplicação de corretivos). Foi aplicado  $160 \text{ Kg ha}^{-1}$  N na forma de sulfato de amônio enriquecido com  $^{15}\text{N}$ . A correção da acidez do solo resulta em maior absorção do N pelas plantas de milho segunda safra cultivado em consorcio com o capim cv. Tanzânia em sistema de semeadura direta (SSD), proporcionando maior EUN do fertilizante aplicado. Além disso, o consorcio milho/capim é uma alternativa importante para aumentar a recuperação de N no solo e maior quantidade de N torna-se disponível para a cultura subsequente, após o processo de ciclagem.

**Palavras-chave:** *Megathyrsus maximus*; enriquecimento de N; correção da acidez; ciclagem de N.

#### ABSTRACT

Soil acidity correction can increase nitrogen (N) use efficiency by maize plants intercropped with grass cv. Tanzania (*Megathyrsus maximus*) cultivated as a relay crop, after soybean. Thus, the nitrogen fertilizer requirement for maize grown after soybean may be lower, due to the entry of N into the soil by the biological fixation. Thus, the objective was to verify the recovery of N from the fertilizer by the maize

intercropped with grass cv. Tanzania after soil acidity correction using the  $^{15}\text{N}$  stable isotope technique. An experiment was carried out with soybean and, subsequent to soybean, maize was cultivated in intercropping with grass cv. Tanzania in the 2017/2018, 2018/2019 and 2019/2020 seasons. The treatments consisted of the application of lime, lime + gypsum and control (without application of correctives).  $160 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ N}$  was applied in the form of ammonium sulfate enriched with  $^{15}\text{N}$ . Soil acidity correction results in greater N uptake by maize as a relay crop intercropped with grass cv. Tanzania in a no-till system (NTS), providing higher EUN of the applied fertilizer. In addition, the maize/grass intercropped is an important alternative to increase the recovery of N in the soil and a greater amount of N becomes available for the subsequent crop, after the cycling process.

**Keywords:** *Megathyrus maximus*; N enrichment; acidity correction; N cycling.

## 2.1 INTRODUÇÃO

A correção da acidez do subsolo com calcário sem incorporação em sistema semeadura direta (SSD) é, em geral, lenta (Caires et al., 1998). Entretanto, a aplicação de gesso tem demonstrado alterações em subsuperfície, elevando os níveis de cátions, além de reduzir a toxicidade de alumínio e favorecer o desenvolvimento radicular em profundidade (Rosolem et al., 1998).

Os efeitos da calagem nas características químicas dos solos e sobre o crescimento das plantas são bastante conhecidos. As transformações e fluxos de nitrogênio (N) do solo são afetados em função da correção da acidez, ocorrendo maior mineralização de N, aumentando assim a disponibilidade de N para as plantas (Haynes, 1986; Silva et al., 1994). Entretanto, a calagem pode, também, aumentar a emissão de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) na atmosfera, podendo chegar a  $0,13 \text{ t C-CO}_2$  por tonelada de calcário aplicado (IPCC, 2016). Embora maiores emissões de  $\text{CO}_2$  sejam resultantes de reações de hidrólise do carbonato de cálcio no solo, a atividade microbiana também se intensifica após a calagem em função da melhoria das condições químicas do solo (Fuentes et al., 2006). Entretanto, Sato et al. (2019), constataram, em experimento de longa duração, que os sistemas de consórcio milho-braquiária emitem menos  $\text{N}_2\text{O}$  quando comparados às lavouras em sistema de cultivo convencional. O efeito é devido às gramíneas forrageiras, que desenvolvem profundamente o sistema radicular,

depositando matéria orgânica recalcitrante, protegendo e estabilizando o carbono do solo e mitigando as emissões.

A aplicação do calcário em superfície no SSD resulta em uma superdose nos primeiros centímetros do solo (Rosolem; Foloni; Oliveira, 2003). Assim, nesta região do solo, o pH é relativamente alto, o que favorece a nitrificação. Fertilizantes nitrogenados que contém amônia, tais como o sulfato e o nitrato de amônio, ureia e mais os fosfatos de amônio, aplicados também em superfície, promovem uma acidificação nesta camada de solo, pois liberam, na sua reação com o solo, íons  $H^+$ . A planta, por sua vez, dependendo da forma de N, pode colaborar para acidificação ou para a elevação do pH. Desta forma, a disponibilidade de N para as plantas pode ser influenciada não só pelas condições de acidez do solo, mas também pela forma do adubo aplicado.

Além de interferir nos processos de decomposição e mineralização da matéria orgânica (Silva et al., 1999), o pH do solo interfere nas reações de nitrificação (Silva; Do vale, 2000). Em Latossolo do sul de Minas Gerais, Silva; Vale; Guilherme (1994) verificaram que a calagem intensificou a nitrificação e, conseqüentemente, a disponibilidade de nitrato.

O nitrato é altamente solúvel em água e apresenta grande mobilidade no perfil do solo, ficando pouco retido pelas partículas negativas predominantes no solo, tendendo a se mover com a água. O efeito da calagem associada aos fertilizantes nitrogenados aplicados na superfície e o movimento do calcário em profundidade foram demonstrados em diferentes sistemas (Abruna et al., 1964; Adams et al., 1967), mas ainda tem sido pouco estudado no Brasil, principalmente em sistemas de produção utilizando o milho consorciado com gramíneas forrageiras. Com a aplicação de fertilizantes amoniacais nos solos corrigidos, o amônio é oxidado a  $NO_3^-$  e a acidez gerada na nitrificação auxilia a dissolução do calcário. Assim o Ca pode parear-se com o nitrato restante, resultando na movimentação de  $Ca(NO_3)_2$  para o subsolo (Rosolem et al., 2003). Como a absorção de  $NO_3^-$  pelas raízes normalmente é maior que a de  $Ca^{2+}$ , pode ocorrer aumento do pH no subsolo (Caires, 2013).

Em geral, a eficiência de uso do nitrogênio tem sido baixa, principalmente em sistemas com alta produtividade (Rosolem et al. 2017), e seu melhoramento requer uma compreensão profunda de como os nutrientes, plantas e solo interagem em um sistema de cultivo para evitar perdas. A introdução de práticas agronômicas como a rotação de culturas e o cultivo em consórcio podem ser boas opções não apenas para

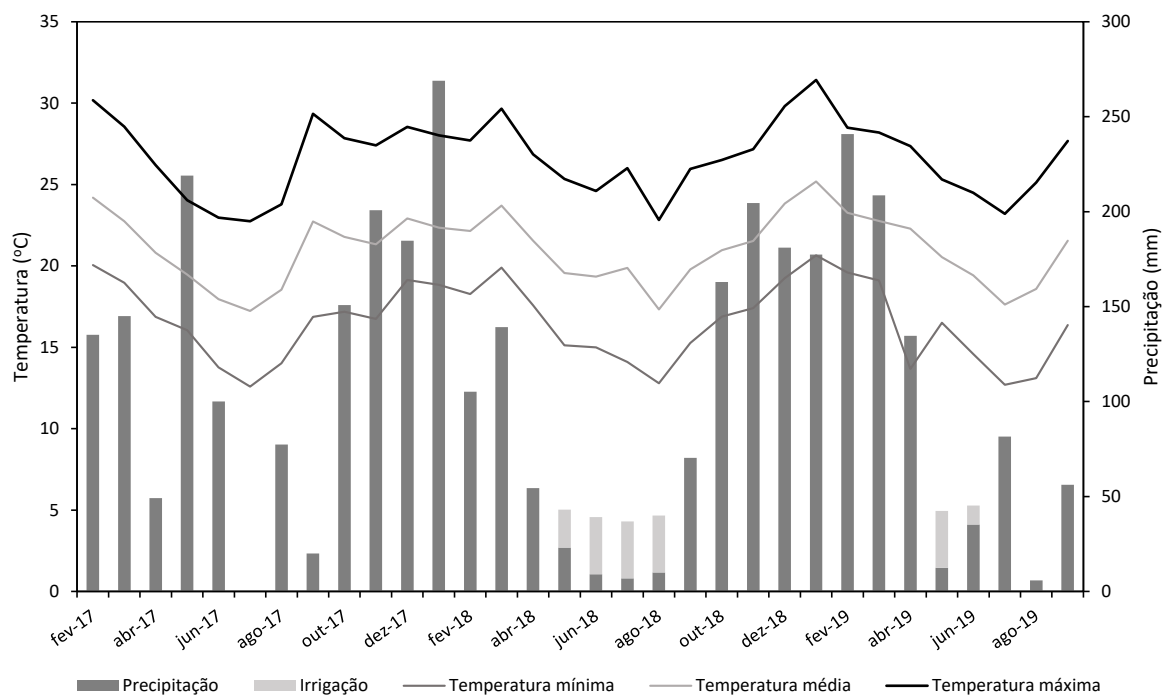
reduzir o  $\text{NO}_3$  lixiviado, mas também para aumentar o rendimento de biomassa por unidade de área (Reetz, 2016). Além disso, o enriquecimento do subsolo em Ca resulta em condições mais favoráveis para o crescimento radicular (Rosolem et al., 1998).

A adoção do SSD, rotações de culturas com leguminosas e o uso de sistemas de consórcio podem diminuir a dependência agrícola do N mineral, e gramíneas com sistemas radiculares profundos e vigorosos podem prevenir a lixiviação de N e o uso de plantas com raízes profundas pode ajudar na prevenção da lixiviação de nitrato e contaminação do lençol freático (Rosolem et al., 2017). Diante disso, pode-se levantar a hipótese de que o milho cultivado em SSD em consórcio com *Panicum maximum* cv. Tanzânia, em áreas corrigidas por meio da aplicação de calcário e gesso, apresenta maior desenvolvimento radicular, o que resultaria na maior exploração do solo, melhorando o aproveitamento do fertilizante nitrogenado. Assim, objetivou-se verificar a recuperação do N do fertilizante no milho segunda safra em consórcio com Tanzânia, bem como a abundância de N proveniente do fertilizante nas plantas e no perfil do solo.

## **2.2 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.2.1 Caracterização da área**

O experimento foi realizado em Botucatu, estado de São Paulo, Brasil, entre 2017 e 2020, em um Typic Hapludox (USDA, 2014), bem estruturado, de textura argilosa com 343 g  $\text{kg}^{-1}$  de 0,0-0,1 m de profundidade, localizado a 22° 49' S, 48° 25' W e 770 m de altitude. O Clima, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cwa, subtropical, seco durante o outono-inverno e estação quente e chuvosa durante a primavera-verão. A precipitação média anual durante os três anos de condução dos experimentos foi de 1380 mm, a temperatura média do mês mais quente foi de 26,9 °C e a do mês mais frio de 16,6 °C. Os dados obtidos durante a condução do experimento foram medidos em uma estação meteorológica localizada a 1.300 m da área experimental (Figura 1).

**Figura 1 - Precipitação e temperaturas mínimas, médias e máximas**

Monitoramento durante a primeira, segunda e terceira safras, 2017, 2018 e 2019, respectivamente

### 2.2.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com aplicação de calcário, calcário + gesso e um tratamento controle (sem aplicação de corretivos), e quatro repetições. Após o cultivo da soja em primeira safra, foi semeado o milho consorciado com capim colômbio cv. Tanzânia (*Megathyrus maximus*) em 2017, 2018 e 2019.

### 2.2.3 Instalação e condução do experimento

O experimento foi instalado em setembro de 2016 em semeadura direta e, de acordo com o resultado das análises químicas do solo de 0-20 e 20-40 cm, foram calculadas as quantidades de corretivos a serem aplicadas. Para o calcário, foram aplicados  $2,92 \text{ Mg ha}^{-1}$ , dose calculada para elevar a saturação por bases a 70%, enquanto que, para o gesso, foram aplicados  $2 \text{ Mg ha}^{-1}$ , considerado o teor de argila do solo multiplicado por 6 (RAIJ et al., 1997), tendo como base de recomendação o resultado da análise de solo 0 a 40 cm. Em setembro de 2017 foi realizada a reaplicação dos corretivos de acidez na superfície do solo, como descrito na primeira aplicação.

As parcelas consistiram em 10 linhas de semeadura com espaçamento entrelinhas de 0,45 m e 10 m de comprimento, totalizando 45 m<sup>2</sup>. Dentro das parcelas foram demarcadas microparcelas de 1,5 x 2,25 m, uma em cada ano, onde foi aplicado o fertilizante enriquecido com <sup>15</sup>N em 2017, 2018 e 2019. A adubação inicial utilizada durante os três anos de experimento para o milho consorciado com Tanzânia foi de 80 kg ha<sup>-1</sup> de fósforo (P) como superfosfato triplo e 150 kg ha<sup>-1</sup> de potássio (K) como cloreto de potássio (KCl), de forma parcelada, sendo aplicado 100 kg ha<sup>-1</sup> no momento da semeadura e 50 kg ha<sup>-1</sup> no estágio V4-V5 do milho como adubação de cobertura (Ritche e Hanway, 1986).

O milho foi semeado em março de 2017 e 2018, e em fevereiro de 2019, utilizando-se o híbrido 2B 587 RR BT PW, com uma população de 70 mil plantas ha<sup>-1</sup>. Simultaneamente foi semeado o Tanzânia, com uma densidade de 12 kg ha<sup>-1</sup> de sementes com taxa de 80% de germinação e pureza de 99%. As sementes da forrageira foram misturadas ao fertilizante e em seguida adicionadas ao compartimento do fertilizante da semeadora e depositadas no sulco de plantio, abaixo das sementes do milho, a 0,08 m de profundidade, nos três anos agrícolas.

O controle de percevejos remanescentes da cultura da soja foi realizado através da aplicação de Tiametoxam (Engeo Pleno) na dose 200 mL ha<sup>-1</sup> (p.c), em 22/03/2017 e 03/04/2018. Para o controle de plantas daninhas foi utilizado 6-chloro-N<sup>2</sup>-ethyl-N 4 -isopropyl-1,3,5-triazine-2,4-diamine (Atrazina), na dose 4 L ha<sup>-1</sup> (p.c), em 28/03/2017, 10/04/2018 e 10/01/2019 e para controlar doenças foliares foi realizada aplicação de Azoxistrobina e Ciproconazol (Priori Xtra), na dose 300 mL ha<sup>-1</sup> (p.c), em 26/05/2017, 16/04/2018 e 20/01/2019.

Em 8 agosto de 2017, 22 de agosto de 2018 e 28 de julho de 2019 foi realizada a colheita manual na área útil de amostragem. Colheram-se as cinco fileiras centrais de plantas por 5 m de comprimento de cada parcela para avaliar a produtividade de grãos (13% de base úmida).

#### **2.2.4 Produção e aplicação do sulfato de amônio enriquecido com <sup>15</sup>N, amostragem do solo e das plantas de milho e do *Panicum maximum* cv. Tanzânia**

Sulfato de amônio enriquecido a 4,85% com isótopo estável de nitrogênio <sup>15</sup>N foi utilizado como fonte nitrogenada para aplicação nas microparcelas. A dose de N aplicada foi de 160 kg ha<sup>-1</sup>, sendo aplicados 30 kg ha<sup>-1</sup> na semeadura e 130 kg ha<sup>-1</sup>

em cobertura no estágio V4-V5, quando o milho tinha quatro a cinco folhas completamente expandidas (Ritche e Hanway, 1986). Nas três microparcelsas demarcadas em 2017, 2018 e 2019 o fertilizante foi aplicado manualmente, ao lado da linha de semeadura.

No estágio de maturação fisiológica do milho - R6 (RITCHE E HANWAY, 1986) foi realizada a amostragem de plantas de milho e do Tanzânia. Foram amostradas três plantas de milho no centro da linha central das microparcelsas, em 2017, 2018 e 2019, desconsiderando 0,25 m em cada extremidade da linha. Imediatamente após ser cortada acima da inserção das raízes adventícias, a planta de milho foi dividida em folhas, colmo, espiga e grãos. As amostragens do Tanzânia foram realizadas cortando-se a parte aérea, na mesma linha utilizada para amostrar as plantas de milho, dentro das microparcelsas, em uma faixa de 0,4 m nos três anos. As amostras foram secas em estufa de circulação de ar forçado a 60°C. Posteriormente, foram pesadas para determinação da massa de matéria seca e picadas em pedaços menores que 1,0 cm. Uma subamostra homogênea de 40 g foi moída em moinho tipo Willey, peneirada em peneira com malha <1,0 mm.

O solo foi amostrado nas profundidades de 0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, sendo coletados três pontos no centro da linha central da microparcelsa para compor uma amostra composta por profundidade, e outros três pontos foram amostrados a 0,22 m da linha central da microparcelsa para compor uma amostra composta por profundidade. As amostras foram coletadas utilizando um amostrador tipo caneco de uma polegada de diâmetro. As amostras foram secas a 40°C em estufa de circulação forçada de ar e moídas em moinho de bolas e acondicionadas em tubos de eppendorf. As amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Isótopos Estáveis (LIE) do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. Uma alíquota de 250 µg de cada amostra foi utilizada para determinação da abundância dos isótopos de  $^{15}\text{N}$ , por meio de um espectrômetro de massa modelo ANCA-SL 20-20, da Europa Scientific Ltda, UK (BARRIE; PROSSER, 1996).

#### **2.2.5 Análises de dados**

A partir da concentração de  $^{15}\text{N}$  e de N total nas amostras determinou-se a proporção de N proveniente do fertilizante no solo (NSPF) e nas plantas (NPPF), de acordo com equações 1 e 2, respectivamente:

$$NSPF (\%) = \frac{\%^{15}N_{amostra} - \%^{15}N_{Abundância\ Natural}}{\%^{15}N_{fertilizante} - \%^{15}N_{Abundância\ Natural}} \times 100 \quad (1)$$

$$NPPF (\%) = \frac{\%^{15}N_{amostra} - \%^{15}N_{Abundância\ Natural}}{\%^{15}N_{fertilizante} - \%^{15}N_{Abundância\ Natural}} \times 100 \quad (2)$$

O nitrogênio total no solo (NTS) foi calculado de acordo com a quantidade de solo (QS) em cada camada amostrada. A quantidade de solo foi calculada a partir da densidade do solo e a espessura da camada amostrada. O NTS foi determinado de acordo com a equação 3:

$$NTS (kg\ ha^{-1}) = \frac{\% N\ total}{100} \times QS \quad (3)$$

Os dados de matéria seca total (MST) de palha das gramíneas forrageiras e das frações do milho foram utilizados para calcular o N total na planta, ou na fração da planta (NTP) em  $kg\ ha^{-1}$ . O NTP é calculado conforme a equação 4:

$$NTP (kg\ ha^{-1}) = \frac{\% N\ total}{100} \times MS \quad (4)$$

Com os dados de NPPF (%) e NSPF (%), foi calculada a quantidade de N proveniente do fertilizante no solo (NSPF) e nas plantas de milho e Tanzânia separadamente (NPPF), em  $kg\ ha^{-1}$ , conforme as equações 5 e 6, respectivamente:

$$NSPF (kg\ ha^{-1}) = \frac{NSPF (\%)}{100} \times NTP \quad (5)$$

$$NPPF (kg\ ha^{-1}) = \frac{NPPF (\%)}{100} \times NTP \quad (6)$$

A eficiência de uso do N pela planta (EUN) e o N residual no solo (NRS) proveniente do fertilizante foram calculados a partir do NPPF e NSPF em razão da dose de N aplicado, de acordo com as equações 7 e 8, respectivamente:

$$NRS (\%) = \frac{NPPF (kg \ ha^{-1})}{Dose} \times 100 \quad (7)$$

$$EUN (\%) = \frac{NPPF (kg \ ha^{-1})}{Dose} \times 100 \quad (8)$$

Os resultados foram submetidos à análise de homogeneidade de variância (teste de Levene) e de normalidade (Shapiro-Wilk). Atendidos estes pressupostos, foi realizada a análise de variância pelo teste F ( $p < 0,05$ ). Ocorrendo significância, as médias foram comparadas usando LSD ( $P = 0,05$ ), utilizando o software SAS, versão 9.4.

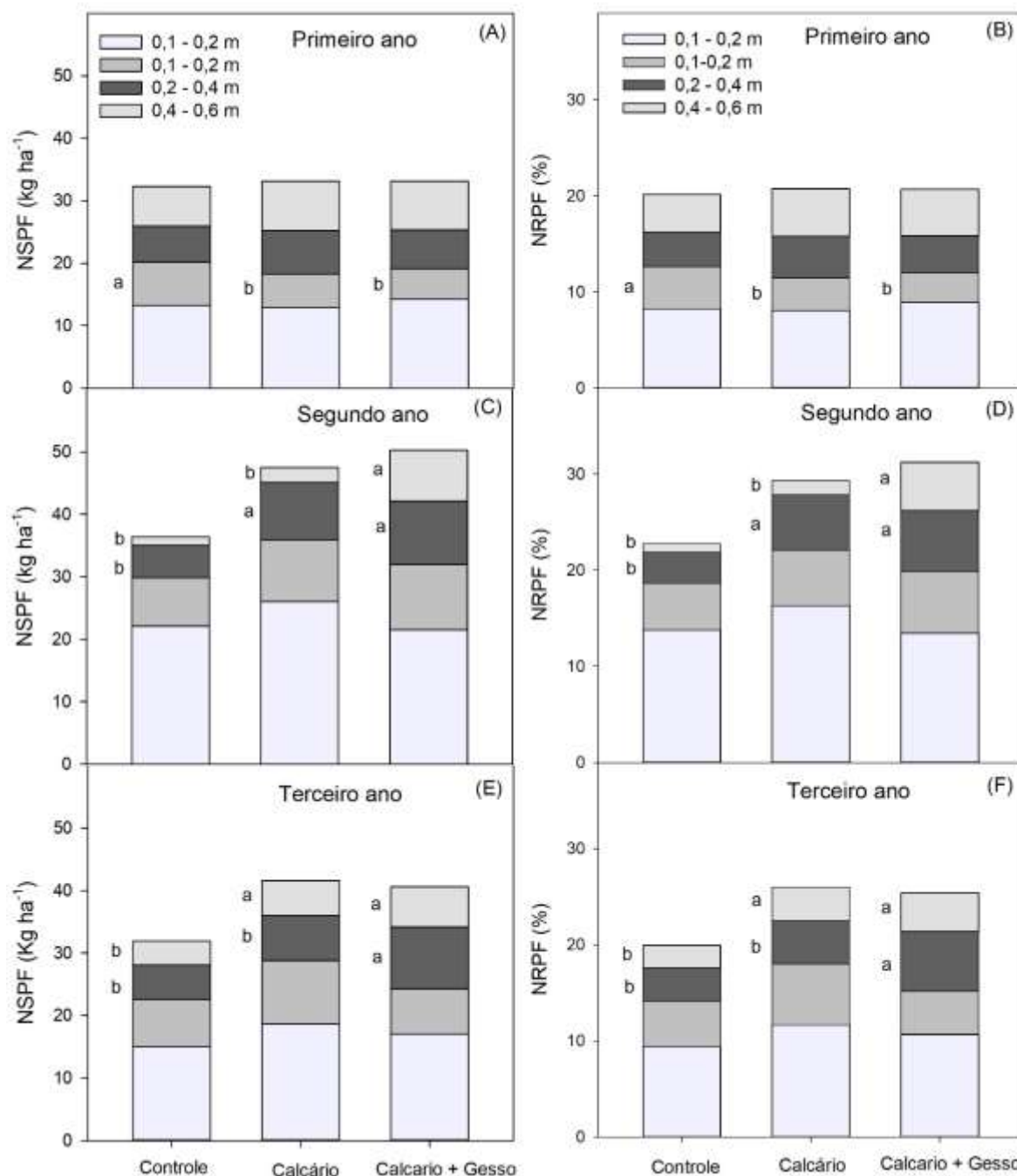
## 2.3 RESULTADOS

### 2.3.1 Nitrogênio residual no solo proveniente do fertilizante

O  $^{15}\text{N}$  aplicado foi encontrado em maior quantidade na camada superficial do solo (0-0,1 m), em média, 13,4, 23,3 e 16, 9 kg N  $\text{ha}^{-1}$  em 2017, 2018 e 2019, respectivamente (Figuras 2. A, C e E), do que nas outras profundidades. No entanto, nesta camada não se observou diferenças no acúmulo de N no solo proveniente do fertilizante aplicado ao milho de em função da aplicação de corretivos de acidez, nos três anos avaliados.

No primeiro ano, na camada de 0,1-0,2 m foi observado maior acúmulo de N proveniente do fertilizante no tratamento controle em relação aos corretivos de acidez do solo (Figura 2. A, B). Para o segundo ano (Figura 2. C, D) não houve diferença em função dos corretivos de acidez nas camadas superficiais 0-0,1 e 0,1-0,2 m de profundidade. No entanto, no segundo e terceiro anos, na camada de 0,2-0,4 m de profundidade, a aplicação de calcário e calcário associado ao gesso resultou em maior acúmulo de N em relação ao tratamento controle (Figuras 2. C, D, E e F).

**Figura 2 - Nitrogênio no solo proveniente do fertilizante (NSPF) e nitrogênio recuperado proveniente do fertilizante (NRPF) em função da aplicação de corretivos de acidez do solo**



NSPF nas entressafras 2017 (A), 2018 (C) e 2019 (E) e NRPF nas entressafras 2017 (B), 2018 (D) e 2019 (F)

No terceiro ano novamente não se observou diferenças no acúmulo de N proveniente do fertilizante nas camadas superficiais do solo. Entretanto, no subsolo, a aplicação de calcário associado ao gesso resultou em maior acúmulo de N

proveniente do fertilizante nas camadas 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m, respectivamente (Figura 2. E e F).

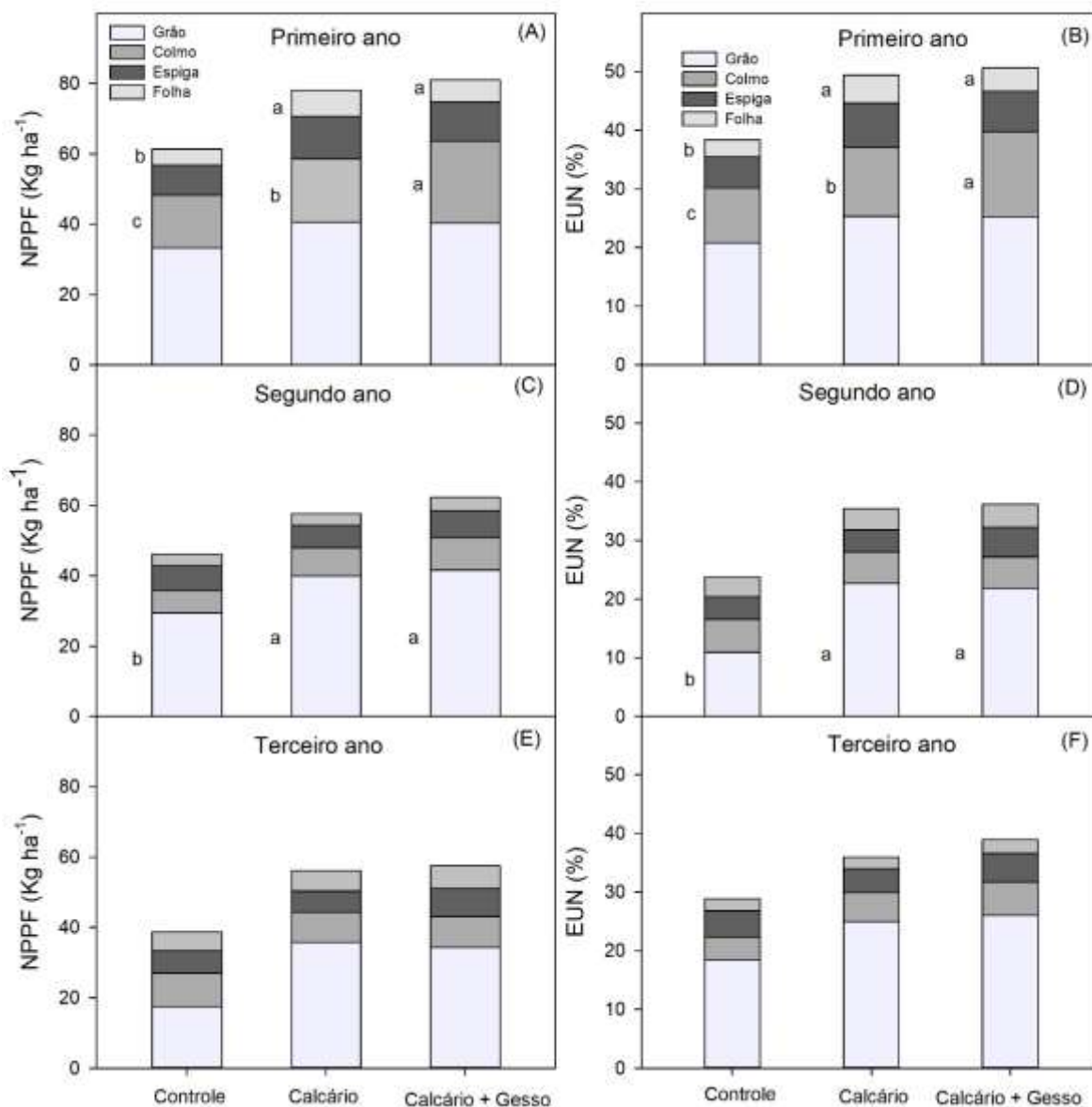
### **2.3.2 Recuperação do nitrogênio proveniente do fertilizante pelo milho**

A correção do solo resultou em maior quantidade de N proveniente do fertilizante nos grãos comparados ao colmo, espigas e folhas do milho (Figura 3). Foi observada interação da aplicação de corretivos de acidez do solo com o aplicado no acúmulo de N nas frações da planta de milho (grãos, colmo, espigas e folhas) para o primeiro ano de cultivo (Figura 3. A e B).

A maior recuperação de N nos colmos foi obtida no tratamento com aplicação do calcário associado ao gesso, seguido pelo tratamento com calcário aplicado isoladamente, e o menor valor foi obtido no tratamento sem correção da acidez do solo. Nas folhas do milho, no primeiro ano (Figura 3. C e D), houve maior acúmulo de N no solo com acidez corrigida pelo calcário, independente da sua associação ou não ao gesso.

O acúmulo de N nos grãos e espigas do milho não foi afetado pelos corretivos de acidez no primeiro ano (Figura 3. A e B). No segundo ano (Figura 3. C e D) foi observada diferença no acúmulo de N apenas nos grãos, onde os tratamentos com corretivos acumularam, em média, o dobro de N comparado ao tratamento sem corretivos. No terceiro ano de cultivo o acúmulo de N não foi afetado em nenhuma das partes do milho avaliadas (Figura 3. E e F).

**Figura 3 - Nitrogênio na planta proveniente do fertilizante (NPPF) e eficiência do uso do nitrogênio (EUN) em função da aplicação de corretivos de acidez do solo**



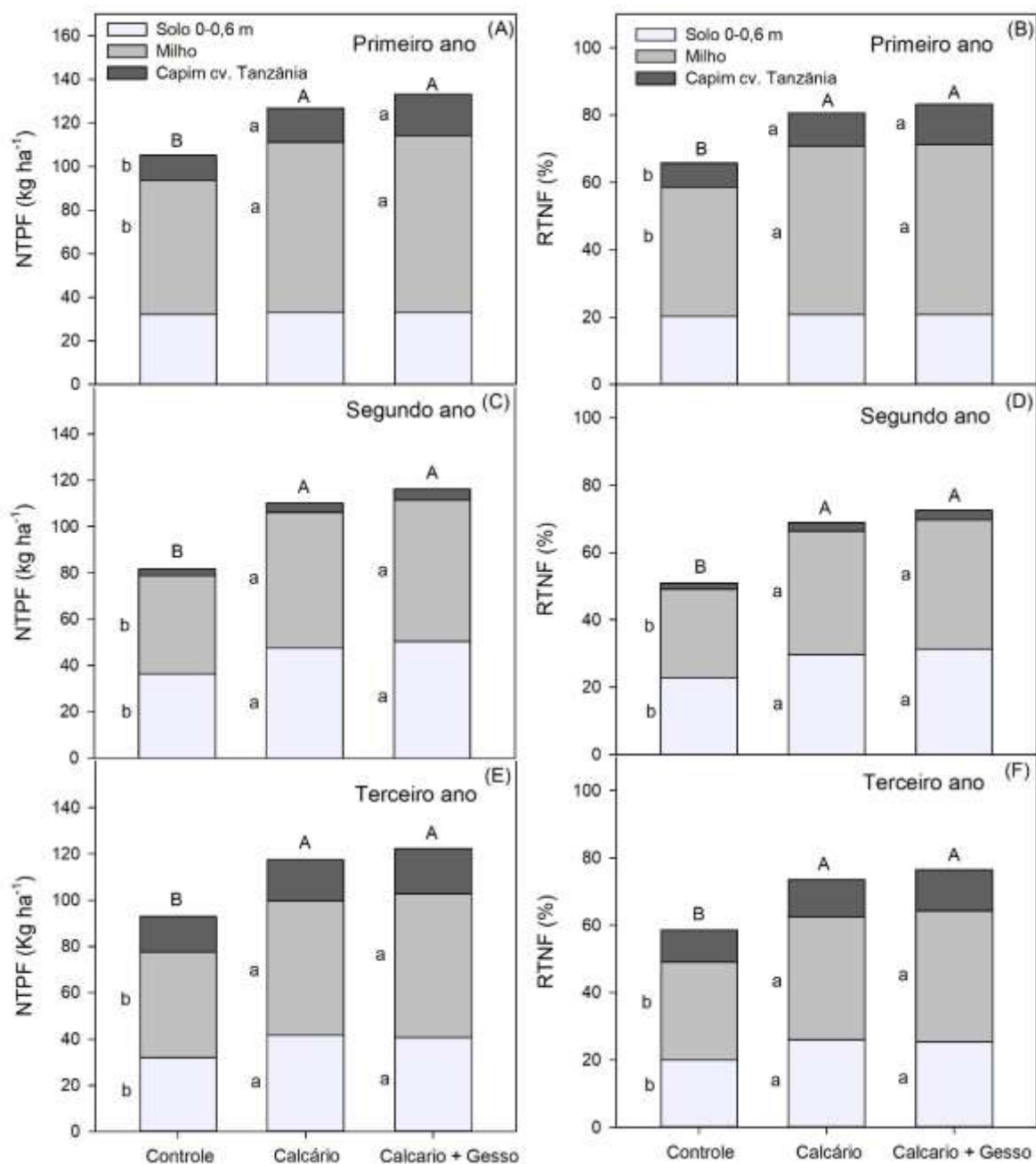
NPPF nas plantas nas entressafras 2017 (A), 2018 (C) e 2019 (E) e EUN nas entressafras 2017 (B), 2018 (D) e 2019 (F)

### 2.3.3 Nitrogênio residual recuperado

O N total é a soma do N residual no solo após a colheita do milho, sendo o N recuperado pela planta de milho (grãos, colmo, espigas e folhas) mais o N recuperado pelo Tanzânia. A recuperação total do N foi, em média, de 81% 70% e 74%, em 2017, 2018 e 2019 respectivamente, quando aplicado calcário e calcário associado ao gesso. No tratamento controle o N total recuperado no solo proveniente do fertilizante

após a colheita do milho foi de 65,7% em 2017, 48,3% em 2018 e 58,7% em 2019 (Figura 4). Esses resultados de recuperação de N total no sistema solo-planta foram significativamente menores no tratamento controle quando comparado aos tratamentos com solo corrigido.

**Figura 4 - Nitrogênio total proveniente do fertilizante (NTPF) e recuperação total do nitrogênio proveniente do fertilizante (RTNF) em função da aplicação de corretivos de acidez do solo**



NTPF nas entressafras 2017 (A), 2018 (C) e 2019 (E) e RTNF nas entressafras 2017 (B), 2018 (D) e 2019 (F)

No primeiro ano de cultivo, o milho recuperou, em média, aproximadamente 30% mais N onde o solo foi corrigido comparado ao controle (Figura 4. A e B). No segundo e terceiro anos de cultivo a correção do solo proporcionou acúmulo de N pelo milho 43,0% maior, em média, do que no solo sem correção.

O Tanzânia apresentou recuperação do N aplicado 50%, em média, com a correção da acidez do solo quando comparado ao tratamento controle apenas no primeiro ano.

Na segunda safra (Figura 4. C e D), não foi observada diferença no acúmulo de N pelo Tanzânia nos diferentes tratamentos, provavelmente devido ao déficit hídrico ocorrido no período de cultivo, o que provocou menor desenvolvimento da forragem em comparação às safras 2017 e 2019. No terceiro ano também não foi observada diferença no acúmulo de N pelo Tanzânia (Figura 4. E e F).

## **2.4 DISCUSSÃO**

### **2.4.1 Nitrogênio residual no solo proveniente do fertilizante**

Embora a aplicação dos corretivos não tenha afetado o N residual nos primeiros 0,10 m de profundidade do solo, foi encontrado mais N proveniente do fertilizante nesta camada em relação às demais. Um outro fator que pode ter contribuído para a permanência do nitrogênio na camada superficial do solo é a baixa precipitação no período de cultivo do milho segunda safra, principalmente em março, que acumulou aproximadamente 164 mm de chuva, em média dos três anos de condução do experimento (Figura 1). De acordo com Dynia et al. (2006) a quantidade de água da chuva após a aplicação do fertilizante é fator determinante para a lixiviação do nitrato para as camadas mais profundas do solo.

Na camada 0-0,2 m de profundidade foram encontrados, em média, 15 % do N proveniente do fertilizante. Alves et al. (2006) relataram que 24% do N adicionado em cobertura na cultura do milho segunda safra permaneceu na camada 0-0,2 m. A maior porcentagem observada pelos autores em comparação ao presente estudo pode ser devido ao milho não ser consorciado, pois uma das principais funções das plantas cultivadas em consórcio, além de fornecer biomassa ao SSD, é absorver o N que fica sujeito a perdas no solo e, conseqüentemente, aumentar a eficiência do N no sistema (Rosolem et al., 2017). Dessa forma, quando o milho não é cultivado em consórcio,

maior quantidade de N fica sujeita às perdas por volatilização ou lixiviação. Além disso, o consórcio com uma gramínea de sistema radicular agressivo e profundo podem reduzir perdas de N ou evitar que grande quantidade de N seja lixiviada no perfil do solo.

Na camada 0,1-0,2 m de profundidade observou-se maior acúmulo no tratamento controle, sem correção de acidez do solo (Figura 2), o que pode ser explicado pelo fato dos corretivos do solo afetarem a movimentação do N pela formação de sais solúveis de  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  no subsolo (Caires, 2013), em função da aplicação de calcário e gesso e interação com o N proveniente do fertilizante. O maior acúmulo observado nas camadas 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m indica que houve movimentação do N para camadas mais profundas do solo após aplicação dos corretivos. Há maior disponibilização de Ca e N em profundidade, o que pode resultar em um maior crescimento radicular das culturas (Rosolem et al., 1998) e, consequentemente, aumenta o uso e eficiência de uso do nutriente, sendo o N disponível no subsolo absorvido pelo o capim Tanzânia. De acordo com Rosolem et al. (2017) as gramíneas podem desempenhar uma importante função na absorção de N disponível no solo e na ciclagem de nutrientes, podendo após a dessecação do capim, tornar novamente disponível para a cultura subsequente. O melhor desenvolvimento do sistema radicular resulta em maior exploração do solo (Galdos et al., 2020) e desempenha um papel crucial na aquisição de água e na eficiência do uso de nitrogênio (Williamson et al., 2001). Em muitos anos, esse período de cultivo do milho segunda safra é caracterizado pela escassez de chuvas em regiões de clima tropical (Borém et al., 2015) com diminuição da produtividade das lavouras devido ao estresse hídrico, tornando mais importante ter um sistema radicular profundo para aquisição de nutrientes e água em período de deficiência hídrica ao longo do ciclo de cultivo.

#### **2.4.2 Recuperação do nitrogênio proveniente do fertilizante pelo milho**

Este é o primeiro trabalho sobre a recuperação de N pelo milho segunda safra consorciado com Tanzânia cultivado em solos com acidez corrigida. Outros estudos foram realizados com milho cultivado na estação com maior precipitação (safra de verão), sem utilização de consórcio com outras culturas (Rocha et al., 2019; Almeida et al., 2017). Em geral, quando a acidez do solo foi corrigida, a quantidade de  $^{15}\text{N}$  recuperada pela parte aérea do milho consorciado com Tanzânia esteve dentro da faixa relatada em estudos anteriores, de 15% a 60% (Coelho et., 1991; Gava et al.,

2006; Almeida et al., 2017), embora essa faixa seja extremamente larga. Com base na porcentagem de recuperação de  $^{15}\text{N}$  na parte aérea do milho, pode-se perceber que a correção da acidez do solo afeta a eficiência de absorção de N pelo milho, que apresentou maior porcentagem de recuperação quando o solo foi corrigido, acumulando, em média, cerca de 41,6% mais N do fertilizante que no tratamento controle.

Metade do N proveniente do fertilizante foi encontrado nos grãos de milho, independente da aplicação de corretivos. De acordo com Silva et al. (2006), 55% do N proveniente do fertilizante acumulado pelo milho é translocado para os grãos. Desta forma, pode-se inferir que esse é um comportamento padrão da cultura do milho (Figura 3).

#### **2.4.3 Recuperação total do nitrogênio proveniente do fertilizante**

A correção do solo foi eficiente em aumentar a utilização do N proveniente do fertilizante pelas plantas de milho (Figura 4). Foram recuperados, em média, 81,5% no primeiro ano, 70,7% no segundo ano e 74,8% no terceiro ano. Esses resultados estão de acordo com Coelho et al. (1991), que observaram recuperação de 79% do N aplicado ao milho, embora cultivado na safra verão. Desta forma, as diferenças em temperatura e umidade da safra regular para a segunda safra parecem não afetar significativamente a dinâmica do N no sistema como um todo.

No geral, a porcentagem de acúmulo de N proveniente do fertilizante não foi maior que 50% nas plantas de milho. Alves et al. (2006) relataram EUN de 48% para a cultura do milho da safra verão, aplicando  $115 \text{ kg ha}^{-1}$  de N. Estes valores encontrados para EUN estão na faixa de variação observada em diversos estudos, indicando que a EUN é baixa e normalmente não supera 60% (Lara Cabezas et al., 2005; Alves et al., 2006; Gava et al., 2006; Duete et al., 2008).

Devido à EUN pelas plantas de milho ser baixa, uma parte do N absorvido tem como origem o N inorgânico e orgânico presente no solo. Silva et al. (2006) observaram dependência de até 75% do N oriundo do solo ou de outra fonte. Isto sugere que quanto maior a recuperação de N proveniente do fertilizante, menor quantidade de N orgânico do solo é absorvida pelas plantas, o que pode aumentar a disponibilidade do N orgânico do solo para a cultura subsequente. Ainda, nota-se que a quantidade total de N proveniente do fertilizante recuperado no solo foi afetada pela aplicação dos corretivos de acidez do solo nos três anos avaliados, ocorrendo maior

recuperação no solo com acidez corrigida (Figura 4). Sendo assim, parte do N proveniente do fertilizante pode não ser utilizado pela cultura no qual foi aplicado e ficar disponível para a cultura subsequente, corroborando resultados obtidos anteriormente com milho cultivado na safra regular (Urquiaga e Zapata, 2000; Alves et al., 2006).

Desta forma, a menor recuperação do N proveniente do fertilizante no solo, no milho e no Tânzania, onde não houve correção da acidez (Figura 4 A, C e E) sugere que as perdas são maiores quando nenhum corretivo é utilizado. Apenas 50%, em média, do N absorvido pelas plantas é exportado para os grãos (Figura 3), o restante absorvido torna se disponível após a colheita dos grãos para a cultura subsequente após o processo de decomposição e ciclagem. Os resultados observados no presente estudo demonstraram que a aplicação dos corretivos de acidez do solo é uma prática eficiente em aumentar EUN do milho segunda safra consorciado com capim cv. Tanzânia, além de aumentar o N disponível para a cultura que será cultivada em subsequência.

Observou-se maior recuperação pelas plantas de milho após a correção do solo quando comparado ao tratamento controle (Figura 4), o que pode ser explicado pelo maior crescimento radicular após utilização dos corretivos (Capítulo 1). Sabe-se que a acidez do solo poder ser corrigida facilmente pela prática da calagem, proporcionando aumento do desenvolvimento do sistema radicular. De acordo com Rosolem et al. (2017), as raízes apresentam papel crucial na aquisição de N. Quaggio et al. (1985) relataram que o aprofundamento do sistema radicular ocasionou aumento significativo na absorção de N pelas plantas de milho em relação ao solo não corrigido, mostrando que a correção da acidez do solo pode aumentar a EUN. No entanto, no SSD o calcário não é incorporado ao solo e o efeito a correção da acidez do subsolo pode ser lenta (Costa e Rosolem, 2007), o que pode ser melhorado pela aplicação do calcário associado ao gesso, evidenciando ser essa uma alternativa eficiente para neutralizar a acidez do subsolo (Rosolem et al., 2017). Após ampla revisão, Ritchey et al. (1995) observaram que ocorre diminuição na concentração de  $\text{NO}_3$  no subsolo e um aumento na absorção de N pelas plantas em consequência da aplicação de gesso em solos ácidos do Brasil central, o que pode ser fundamental para maior EUN em solos tropicais ácidos. No entanto, a aplicação de calcário associado ao gesso não resultou em maior recuperação de N pelas plantas de milho, o que evidencia que, no

presente estudo, o calcário aplicado de forma isolada foi capaz de fornecer condições favoráveis para o crescimento radicular

No segundo ano o Tânzania teve seu desenvolvimento prejudicado pela restrição hídrica (Figura 1) e foi observada menor recuperação do N proveniente do fertilizante pela forrageira. No entanto, nos demais anos de cultivo, o Tânzania aumentou a EUN (Figura 4), o que pode ser atribuído ao crescimento radicular rápido e profundo da forrageira, explorando grandes volumes de solo (Barber e Cushman, 1981) e absorvendo N de partes do perfil do solo que não são acessadas pela cultura de interesse econômico, sujeitos à lixiviação e perdas para o meio ambiente (Robinson, 1986).

## **2.5 CONCLUSÕES**

Os resultados deste estudo fornecem informações importantes sobre os efeitos da correção do solo no destino de fertilizante marcado com  $^{15}\text{N}$  em um sistema de semeadura direta.

A correção da acidez do solo resulta em maior absorção do nitrogênio pelas plantas de milho segunda safra cultivado em consorcio com o capim cv. Tanzânia em sistema de semeadura direta, conseqüentemente, proporcionando maior EUN do fertilizante aplicado.

O sistema de consorcio com o capim cv. Tanzânia é uma alternativa importante para aumentar a recuperação de N no solo e maior quantidade de N torna-se disponível para a cultura subsequente, após o processo de ciclagem.

## REFERÊNCIAS

- ABRUÑA, F.; VICENTE-CHANDLER, J.; PEARSON, R. Effect of liming on yields and composition of heavily fertilized grasses and on soil properties under humid tropical conditions. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.*, 28:657-661, 1964
- ADAMS, F.; WHITE, A.W.; DAWSON, R.N (1967). Influence of lime sources and rates on coastal bermudagrass production, soil profile reaction, exchangeable Ca and Mg. *Agron. J.*, 59:147-149.
- ALMEIDA, R.E.M., OLIVEIRA, S.M., LAGO, B.C., PIEROZAN JUNIOR, C., TRIVELIN, P.C.O., FAVARIN, J.L., 2017. Palisadegrass effects on N fertilizer dynamic in intercropping systems with corn. *An. Acad. Bras. Cienc.* 89, 1917–1923. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720160811>.
- ALVES, B.J.R.; ZOTARELLI, L.; FERNANDES, F.M.; HECKLER, J.C.; MACEDO, R. A.T. de; BODDEY, R.M.; JANTALIA, C.P.; URQUIAGA, S. Fixação biológica de nitrogênio e fertilizantes nitrogenados no balanço de nitrogênio em soja, milho e algodão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 41, n. 3, p. 449–456, 2006.
- BARBER, S.A.; CUSHMAN, J.H., 1981. NITROGEN UPTAKE MODEL FOR AGRONOMIC CROPS. IN ISKANDER, J. k. (Ed.) *Modeling Waste Water Renovation- Land Treatment*. Ed. Iskander J K. pp 382–409. Wiley Interscience, New York.
- BARRIE, A.; PROSSER, S.J. Automated analysis of light-element stable isotopes by isotope ratio mass spectrometry. In: BOUTTON, T.W.; YAMASAKI, S. (Ed.). *Mass spectrometry of soils*. New York: Marcel Dekker, 1996. p. 1-46.
- BORÉM, A.; GALVÃO, J.C.C.; PIMENTEL, M.A. *Milho: do plantio à colheita*. Viçosa: Editora UFV, 2015. 351p.
- CAIRES, E.F.; CHUEIRI, W.A.; MADRUGA, E.F. & FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:27-34, 1998.
- CAIRES, E. F. Correção da acidez do solo em sistema plantio direto. *Informações agronômicas*. IPNI-International Plant Nutrition Institute, 2013.
- COELHO, A.M.; FRANÇA, G.E.; BAHIA, A.F.C.; GUEDES, G.A.A. Balanço de nitrogênio (15n) em um latossolo vermelho-escuro, sob vegetação de cerrado, cultivado com milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 15, p.187-193,1991.
- COSTA, A., ROSOLEM, C.A., 2007. Liming in the transition to no-till under a wheat–soybean rotation. *Soil and Tillage Research* 97. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.09.014>
- DUETE, R.R.C.; MURAOKA, T.; SILVA, E.C.; TRIVELIN, P.C.O.; AMBROSANO, E.J. Manejo da adubação nitrogenada e utilização do nitrogênio (15N) pelo milho em

Latossolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, n.1, p.161-171, 2008.

DYNIA, J.F.; SOUZA, M.D. de; BOEIRA R.C. Lixiviação de nitrato em Latossolo cultivado com milho após aplicações sucessivas de lodo de esgoto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.41, n.5, p.855-862, 2006.

FUENTES, J.P.; BEZDICEK, D.F.; FLURY, M.; ALBRECHT, S.; SMITH, J.L. Microbial activity affected by lime in a long-term no-till soil. *Soil Tillage & Research*, Amsterdam, v.88, n.1-2, p.123-131, 2006.

GAVA, G.J.C.; TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, M.W.; HEINRICHS, R.; SILVA, M.A. Balanço do nitrogênio da uréia (15N) no sistema solo-planta na implantação da semeadura direta na cultura do milho. *Bragantia*, v.65, n.3, p.477-486, 2006.

GALDOS, M. v., BROWN, E., ROSOLEM, C.A., PIRES, L.F., HALLETT, P.D., MOONEY, S.J., 2020. Brachiaria species influence nitrate transport in soil by modifying soil structure with their root system. *Scientific Reports* 10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61986-0>.

HAYNES, R.J. Nitrification. In: HAYNES, R.J. (Ed.). *Mineral nitrogen in the plant-soil system* Madison: Academic, 1986. p.127-165.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change: Guidelines for National Green House Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Japan: IGES, 2006. chapter 11.

LARA CABEZAS, W.A.R.; ARRUDA, M.R.; CANTARELLA, H.; PAULETTI, V.; TRIVELIN, P.C.O.; BENDASSOLLI, J.A. Imobilização de nitrogênio da ureia e do sulfato de amônio aplicado em pré-semeadura ou cobertura na cultura de milho, no sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, n. 29, p. 215-226, 2005

QUAGGIO, J.A.; RAIJ, B. van; MALAVOLTA, E. Alternative use of the SMP buffer solution to determine lime requirement of soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v.16, p.245-260, 1985.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo* 2.ed. rev. e atual. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100).

REETZ Jr., H.F., 2016. *Fertilizers and their Efficient Use*. IFA—International Fertilizer Industry Association, Paris.

RITCHIE, S.W., HANWAY, J.J. How a corn plant develops. Special report 48. Iowa State University of Science and Technology, Ames. 1986.

RITCHEY, D.K., FELDHAKE, C.M., CLARK, R.B., DE SOUSA, D.M.G., 1995. Improved Water and Nutrient Uptake from Subsurface Layers of Gypsum-Amended Soils, in: Karlen, D., Wright, R., Kemper, W. (Eds.), *Agricultural Utilization of Urban and Industrial By-Products*. <https://doi.org/10.2134/asaspecpub58.c8>

ROBINSON, D., 1986. Limits to nutrient inflow rates in roots and root systems. *Physiologia Plantarum*, 68, 551-559.

ROCHA, K.F., MARIANO, E., GRASSMANN, C.S., TRIVELIN, P.C.O., ROSOLEM, C.A., 2019. Fate of 15N fertilizer applied to maize in rotation with tropical forage grasses. *Field Crops Research* 238. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.018>

ROSOLEM, C.A.; SCHIOCHET, M.A.; SOUSA, L.S.; WITACKER, J.P.T. Root growth and cotton nutrition as affected by liming and soil compaction. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v.29, p.169-177, 1998.

ROSOLEM, C.A., FOLONI, J.S.S., OLIVEIRA, R.H., 2003. Dinâmica do nitrogênio no solo em razão da calagem e adubação nitrogenada, com palha na superfície. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 38. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000200018>

ROSOLEM, C.A., RITZ, K., CANTARELLA, H., GALDOS, M.V., HAWKESFORD, M.J., WHALLEY, W.R., MOONEY, S.J., 2017. Enhanced Plant Rooting and Crop System Management for Improved N Use Efficiency. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.07.002>

SATO, J H.; FIGUEIREDO, C.C.; MARCHÃO, R.L. et al. Understanding the relations between soil organic matter fractions and N<sub>2</sub>O emissions in a long-term integrated crop–livestock system. *Eur. J. Soil Sci.*, p. 1-14, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.12819>.

SILVA, J.E.; LEMAINSKI, J.; RESCK, D.V.S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de cerrados do oeste baiano. *R. Bras. Ci. Solo*, 18:541-547, 1994.

SILVA, C.A.; VALE, F.R. Disponibilidade de nitrato em solos brasileiros sob efeito da calagem e de fontes e doses de nitrogênio. *Pesq. Agropec. Bras.*, 35: 2461-2471, 2000.

SILVA, C.A.; VALE, F.R.; GUILHERME, L.R.G. Nitrificação em Latossolos da região sul de Minas Gerais: Efeito da acidez do solo. *Ci. Prática.*, 18:388-394, 1994.

SILVA, V.M.; TRIVELIN, P.C.O.; COLAÇO, W.; ENCARNÇÃO, F.A.F.; LARA CABEZAS, W.A.R., 1999. Mineralização e volatilização do nitrogênio da vinhaça-15N na presença ou não de ureia e de palha de cana-de-açúcar. *Scientia Agricola* 56 (1), 117–124.

SILVA E.C.; MURAOKA, T.; BUZETTI, S.; TRIVELIN, P.C. Manejo de nitrogênio no milho sob plantio direto com diferentes plantas de cobertura, em Latossolo Vermelho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.41, n.3, p.477-486, 2006.

URQUIAGA, S.; ZAPATA, F. Manejo eficiente de la fertilización nitrogenada de cultivos anuales en América Latina y el Caribe Porto Alegre: Gênese, 2000. 110p.

USDA, 2014. Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. Soil Survey Staff.

WILLIAMSON, L.C.; RIBRIOUX, S.P.C.P.; FITTER, A.H.; LEYSER, H.M.O., 2001. Phosphate Availability Regulates Root System Architecture in Arabidopsis. *Plant Physiology* 126. <https://doi.org/10.1104/pp.126.2.875>.

### CAPÍTULO 3

## USO E EFICIÊNCIA DE CARBONO APÓS A APLICAÇÃO DE CALCÁRIO E GESSO EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO

### RESUMO

O solo é um sistema complexo e o uso de calcário e gesso pode influenciar a eficiência do uso do carbono (C) por meio da estequiometria dos nutrientes. O carbono total do solo é frequentemente considerado em relação ao potencial de sequestro de carbono, mas neste estudo foi quantificado o uso e a eficiência do carbono nos solos após a adição de glicose como um fator para o potencial sequestro de carbono. Foram realizados dois experimentos. No primeiro experimento, foi avaliada a adição de <sup>14</sup>glicose em solo com acidez corrigida com calcário + gesso, calcário e um tratamento controle (sem correção de acidez), com ou sem aplicação de nitrogênio (N) no campo. No segundo experimento foram utilizados apenas os tratamentos calcário + gesso e controle e foram adicionados, juntamente com a glicose, N e fósforo (P). Em uma incubação de laboratório, as amostras de solo receberam os tratamentos e foram mantidas a 25 °C. A respiração microbiana do solo (emissão de CO<sub>2</sub>) foi medida após 14 e 42 dias de incubação. No primeiro experimento, a eficiência de uso do carbono (EUC) na superfície foi maior no solo corrigido com calcário e calcário + gesso quando o N foi adicionado ao sistema de cultivo. Do mesmo modo, a aplicação do calcário associado ao gesso e do calcário aplicado isoladamente resultou em um EUC superior no subsolo em relação ao tratamento sem correção da acidez no sistema de cultivo sem adição de N. No segundo experimento, a aplicação de glicose (G)+N+P e G+P proporcionaram os maiores EUC na superfície comparados à aplicação de G quando o solo foi corrigido com calcário + gesso, enquanto no subsolo a aplicação de G+N e G+N+P proporcionaram EUC superior às aplicações de G e G+P, independente da correção da acidez. Diferenças na resposta de médio prazo na evolução <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> sugeriram que a eficiência no uso do C pelos microrganismos foi maior em solos com acidez corrigida. A adição de N e P promoveu maior eficiência de uso do carbono, sugerindo que a comunidade microbiana sofre influência pelas restrições e disponibilidade de nutrientes no perfil do solo, mesmo após a correção da acidez.

**Palavras-chave:** nitrogênio; fósforo; respiração microbiana; carbono microbiano.

## ABSTRACT

Soil is a complex system and the use of lime and gypsum can influence the carbon (C) efficiency use through nutrient stoichiometry. Total soil carbon is often considered in relation to carbon sequestration potential, but in this study it was quantified soil carbon use and efficiency after glucose addition as a factor for carbon sequestration potential. Two experiments were performed. In the first experiment, the addition of  $^{14}\text{C}$  glucose was evaluated in soil with acidity corrected with lime + gypsum, lime and a control treatment (without acidity correction), with or without application of nitrogen (N) in the field. In the second experiment, only the lime + gypsum and control treatments were used, together with glucose, N and phosphorus (P). In a laboratory incubation, soil samples received treatments and were kept at 25 °C. Soil microbial respiration ( $\text{CO}_2$  emission) was measured after 14 and 42 days of incubation. In the first experiment, the surface carbon use efficiency (EUC) was higher in soil corrected with lime and lime + gypsum when N was added to the cropping system. Likewise, the application of lime associated with gypsum and lime applied alone resulted in a higher EUC in the subsoil compared to the treatment without acidity correction in the cultivation system without N addition. In the second experiment, the application of glucose (G)+N+P and G+P provided the highest EUC on the surface compared to the application of G when the soil was corrected with lime + gypsum, while in the subsoil the application of G+N and G+N+P provided superior EUC to the applications of G and G+P, regardless of acidity correction. Differences in the medium-term response in the  $^{14}\text{CO}_2$  evolution suggested that the efficiency in the use of C by the microorganisms was higher in soils with corrected acidity. The addition of N and P promoted greater efficiency of carbon use, suggesting that the microbial community is influenced by the restrictions and availability of nutrients in the soil profile, even after acidity correction.

**Keywords:** nitrogen; phosphorus; microbial respiration; microbial carbon.

### 3.1 INTRODUÇÃO

As práticas de manejo do solo influenciam a estrutura da comunidade microbiana, assim como os processos bioquímicos, por meio de mudanças na quantidade e qualidade dos resíduos vegetais presentes (Christensen, 1996). A aplicação de calcário, aumentando o pH, resulta em mudança na dinâmica e

diversidade microbiana, assim como na atividade enzimática (Zelles et al., 1990; Acosta-Martinez and Tabatabai, 2000), além do efeito priming na emissão de CO<sub>2</sub> do solo (LAL, 2009).

A dinâmica do C no perfil do solo é modificada e os processos que regulam o armazenamento de C em superfície e no subsolo podem ser diferentes (Salome et al., 2010; Sanaullah et al., 2011). Além disso, a população microbiana pode ser diferente de acordo com a profundidade do solo devido à quantidade e qualidade de substrato (mais recalcitrante e menos biodegradável) e, portanto, podem ocorrer populações microbianas especializadas na transformação dos substratos adicionados ao subsolo (Rovira e Vallejo, 2002; Salome et al., 2010). Sendo assim, alguns autores relatam maior eficiência no uso do C pelas comunidades microbianas do subsolo devido a uma limitação permanente do C disponível (Fierer et al., 2003; Blagodatskaya et al., 2007).

O metabolismo microbiano tem sido amplamente estudado utilizando técnicas isotópicas que possibilitam quantificar o destino de substratos marcados com <sup>14</sup>C aplicados em solos pela liberação de <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> através da respiração microbiana. Na biomassa microbiana, o C é imobilizado como componente estrutural para crescimento em processos anabólicos (crescimento e manutenção celular) ou mineralizado como CO<sub>2</sub> para manutenção das células (respiração) em processos catabólicos (Glanville et al., 2016). Sendo assim, os fatores que controlam a transformação do C pela biomassa microbiana na formação do C orgânico do solo (COS) por imobilização (Qiao et al., 2019) e a disponibilidade de nutrientes inorgânicos (ex. N, P, S) são considerados importantes no controle das taxas de armazenamento de COS (Creamer et al., 2016), e foram reconhecidos como processos associados à eficiência uso do C (EUC) pela biomassa microbiana do solo (Creamer et al., 2014).

Assim, a adição de nutrientes ao solo altera o conteúdo de C, pois, na ausência de outros fatores que limitem a transformação dos substratos (por exemplo, pH, água, disponibilidade de oxigênio), quando as quantidades de nutrientes não são limitantes, o crescimento microbiano pode ser eficiente em aumentar o C do solo (Cleveland e Liptzin, 2007; Fierer et al., 2003; Sinsabaugh et al., 2013).

Aumentos no teor de C no solo em resposta à adição de nutrientes têm sido atribuídos de forma variável a aumentos na produtividade líquida de resíduos produzidos acima do solo pelas plantas (Nadelhoffer et al., 1998, Magnani et al.,

2007). Entretanto, a exigência e eficiência relativa dos microrganismos muitas vezes não são consideradas e podem apresentar resposta à adição de nutrientes, principalmente em diferentes profundidades do solo, devido a mudanças heterogêneas na composição da comunidade microbiana.

Alguns autores sugerem que, sob limitação nutricional no solo, os microrganismos podem decompor a MOS para obter nutrientes, de modo que, após a adição de nutrientes, essa “mineração” pela ação microbiana diminui e, consequentemente, os estoques de COS devem aumentar (Craine et al., 2007, Billings e Ziegler, 2008). Assim sendo, a hipótese é que: (i) a aplicação de gesso e calcário em solos ácidos seja capaz de criar condições favoráveis para os microrganismos do solo que atuam na transformação do C adicionado ao solo e no aumento do conteúdo de C orgânico; (ii) o C que não é usado para o crescimento como resultado da limitação de nutrientes é redirecionado para respiração de transbordamento, de modo que a aplicação de nutrientes aumentaria a quantidade de C na biomassa microbiana; (iii) consequentemente o EUC seria aumentado em solos com adição de nutrientes. O objetivo do estudo foi avaliar a EUC através da evolução do CO<sub>2</sub> liberado da respiração microbiana na superfície e subsolo, em solo com acidez corrigida ou não, com ou sem aplicação de N, bem como com aplicação dos nutrientes N e P juntamente à glicose.

## **3.2 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.2.1 Características do local do solo coletado**

Amostras de solo foram coletadas em um experimento sob sistema de semeadura direta (SSD) localizado em Botucatu, SP, Brasil (770 m acima do nível do mar; 22° 51'S; 48° 26'W). O solo é classificado como Typic Hapludox (USDA, 2014), bem estruturado, de textura argilosa (547 g kg<sup>-1</sup> de areia, 109 g kg<sup>-1</sup> de silte e 343 g kg<sup>-1</sup> de argila). O Clima, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cwa, subtropical, seco durante o outono-inverno e estação quente e chuvosa durante a primavera-verão. A temperatura média anual é de 23,2 °C e a precipitação média anual é de 1400 mm.

O experimento teve soja cultivada no verão, seguida de milho consorciado com capim colônia cv. Tanzânia (*Megathyrsus maximus*), desde outubro de 2016, quando calcário e gesso foram aplicados para corrigir a acidez do solo, antes da semeadura

da primeira safra de soja, e novamente em outubro de 2017. Nitrogênio (N) foi aplicado anualmente na forma de sulfato de amônio no milho consorciado ao capim Tanzânia nas doses 0 e 240 kg ha<sup>-1</sup>. Antes da instalação do experimento a área permaneceu em pousio, com vegetação espontânea.

As amostras de solo para realização do experimento com <sup>14</sup>C foram coletadas em setembro de 2019, em duas profundidades, 0 - 0,1 m e 0,4 - 0,6 m. O experimento consistiu de um fatorial 3 x 2, onde o primeiro fator foi a aplicação de corretivos de acidez do solo (calcário, calcário + gesso e um tratamento controle, sem correção de acidez) e o segundo fator foi a aplicação de N (doses 0 e 240 Kg<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>), aplicados ao milho consorciado com capim colônia.

### 3.2.2 Experimento 1 - Eficiência de uso do C

Para avaliação da dinâmica do metabolismo da comunidade microbiana do solo em usar C nas camadas 0-0,1 e 0,4-0,6 m, foi utilizado como substrato a D-glicose marcada com <sup>14</sup>C, que foi escolhida porque representa uma fonte comum incorporada em solos ácidos por resíduos de plantas, classificada como prontamente útil para a utilização microbiana (Roberts e Jones, 2012).

O teor de água das amostras de solo foi medido gravimetricamente (24h a 105 °C), para posterior experimentação. Amostras de 5 g de solo foram acondicionadas em frascos de polipropileno de 50 ml, pré-incubadas e reumedecidas a 65% da capacidade de retenção de água e mantidas a 25 °C por 72h para restaurar a atividade microbiana (Haney et al., 2004). Após a incubação, foram adicionados a cada amostra 0,25 mL de solução 10 mM contendo D-glicose marcada com <sup>14</sup>C com atividade específica de 1,8 kBq ml<sup>-1</sup> (Sigma Aldrich Company Ltd., EUA), distribuída de forma homogênea sobre o solo. Um frasco de polipropileno contendo 1 mL de NaOH 1 M foi acomodado acima do solo para reter o <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> respirado, imediatamente após a adição de D-glicose marcada com <sup>14</sup>C. Os tubos foram então selados e incubados a 23 °C, e as armadilhas para reter o CO<sub>2</sub> contendo NaOH foram trocadas após 1, 3, 6, 9, 24 h e, em seguida, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 14 dias após a adição de <sup>14</sup>C. Imediatamente após a troca das armadilhas de NaOH, a solução contendo 1 mL de NaOH e <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> liberado do solo foi misturada com 4 mL da solução de cintilação (Optiphase HiSafe 3®, Perkin Elmer Inc., Waltham, MA, EUA) e a quantidade de <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> foi determinada usando um contador de cintilação líquida Wallac (Wallac EG&G, Milton Keynes, UK).

Para determinar quanto  $^{14}\text{C}$ -glicose permaneceu no solo no final da incubação, aos 14 dias, a quantidade de  $^{14}\text{C}$ -glicose absorvida na fase sólida ou na solução do solo foi extraída com solução de  $\text{K}_2\text{SO}_4$  0,5 M a 1:5 (p/v) (Jones & Willett, 2006; Glanville et al., 2016). Após a extração, 1 ml do sobrenadante foi misturado com 4 ml de solução de cintilação conforme descrito anteriormente e foi determinada a quantidade de  $^{14}\text{C}$  usando um contador de cintilação líquida.

A imobilização microbiana de  $^{14}\text{C}$ -glicose ( $^{14}\text{Cim}$ ) no final do período de incubação foi estimada seguindo as equações:

$$^{14}\text{Cim} = ^{14}\text{C}_{\text{tot}} - ^{14}\text{CK}_2\text{SO}_4 - ^{14}\text{CO}_2 \quad (1)$$

onde  $^{14}\text{C}_{\text{tot}}$  é a quantidade total de  $^{14}\text{C}$ -glicose adicionada ao solo no tempo (t) = 0,  $^{14}\text{CK}_2\text{SO}_4$  é a quantidade de  $^{14}\text{C}$  recuperada no extrato de 0,5 M  $\text{K}_2\text{SO}_4$  e  $^{14}\text{CO}_2$  é a quantidade total de  $^{14}\text{C}$  recuperado como  $^{14}\text{CO}_2$ .

No contexto da eficiência de uso de carbono (EUC), que é definida como a quantidade de C na biomassa microbiana em relação à soma de C na biomassa microbiana e C respirado como  $\text{CO}_2$  usando a equação:

$$\text{EUC} = \text{Cim} / (\text{Cim} + ^{14}\text{CO}_2) \quad (2)$$

### 3.2.3 Experimento 2. - Controles estequiométricos na decomposição de carbono

Neste estudo, foram escolhidos apenas os tratamentos de campo onde foram aplicados calcário + gesso e o tratamento controle (sem correção de acidez) sem aplicação de N.

Amostras de 5 g solo foram colocadas em tubos de polipropileno de 50 ml, umedecidas a 65% da capacidade de retenção de água. Os tubos foram tampados e pré-incubados no escuro a 22°C por 72h (Haney et al., 2004). Após a pré-incubação, assim como no primeiro experimento, foram adicionados 0,25 mL de solução 10mM contendo D-glicose marcada com  $^{14}\text{C}$  com atividade específica de 1,8 kBq  $\text{ml}^{-1}$  (Sigma Aldrich Company Ltd., EUA), sendo também adicionado junto com a glicose marcada uma taxa equivalente de nutrientes N e P (fósforo) na razão de 75: 8,75: 1 C: N: P com base em valores publicados na literatura para comunidades microbianas do solo (Banerjee e Chapman, 1996; He et al., 1997; Chowdhury et al., 1999, 2000; Cleveland

e Liptzin, 2007). Com base na quantidade de  $^{14}\text{C}$ -glicose, N e P foram calculados para se obter uma razão de 75:8 de N e 75:1 P, em seguida adicionados em solução, utilizando como fonte  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  para o N e  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  para o P.

Após a adição das soluções de glicose + nutrientes, 1 ml de NaOH 1 M foi colocado nos tubos, que foram tampados para capturar o  $^{14}\text{CO}_2$  respirado, assim como descrito anteriormente no experimento 1. As armadilhas de NaOH para capturar o  $^{14}\text{CO}_2$  respirado do solo foram trocadas após 1, 6, 24 h e, em seguida, semanalmente durante 6 semanas (42 dias no total). Em cada amostra, a armadilha de NaOH foi substituída e 4 ml de fluido de cintilação Optiphase 'HiSafe' 3 (Perkin Elmer, Waltham MA, EUA) foram adicionados às armadilhas trocadas e a atividade de  $^{14}\text{C}$  foi determinada por contagem de cintilação líquida (LSC; Tri-Carb 3110 TR scintillation counter, PerkinElmer Inc).

No final do período de incubação (42 dias) a quantidade de  $^{14}\text{C}$ -glicose absorvida na fase sólida ou na solução do solo foi extraída com solução de  $\text{K}_2\text{SO}_4$  0,5 M a 1:5 (p/v) (Jones & Willett, 2006).

Novamente, a quantidade de  $^{14}\text{CO}_2$  nas armadilhas de NaOH foram alisadas conforme descrito no primeiro experimento, assim como os respectivos cálculos para a quantificação da  $^{14}\text{C}$ -glicose ( $^{14}\text{Cim}$ ) equação 1 e o UEC equação 2.

### 3.2.4 Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos ao teste de homogeneidade de variância (teste de Levene) e de normalidade (Shapiro-Wilk). Uma vez observadas as premissas, foi realizada a análise de variância e as médias comparadas por meio do teste t modificado ou diferença mínima significativa protegida de Fisher (LSD,  $P < 0,05$ ) utilizando o software SAS, versão 9.2.

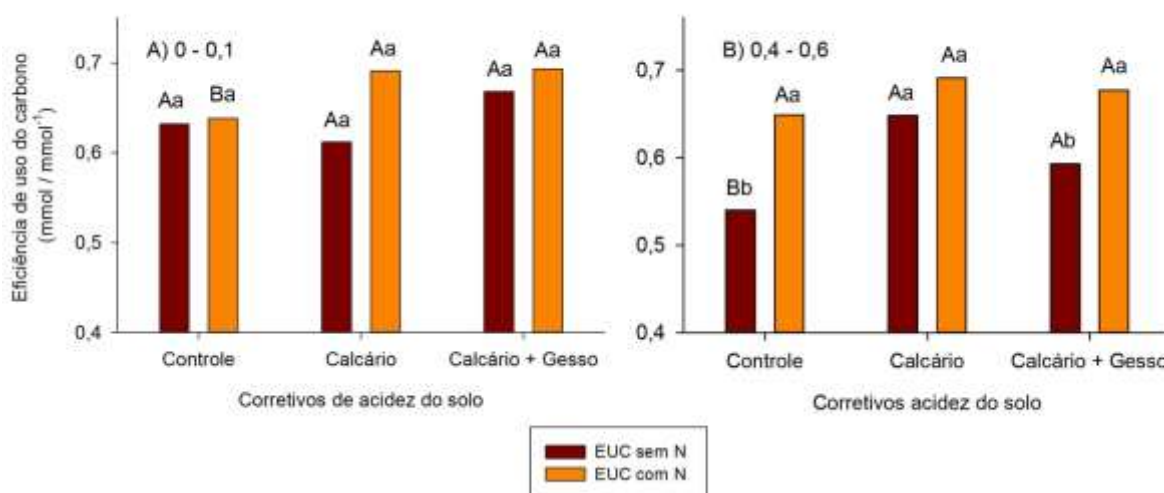
## 3.3 RESULTADOS

Na camada superficial, de 0 a 0,1 m a correção da acidez do solo resultou em maior EUC apenas no solo com N residual (Figura 1A), independente da associação ao gesso, mostrando que a aplicação dos corretivos de acidez do solo sem fertilização com N não afetou a EUC na camada superficial do solo.

No entanto, na camada do subsolo (0,4-0,6m) não foi observado efeito da correção de acidez no EUC no solo com N residual (Figura 1B). Ainda no subsolo, a aplicação de calcário, independente da sua associação ao gesso, aumentou a EUC

em relação ao controle no solo sem N residual. Quando comparados os solos com ou sem N residual, observou-se maior EUC no subsolo nos tratamentos controle (sem correção do solo) e calcário + gesso no solo com N residual, efeito que não foi observado quando o calcário foi aplicado de forma isolada.

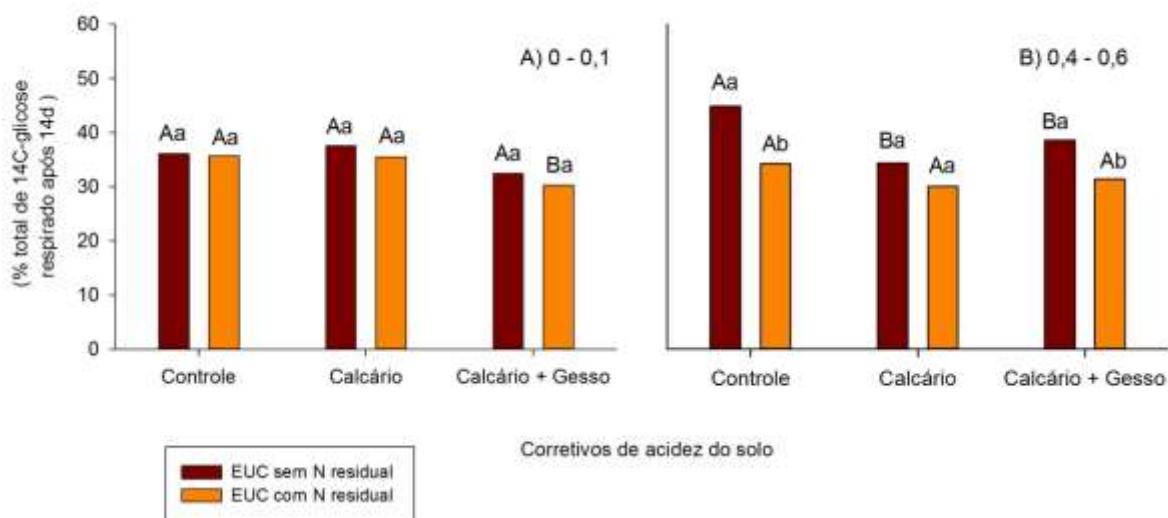
**Figura 1 - Efeito dos corretivos de acidez do solo e substrato (Glicose) na eficiência do uso do C (EUC)**



Porcentagem média do carbono inicial aplicado após 14 dias para cada tratamento (n = 5), na camada superficial 0 - 0,1 (A) e na camada do subsolo 0,4 - 0,6 (B). Letras minúsculas comparam o solo com e sem N residual no sistema de cultivo, para cada corretivo de solo, e as letras maiúsculas comparam os corretivos de solo para aplicação de N no sistema de cultivo (P > 0,05, teste LSD)

Observou-se que a aplicação de corretivos não proporcionou diferenças na evolução de  $^{14}\text{CO}_2$  para o solo sem N residual, na camada superficial 0-0,1 m (Figura 2A). No entanto, para o solo com N residual, a evolução de  $^{14}\text{CO}_2$  acumulado foi maior para os tratamentos controle e calcário.

No subsolo (0,4-0,6 m), não se observou diferença na evolução de  $^{14}\text{CO}_2$  acumulado para o solo com N residual (Figura 2B). Porém, a evolução de  $^{14}\text{CO}_2$  foi maior no solo sem N residual quando a acidez não foi corrigida. Além disso, ainda no subsolo, a maior evolução de  $^{14}\text{CO}_2$  foi obtida pelo tratamento controle (sem correção de acidez) quando o solo não apresentava N residual comparado ao solo com N residual (Figura 2B). Da mesma forma, quando a acidez do solo foi corrigida com calcário + gesso, o solo com N residual apresentou maior evolução de  $^{14}\text{CO}_2$  em relação ao solo sem N residual.

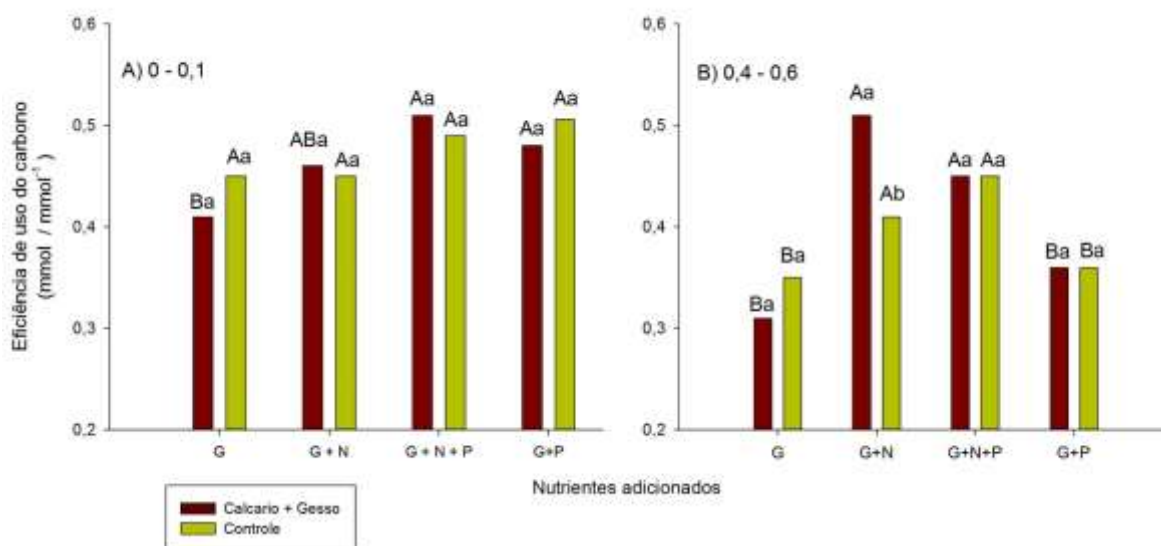
**Figura 2 - Respiração de CO<sub>2</sub> acumulada após 14d**

Letras minúsculas comparam o solo com e sem N residual no sistema de cultivo para cada corretivo de solo e as letras maiúsculas comparam os corretivos de solo para a aplicação de N no sistema de cultivo ( $P > 0,05$ , teste LSD)

Avaliando a adição de nutrientes com a glicose na camada superficial (Figura 3A), observa-se que a aplicação de G+N+P e G+P resultou em maior EUC quando comparados com a adição apenas de G no solo no solo com acidez corrigida, porém, não foram diferentes da aplicação de G+N.

No subsolo (Figura 3B), o tratamento sem adição de nutrientes obteve o menor EUC, independente da correção da acidez do solo. Assim como na camada superficial, a adição de G+N+P também resultou em maior EUC no subsolo, independente da correção da acidez, assim como a adição de G+N, o que sugere que no subsolo o N é um fator limitante para transformação do substrato. Além disso, quando foi adicionado G+N, observou-se maior EUC no solo com acidez corrigida quando comparado ao solo sem correção de acidez. A adição de P separadamente não foi eficiente em aumentar a EUC em relação ao tratamento sem adição de nutrientes, independente da correção da acidez do solo, mas ficou com EUC inferior aos tratamentos com adição de G+N e G+N+P.

**Figura 3 - Eficiência do uso de carbono (EUC)**



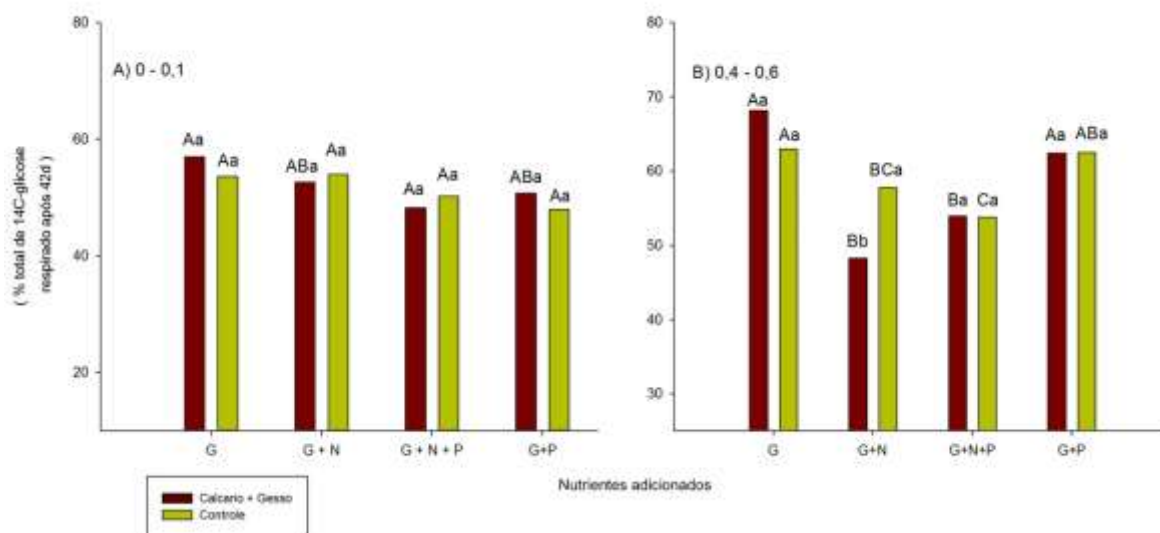
Porcentagem média de carbono inicial aplicado após 42 dias para cada tratamento ( $n = 5$ ) na superfície do solo 0-0,1 (A) e no subsolo 0,4-0,6 m (B). Letras maiúsculas comparam adição de glicose (G), nitrogênio (N) e fósforo (P) para cada corretivo de solo e as letras minúsculas comparam os corretivos de solo para cada nutriente adicionado no sistema de cultivo ( $P > 0,05$ , teste LSD)

A evolução de  $^{14}\text{CO}_2$  na camada superficial não foi influenciada pela adição de nutrientes no solo sem correção de acidez (Figura 4A). Para o solo com acidez corrigida, observou-se menor evolução de  $^{14}\text{CO}_2$  após a adição de G+N+P quando comparado ao tratamento com adição apenas de G, tanto na superfície quanto no subsolo (Figura 4A e 4B, respectivamente), em consequência do maior EUC (Figura 3A).

Além disso, na camada do subsolo a adição de G+N+P também resultou em menor evolução de  $^{14}\text{CO}_2$  comparado à adição apenas de G+P, independente da correção da acidez (Figura 4B). Também se observou menor evolução de  $^{14}\text{CO}_2$  após adição de G+N em relação à adição somente de G.

A adição de G+N resultou em menor evolução  $^{14}\text{CO}_2$  no subsolo para o tratamento com acidez corrigida em relação ao solo sem correção da acidez (Figura 4B).

**Figura 4. Respiração de CO<sub>2</sub> acumulada após 42d**



Letras maiúsculas comparam adição de glicose (G), nitrogênio (N) e fósforo (P) para cada corretivo de solo e as letras minúsculas comparam os corretivos de solo para cada nutriente adicionado no sistema de cultivo ( $P > 0,05$ , teste LSD)

### 3.4 DISCUSSÃO

Embora as ligações na superfície dos minerais desempenhem um papel importante na proteção do C (Kramer et al., 2010; Kleber et al., 2015), os microrganismos que atuam no processo de transformação da MOS (Jenkinson, 1988) são cada vez mais reconhecidos como impulsionadores dominantes da formação da MOS e da estabilização a longo prazo, visto que, a transformação da matéria orgânica (ou seja, o substrato adicionado no solo), pode contribuir para aumentar as taxas de sequestro de C no solo ou então os níveis de CO<sub>2</sub> emitidos na atmosfera (Glanville et al., 2016). Observou-se maior EUC, consequentemente, menor evolução <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> em solos com acidez corrigida, o que pode ser explicado pelo menor teor de Al e valores de pH mais elevados após correção da acidez, pois sabe-se que quando a comunidade microbiana é exposta a altos teores de Al e baixos valores de pH ocorrem mudanças metabólicas que promovem maior mineralização do C lábil e maior taxa é perdida pela via respiratória (Jones et al., 2019). Barcelos et al. (2021) relataram que a EUC, após a adição de <sup>14</sup>C-glicose em solos com acidez corrigida, não apresentou diferenças em relação ao solo sem correção de acidez. No presente estudo, observou-se maior EUC e, consequentemente, menor evolução de <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> originado da <sup>14</sup>C-

glicose em solos com acidez corrigida, o que sugere que a correção da acidez do solo não aumenta a emissão de CO<sub>2</sub> para atmosfera.

Os valores da EUC para <sup>14</sup>C-glicose foi, em média, de 0,71, valores semelhantes aos relatados em outros estudos que avaliaram EUC (Sinsabaugh et al., 2013, Jones et al., 2018, 2019, Barcelos et al., 2021). O solo com N residual não apresentou maior EUC para os tratamentos com acidez corrigida no subsolo, provavelmente devido a restrições de nutrientes, considerando outros nutrientes além do N (Commichau et al., 2006), como por exemplo o P.

A possível restrição no solo sem N residual também diminui o C derivado da glicose no subsolo ao final de duas semanas, tanto em solo com acidez corrigida quanto no tratamento controle, resultando em menor EUC. Em alguns estudos, o início da decomposição da MOS pode ocorrer após a adição de nutrientes, enquanto em outros, efeitos negativos ou nenhum efeito foi relatado (Conde et al. 2005; Janssens et al., 2005; van Hees et al., 2005). Este fato pode explicar a ausência de resposta entre o solo com N residual e sem N residual quando o calcário foi aplicado de forma isolada.

As evidências encontradas neste estudo sugerem que, embora a C-glicose possa ser transportada para a célula, ela não foi prontamente usada na respiração quando foi adicionada com G+N+P. Potencialmente, este C está sendo alocado para o armazenamento interno ou para outras estruturas ricas em C (Russel, 2007, De Goffau et al., 2009, Lebre et al., 2017). O ciclo do C está associado ao ciclo do N, e o N é considerado um dos elementos mais limitantes à produção de biomassa. A entrada de N via adubação nitrogenada (mineral, orgânica) ou por plantas fixadoras, está associada ao sequestro de C em solos agrícolas (SANTI et al., 2003). De acordo com Raphael et al. (2016), a rotação de culturas com elevada concentração de N promove aumento na entrada de C no solo. Com a adição de G+P, potencialmente aumentou o teor de P disponível no solo, criando um estado de limitação para outros nutrientes como o N no subsolo, provavelmente resultando na inibição da EUC e decomposição do C derivado da C-glicose. Entretanto, a adição de G+N+P resultou no aumento EUC. A restrição de nutrientes em solos agrícolas, por exemplo N e P, tem sido conhecida como um fator limitante para o ciclo do C (Elser et al., 2007), e essa limitação é mais evidente em solos que sofreram um alto intemperismo (Harpole et al., 2011).

O equilíbrio estequiométrico pode ser considerado uma alternativa para aumentar o C orgânico do solo e a adição de nutrientes pode favorecer a formação de MOS por processos anabólicos de decomposição microbiana da transformação dos substratos derivados de microrganismos. Por outro lado, sob limitação de nutrientes, os microrganismos podem decompor a MOS para obter nutrientes, de modo que, após a adição de nutrientes, essa mineração microbiana pode diminuir e, consequentemente, os estoques de COS devem aumentar (Sinsabaugh et al., 2006). No entanto, o incremento da COS ainda depende da interação dos mecanismos de estabilização como agregação, associações organo-minerais ou humificação (Kirby et al., 2016). Se as necessidades nutricionais para construir a biomassa microbiana forem atendidas (ou seja, estequiometria de nutrientes), esse C em decomposição deve ser usado para construir a biomassa microbiana em vez de ser respirado com CO<sub>2</sub> (Schimel e Weintraub, 2003, Hessen et al., 2004, Sinsabaugh et al., 2009).

Para os microrganismos, comunidades e ecossistemas, a respiração pode variar com as condições locais porque o fornecimento de nutrientes e outros fatores ambientais afetam as respostas dos microrganismos, consequentemente a respiração de CO<sub>2</sub> (Agren & Wetterstedt, 2007; Wagai et al., 2013). Alternativamente, a limitação do crescimento da microbiota do solo causada pela disponibilidade limitada de um elemento essencial pode afetar a taxa de CO<sub>2</sub> relacionado ao crescimento microbiano do solo, diminuindo a EUC (Sinsabaugh et al., 2013). A regulação das comunidades microbianas por diferentes fatores de controle e limitações de nutrientes em profundidade, foi endossado antes por alguns estudos que exploram a dinâmica do C em profundidade (Fierer et al., 2003; Tian et al., 2017).

A ausência de qualquer efeito neste estudo com a adição apenas de glicose, uma fonte lábil de C sugere que as concentrações de minerais no solo tropical não são as relações ideais de C: N: P para suprir as necessidades da comunidade microbiana para a decomposição do substrato. Este fato pode refletir uma forma mais ativa e abundante da comunidade microbiana, portanto, mais C é usado na respiração (Fontaine et al., 2003).

A EUC das comunidades microbianas varia com as condições ambientais, disponibilidade de substrato, estequiometria, estado fisiológico e composição da comunidade (Manzoni et al., 2012). Por exemplo, a produtividade pode ser maior em solos sob SSD e ricos em nutrientes do que em um sistema de semeadura convencional com solos ácidos. Este exemplo mostra que tanto as restrições

ambientais quanto o suprimento de nutrientes precisam ser considerados ao interpretar os padrões de EUC em ecossistemas agrícolas.

### **3.5 CONCLUSÕES**

Os resultados deste estudo fornecem informações importantes sobre os efeitos da adição de nutrientes e a transformação de substrato em solos com acidez corrigida.

A adição de nutrientes, como o N e P, pode aumentar a transformação microbiana do C potencialmente levando à maior estabilização do C e maior EUC no solo com acidez corrigida, sugerindo que a comunidade microbiana do solo é limitada pelas restrições de nutrientes minerais.

Em solos com alto grau de intemperismo o balanço estequiométrico deve ser considerado em sistemas eficientes de estabilização de C no solo.

## REFERÊNCIAS

Acosta-Martinez V., Tabatabai, M.A., 2000. Enzyme activities in a limed agricultural soil. *Biol Fertil Soils* 31, 85-91.

Ågren GI, Wetterstedt JÅM. 2007. What determines the temperature response of soil organic matter decomposition? *Soil Biology & Biochemistry* 39:1794-1798.

Banerjee, M.R.; Chapman, S.J. The significance of microbial biomass sulphur in soil. *Biol. Fertil. Soils* 1996, 22, 116–125.

Barcelos, J.P.Q.; Mariano, E.; Jones, D.L.; Rosolem, C.A. Topsoil and subsoil C and N turnover are affected by superficial lime and gypsum application in the short-term. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 163, p. 108456, 2021.

Billings, S. A., and S. E. Ziegler (2008), Altered patterns of soil carbon substrate usage and heterotrophic respiration in a pine forest with elevated CO<sub>2</sub> and N fertilization, *Global Change Biol.*, 14, 1025–1036, doi:10.1111/j.1365-2486.2008.01562.x

Blagodatskaya, E.V., Blagodatsky, S.A., Anderson, T-H, Kuzyakov, Y. Priming effects in Chernozem induced by glucose and N in relation to microbial growth strategies. *Appl Soil Ecol.* 2007;37:95–105.

Christensen, B.T., 1996. Matching measurable soil organic matter fractions with conceptual pools in simulation models of carbon turnover: revision of model structure. In: Powlson, D.S., Smith, P., Smith, J.U., Evaluation of soil organic matter models using existing long-term datasets. *Global environmental change*. Springer, Berlin Heidelberg New York, 38, 143–160.

Chowdhury, M.A.H.; Kouno, K.; Ando, T. Correlation among microbial biomass, soil properties, and other biomass nutrients. *Soil Sci. Plant Nutr.* 1999, 45, 175–186.

Chowdhury, M.A.H.; Kouno, K.; Ando, T. Critical sulphur concentration and sulphur requirement of microbial biomass in a glucose and cellulose-amended regosol. *Biol. Fertil. Soils* 2000, 32, 310–317.

Cleveland, C.C.; Liptzin, D. C:N:P stoichiometry in soil: Is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass? *Biogeochemistry* 2007, 85, 235–252.

Commichau, F.M., Forchhammer, K., Stülke, J. Regulatory links between carbon and nitrogen metabolism, *Current Opinion in Microbiology*, v.9, Issue 2, April 2006, p. 167-172.

Conde, E., Cardenas, M., Ponce-Mendoza, A., Luna-Guido, M.L., Cruz-Mondragón, C., Dendooven, L. The impacts of inorganic nitrogen application on mineralization of <sup>14</sup>C-labelled maize and glucose, and on priming effect in saline alkaline soil, *Soil Biology and Biochemistry*, v.37, n.4, April 2005, p.681-691.

Craine, J.M., Morrow, C., Fierer, N., 2007. Microbial nitrogen limitation increases decomposition. *Ecology* 88, 2105-2113.

Creamer, R.E., Schulte, R.P.O., Stone, D., Gal, A., Krogh, P.H., Lo Papa, G., Murray, P.J., Peres, G., Foerster, B., Rutgers, M., Sousa, J.P., Winding, A. Measuring basal soil respiration across Europe: Do incubation temperature and incubation period matter? *Ecological Indicators* 36:409-418, 2014.

Creamer, R.E., Stone, D., Berry, P., Kuiper, I. Measuring respiration profiles of soil microbial communities across Europe using MicroResp™ method *Appl. Soil Ecol.*, 97 (2016), pp. 36-43, 10.1016/j.apsoil.2015.08.004

Elser JJ, Bracken MES, Cleland EE, Gruner DS, Harpole WS, Hillebrand H, Ngai JT, Seabloom EW, Shurin JB, Smith JE. 2007. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters* 10:1135–1142. DOI 10.1111/j.1461-0248.2007.01113.x.

Fierer, N., J. P. Schimel, and P. A. Holden (2003), Variations in microbial community composition through two soil depth profiles, *Soil Biol. Bio-chem.*, 35, 167–176, doi:10.1016/S0038-0717(02)00251-1

Fontaine S, Mariotti A, Abbadie L (2003) The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? *Soil Biol Biochem* 35: 837–843

Glanville, H.C., Hill, P.W., Schnepf, A., Oburger, E., Jones, D.L. Combined use of empirical data and mathematical modelling to better estimate the microbial turnover of isotopically labelled carbon substrates in soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 94, 2016, 154-168.

De Goffau, M.C., Yang, X.M., van Dijk, J.M., Harmsen, H.J.M., 2009. Bacterial pleomorphism and competition in a relative humidity gradient. *Environmental Microbiology* 11, 809–822.

Haney, R.L.; Franzluebbers, A.J.; Porter, E.B.; Hons, F.M.; Zuberer, D.A. Soil carbon and nitrogen mineralization: influence of drying temperature *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68 (2004), pp. 489-492.

He, Z.L.; Wu, J.; O'Donnell, A.G.; Syers, J.K. Seasonal responses in microbial biomass carbon, phosphorus and sulphur in soils under pasture. *Biol. Fertil. Soils* 1997, 24, 421-428.

Hessen, D.O., Ågren, G.I., Anderson, T.R., Elser, J.J., Ruiter, P.C. de, 2004. Carbon sequestration in ecosystems: the role of stoichiometry. *Ecology* 85, 1179-1192.

Harpole, W.S., Ngai, J.T., Cleland, E.E., Seabloom, E.W., Borer, E.T., Bracken, M.E.S., Elser, J.J., Gruner, D.S., Hillebrand, H., Shurin, J.B., Smith, J.E., 2011. Nutrient co-limitation of primary producer communities. *Ecol. Lett.* 14, 852–862. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01651.x>

Janssens, I. A.; Freibauer, A.; Schlamadinger, B.; Ceulemans, R.; Ciais, P.; Dolman, A. J.; Heimann, M.; Nabuurs, G.-J.; Smith, P.; Valentini, R.; Schulze, E.-D. The carbon budget of terrestrial ecosystems at country-scale – a European case study. *Biogeosciences*, 2, 15–26, 2005. <https://doi.org/10.5194/bg-2-15-2005>

Jenkinson, D.S. Determination of microbial biomass carbon and nitrogen in soil. In: Wilson, J.R., (Ed.). *Advances in nitrogen cycling in agricultural systems*. Wallingford: CAB International, 1988. P.368-386.

Patrick A.W. van Hees, David L.Jones, Roger Finlay, Douglas L. Godbold, Ulla S.Lundström, The carbon we do not see—the impact of low molecular weight compounds on carbon dynamics and respiration in forest soils: a review, *Soil Biology and Biochemistry*, v.37, n.1, 2005, p.1-13.  
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.06.010>

Jones, D.L., Cooledge, E.C., Hoyle, F.C., Griffiths, R.I., Murphy, D.V., 2019. pH and exchangeable aluminum are major regulators of microbial energy flow and carbon use efficiency in soil microbial communities. *Soil Biology and Biochemistry* 138, 107584. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107584>.

Jones, D.L., Magthab, E.A., Gleeson, D.B., Hill, P.W., Sa´nchez-Rodríguez, A.R., Roberts, P., Ge, T., Murphy, D.V., 2018. Microbial competition for nitrogen and carbon is as intense in the subsoil as in the topsoil. *Soil Biology and Biochemistry* 117, 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.10.024>.

Jones, D. L., Willett, V.B., 2006. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil *Soil Biology & Biochemistry*, 38, 991- 999.

Kirkby, C.A., Kirkegaard, J.A., Richardson, A.E., Wade, L.J., Blanchard, C., Batten, G., 2011. Stable soil organic matter: a comparison of C: N:P: S ratios in Australian and other world soils. *Geoderma* 163, 197-208.

Markus Kleber, Karin Eusterhues, Marco Keiluweit, Christian Mikutta, Robert Mikutta, Peter S.Nico. Chapter One - Mineral–Organic Associations: Formation, Properties, and Relevance in Soil Environments, *Advances in Agronomy*, v.130, 2015, p.1-140.

Kramer C, Trumbore S, Fröberg M, Dozal LMC, Zhang DC, Xu XM, Santos GM, Hanson PJ. Recent (4 year old) leaf litter is not a major source of microbial carbon in a temperate forest mineral soil. *Soil Biology and Biochemistry*. 2010;42:1028–1037. doi: 10.1016/j.soilbio.2010.02.021.

Lal R (2009) Challenges and opportunities in soil organic matter research. *Eur J Soil Sci* 60:158–169. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01114.x>

Lebre, P.H., De Maayer, P., Cowan, D.A., 2017. Xerotolerant bacteria: surviving through a dry spell. *Nature Reviews Microbiology* 15, 285–296.

Magnani, F., Mencuccini, M., Borghetti, M., Berbigier, P., Berninger, F., Delzon, S., Grelle, A., Hari, P., Jarvis, P.G., Kolari, P., Kowalski, A.S., Lankreijer, H., Law, B.E., Lindroth, A., Loustau, D., Manca, G., Moncrieff, J.B., Rayment, M., Tedeschi, V., Valentini, R., Grace, J., 2007. The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. *Nature* 447, 849-851.

Manzoni, S., Pineiro, G., Jackson, R.B., Jobbagy, E.G., Kim, J.H., Porporato, A., 2012. Analytical models of soil and litter decomposition: solutions for mass loss and time-dependent rates. *Soil Biology & Biochemistry* 50, 66-76.

Moorhead, D.L., Sinsabaugh, R.L., 2006. A theoretical model of litter decay and microbial interaction. *Ecological Monographs* 76, 151-174.

Nadelhoffer, K.J., Emmett, B.A., Gundersen, P., Kjonaas, O.J., Koopmans, C.J., Schleppi, P., Tietema, A., Wright, R.F., 1998. Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests. *Nature* 398, 145-148.

Qiao, Y., Wang, J., Liang, G. et al. Global variation of soil microbial carbon-use efficiency in relation to growth temperature and substrate supply. *Sci Rep* 9, 5621 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42145-6>

Raphael, J.P.; Calonego, J.C.; Milori, D.M.B.; Rosolem, C.A. Soil organic matter in crop rotations under no-till. *Soil and Tillage Research*, v.155, p.45-53, 2016.

Roberts, P., Jones, D.L. Microbial and plant uptake of free amino sugars in grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, v.49, 2012, p.139-149. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.02.014>

Rovira P, Vallejo VR (2002) Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: an acid hydrolysis approach. *Geoderma* 107:109-141

Russell, J.B., 2007. The energy spilling reactions of bacteria and other organisms. *Journal of Molecular Microbiology and Biotechnology* 13, 1–11.

Salome, C., Nunan, N., Pouteau, V., Lerch, T.Z., Chenu, C., 2010. Carbon dynamics in topsoil and subsoil may be controlled by different regulatory mechanisms. *Global Change Biology* 16, 416–426.

Sanaullah M, Chabbi A, Leifeld J, Bardoux G, Billou D, Rumpel C (2011) Decomposition and stabilization of root litter in top-and subsoil horizons: what is the difference? *Plant Soil* 338:127-141

Santi, A.; Amado, T.J.C.; Costa, J.A.A. Adubação nitrogenada na aveia preta: influência na produção de matéria seca e ciclagem de nutrientes sob sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.27, n.6, p.1.075- 1.083, 2003.

Schimel, J.P., Weintraub, M.N., 2003. The implications of exoenzyme activity on microbial carbon and nitrogen limitation in soil: a theoretical model. *Soil Biology and Biochemistry* 35, 549-563.

Sinsabaugh, R.L., Hill, B.H., Shah, J.J.F., 2009. Eoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment. *Nature* 462, 795-798.

Sinsabaugh, R.L., Manzoni, S., Moorhead, D.L., Richter, A. 2013. Carbon use efficiency of microbial communities: stoichiometry, methodology and modelling *Ecology Letters*, 16, 930-939.

Tian Q, Wang X, Wang D, Wang M, Liao C, Yang X, Liu F (2017) Decoupled linkage between soil carbon and nitrogen mineralization among soil depths in a subtropical mixed forest. *Soil Biol Biochem* 109:135–144

USDA, 2014. Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. Soil Survey Staff.

Wagai, R., Kishimoto-Mo, A. W., Yonemura, S., Shirato, Y., Hiradate, S., & Yagasaki, Y. (2013). Linking temperature sensitivity of soil organic matter decomposition to its molecular structure, accessibility, and microbial physiology. *Global Change Biology*, 19(4), 1114–1125. doi:10.1111/gcb.12112.

Zelles L, Stepper I, Zsolnay A (1990) The effect of liming on microbial activity in spruce (*Picea abies* L.) forests. *Biol Fertil Soils* 9:78–82.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A correção da acidez do solo e o suprimento de N é capaz de aumentar a distribuição dos sistemas radiculares da soja e do milho no perfil do solo, aumentando a exploração do solo, permitindo a extração de água em períodos de restrição em camadas mais profundas do solo e maior absorção de nutrientes.

A correção da acidez do solo promove maior recuperação do nitrogênio pelas plantas de milho segunda safra cultivado em consórcio com o capim cv. Tanzânia em sistema de semeadura direta, conseqüentemente, proporcionando maior eficiência de uso do carbono (EUC) do fertilizante.

A adição de nutrientes como o N e P, pode ser uma importante alternativa para melhorar a EUC no solo, conseqüentemente, diminuir a emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, no solo com acidez corrigida, mostrando que a comunidade microbiana do solo pode sofrer limitações pelas restrições de nutrientes minerais.



## REFERÊNCIAS

- Abruña, F.; Vicente-Chandler, J.; Pearson, R. Effect of liming on yields and composition of heavily fertilized grasses and on soil properties under humid tropical conditions. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.*, 28:657-661, 1964
- Adams, F.; White, A.W. & Dawson, R.N (1967). Influence of lime sources and rates on coastal bermudagrass production, soil profile reaction, exchangeable Ca and Mg. *Agron. J.*, 59:147-149.
- Caires, E.F.; Banzatto, D.A.; Fonseca, A.F. Calagem na superfície em sistema plantio direto. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 24 (1), 2000. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000100018>
- CAIRES, E. F. Correção da acidez do solo em sistema plantio direto. Informações agronômicas. IPNI-International Plant Nutrition Institute, 2013.
- Caires, E.F., Garbui, F.J., Alleoni, L.R.F., Cambri, M.A., 2006. Calagem superficial e cobertura de aveia preta antecedendo os cultivos de milho e soja em sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 30. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000100010>
- Costa, A., Rosolem, C.A., 2007. Liming in the transition to no-till under a wheat-soybean rotation. *Soil and Tillage Research* 97. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.09.014>
- Ekenler, M., Tabatabai, M.A. 2003. Effects of liming and tillage systems on microbial biomass and glycosidases in soils. *Biol. Fertil. Soils* 39, 51-61
- Fageria NK, Melo LC, Oliveira J (2013). Nitrogen use efficiency in dry bean genotypes. *Journal of Plant Nutrition* 36:2179-2190. <https://dx.doi.org/10.1080/01904167.2013.836225>
- Foloni, J. S. S.; Rosolem, C. A. Produtividade e acúmulo de potássio na soja em função da antecipação da adubação potássica no sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 1549-1561, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S010006832008000400019>
- Mijangos, I.; Pérez, R.; Albizu, I.; Garbisu, C. Effects of fertilization and tillage on soil biological parameters. *Enzimol. Microbiol. Technol.*, 40:100-106, 2006.
- Rosolem, C.A., Ritz, K., Cantarella, H., Galdos, M. v., Hawkesford, M.J., Whalley, W.R., Mooney, S.J., 2017. Enhanced Plant Rooting and Crop System Management for Improved N Use Efficiency. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.07.002>
- Rosolem, C.A.; Schiochet, M.A.; Sousa, L.S.; Witacker, J.P.T. Root growth and cotton nutrition as affected by liming and soil compaction. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v.29, p.169-177, 1998.
- Rosolem, C.A., Foloni, J.S.S., Oliveira, R.H. de, 2003. Dinâmica do nitrogênio no solo em razão da calagem e adubação nitrogenada, com palha na superfície.

Pesquisa Agropecuária Brasileira 38. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000200018>

Silva, V.M.; Trivelin, P.C.O.; Colaço, W.; Encarnação, F.A.F.; Lara Cabezas, W.A.R., 1999. Mineralização e volatilização do nitrogênio da vinhaça-15N na presença ou não de ureia e de palha de cana-de-açúcar. *Scientia Agricola* 56 (1), 117–124.

Silva, C.A.; Vale, F.R. Disponibilidade de nitrato em solos brasileiros sob efeito da calagem e de fontes e doses de nitrogênio. *Pesq. Agropec. Bras.*, 35: 2461-2471, 2000.

Silva, C.A.; Vale, F.R.; Guilherme, L.R.G. Nitrificação em Latossolos da região sul de Minas Gerais: Efeito da acidez do solo. *Ci. Pratica.*, 18:388-394, 1994.

Yao, H.Y., D. Bowman, T. Rufty; W. Shi. 2009. Interactions between N fertilization, grass clipping addition and pH in turf ecosystems: Implications for soil enzyme activities and organic matter decomposition. *Soil Biol. Biochem.* 41:1425–1432. doi:10.1016/j.soilbio.2009.03.020

## ANEXO A

**Tabela 3** - Concentração de nitrogênio (N) nas folhas de soja em função da aplicação de corretivos e doses de N rates nas safras 2016/2017, 2017/2018, 2018/2019 e 2019/2020 e nas folhas de milho segunda safra em função da aplicação de corretivos e doses de N nas safras 2017, 2018 e 2019

| SOJA                              |           |         |         |         |
|-----------------------------------|-----------|---------|---------|---------|
| Tratamentos                       | 2016/2017 | 2017/18 | 2018/19 | 2019/20 |
| (g kg <sup>-1</sup> )             |           |         |         |         |
| <i>Corretivos</i>                 |           |         |         |         |
| Controle                          | 59,2 a    | 55,46 a | 44,4 a  | 44,4 a  |
| Calcário                          | 62,0 a    | 57,9 a  | 49,6 a  | 49,6 a  |
| Calcário+Gesso                    | 60,4 a    | 56,2 a  | 45,5 a  | 45,4 a  |
| <i>Doses de N</i>                 |           |         |         |         |
| 0                                 | 62,5 a    | 49,5 a  | 45,0 a  | 45,0 a  |
| 80                                | 62,5 a    | 56,4 a  | 47,8 a  | 47,8 a  |
| 160                               | 57,7 a    | 60,9 a  | 47,0 a  | 47,3 a  |
| 240                               | 59,2 a    | 59,1 a  | 46,3 a  | 46,2 a  |
| <u>ANAVA (probabilidade de F)</u> |           |         |         |         |
| Corretivos (A)                    | 0,62      | 0,17    | 0,50    | 1,35    |
| Doses de N (B)                    | 1,39      | 2,15    | 0,38    | 0,19    |
| A x B                             | 0,40      | 0,60    | 0,83    | 0,75    |

| MILHO                             |        |        |         |
|-----------------------------------|--------|--------|---------|
| Tratamentos                       | 2017   | 2018   | 2019    |
| (g kg <sup>-1</sup> )             |        |        |         |
| <i>Corretivos</i>                 |        |        |         |
| Controle                          | 29,5 a | 35,5 a | 30,2 a  |
| Calcário                          | 30,5 a | 38,5 a | 32,5 a  |
| Calcário+Gesso                    | 29,0 a | 36,0 a | 31,0 a  |
| <i>Doses de N</i>                 |        |        |         |
| 0                                 | 26,8 a | 31,3 a | 27,9 b  |
| 80                                | 30,7 a | 37,5 a | 32,5 a  |
| 160                               | 31,2 a | 39,0 a | 31,5 a  |
| 240                               | 30,5 a | 39,3 a | 32,8 a  |
| <u>ANAVA (Probabilidade de F)</u> |        |        |         |
| Corretivos (A)                    | 0,7285 | 0,5614 | 0,1154  |
| Doses de N (B)                    | 0,1905 | 0,0784 | <0,0002 |
| A x B                             | 0,0657 | 0,8821 | 0,0748  |