

**JEFERSON GIEHL**

**ADUBAÇÃO DE RESTITUIÇÃO COMO ESTRATÉGIA PARA MAIOR  
EFICIÊNCIA DE USO DE NUTRIENTES EM SOLO DE FERTILIDADE  
CONSTRUÍDA NO CERRADO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: João Carlos Cardoso Galvão

Coorientador: Álvaro Vilela de Resende

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

G454a  
2022  
Giehl, Jeferson, 1992-  
Adubação de restituição como estratégia para maior  
eficiência de uso de nutrientes em solo de fertilidade construída  
no cerrado / Jeferson Giehl. – Viçosa, MG, 2022.  
1 tese eletrônica (82 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndice.

Orientador: João Carlos Cardoso Galvão.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Agronomia, 2022.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.726>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Plantas - Nutrição. 2. Adubos e fertilizantes.  
3. Agricultura - Estimativas de rendimento. 4. *Brachiaria  
ruziziensis*. 5. Cultivo consorciado. 6. Fertilidade do solo.  
I. Galvão, João Carlos Cardoso, 1962-. II. Universidade Federal  
de Viçosa. Departamento de Agronomia. Programa de  
Pós-Graduação em Fitotecnia. III. Título.

CDD 22. ed. 631.8


**JEFERSON GIEHL**

**ADUBAÇÃO DE RESTITUIÇÃO COMO ESTRATÉGIA PARA MAIOR  
EFICIÊNCIA DE USO DE NUTRIENTES EM SOLO DE FERTILIDADE  
CONSTRUÍDA NO CERRADO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 01 de setembro de 2022.

Assentimento:

  
\_\_\_\_\_  
Jeferson Giehl  
Autor

  
\_\_\_\_\_  
João Carlos Cardoso Galvão  
Orientador

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Paulo e Clair, e irmãos Douglas e Alexandre, pelo apoio e incentivo.

Ao orientador João Carlos Cardoso Galvão, coorientador Álvaro Vilela de Resende e demais conselheiros, pelas orientações.

A Ziany Neiva Brandão e Sandro Manuel Carmelino Hurtado pelo apoio nos tópicos envolvendo sensoriamento remoto e geoprocessamento.

Aos meus colegas e demais amigos, pelo apoio e auxílio na execução dos experimentos.

Ao Programa de Pós-graduação em Fitotecnia e à Universidade Federal de Viçosa pela possibilidade de cursar o doutorado.

À Embrapa Milho e Sorgo pelo desenvolvimento do projeto e apoio financeiro.

Aos proprietários e funcionários da Fazenda Decisão pela parceria, condução e cuidado com os experimentos.

À Fundação Agrisus pelo apoio financeiro (Processo 2484/18).

À empresa Vinci Tecnologia (representante Trimble) pelo suporte técnico na calibração dos equipamentos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa.

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

Muito Obrigado.

## RESUMO

GIEHL, Jeferson, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2022. **Adubação de restituição como estratégia para maior eficiência de uso de nutrientes em solo de fertilidade construída no Cerrado.** Orientador: João Carlos Cardoso Galvão. Coorientador: Álvaro Vilela de Resende.

Os solos do Cerrado apresentam baixa fertilidade natural. Porém, após a correção do pH e sucessivas aplicações de fertilizantes, muitas lavouras atingiram níveis ótimos de nutrientes no solo. A partir desse ponto, o solo deixa de se comportar como dreno de nutrientes e passa a se comportar como reservatório. Desse modo, é possível adotar estratégias mais eficientes de adubação, especialmente em solos argilosos. Porém, isso não acontece na prática pelo receio de perda de produtividade ou simplesmente por falta de informação. Desse modo, o objetivo deste trabalho foi validar o balanço de N, P e K associado à adubação de restituição para maior eficiência de uso de nutrientes no sistema safra/segunda safra em solo de Cerrado com fertilidade construída. Experimentos foram conduzidos por três anos agrícolas em condição de fazenda, em solo de alta fertilidade, no município de Unaí – MG. Foram comparadas sete opções de adubação em dois sistemas de cultivo safra/segunda safra. Um dos sistemas envolveu o cultivo de soja na safra com a introdução de braquiária *ruziziensis* em consórcio com a cultura de segunda safra (milho ou sorgo). No outro sistema não foi feito consórcio com braquiária. As opções de adubação NPK foram constituídas por: 1) Controle sem adubação; 2) Adubação de restituição dos nutrientes exportados; 3) Restituição +30%; 4) Restituição -30%; 5) Adubação de sistema; 6) Adubação padrão da fazenda; e 7) Fazenda +30%. O delineamento experimental foi de blocos casualizados com quatro repetições, e parcelas medindo 30 m de largura por 150 m de comprimento. As variáveis avaliadas foram: índices de vegetação gerados a partir de sensores proximais e imagens multiespectrais obtidas pelo Satélite Sentinel-2A, produtividade, balanço de nutrientes, rentabilidade, eficiência de uso de nutrientes e atributos da fertilidade do solo. Índices de vegetação obtidos por sensores são pouco efetivos em discriminar condições de vigor da lavoura em solo de fertilidade construída, mesmo com diferenças de 30% nas quantidades de nutrientes fornecidas às culturas. Em sistemas de sorgo ou milho consorciado com braquiária, o monitoramento baseado em índices de vegetação pode não refletir o estado nutricional ou potencial produtivo da cultura principal. O sorgo e o milho segunda safra são mais responsivos às variações na adubação NPK em solo de fertilidade construída, com reflexos na produtividade de grãos, o

que não se verifica na soja cultivada na safra. O consórcio com braquiária reduz a produtividade de sorgo e não altera a produtividade de milho segunda safra, mas pode aumentar a produtividade da soja subsequente, além de proporcionar maior cobertura do solo. A adubação de restituição associada ao balanço de nutrientes mantém os níveis de produtividade e promove o uso mais eficiente de nutrientes, enquanto preserva a condição de fertilidade do solo. A adubação de restituição e restituição mais 30% proporcionam maior retorno econômico em relação ao manejo da fazenda.

Palavras-chave: Balanço de nutrientes. Manejo de adubação. Plantio direto. Segunda safra. Braquiária. Intensificação ecológica.

## ABSTRACT

GIEHL, Jeferson, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, September, 2021. **Maintenance fertilization as a strategy for higher efficiency in the use of nutrients in a high build-up fertility soil in the Cerrado.** Adviser: João Carlos Cardoso Galvão. Co-adviser: Álvaro Vilela de Resende.

Cerrado soils have low natural fertility. However, after soil acidity correction and successive fertilizer applications, many fields reached optimal levels of nutrients in the soil. From that point on, the soil ceases to behave as a nutrient drain and starts to behave as a reservoir. In this way, it is possible to adopt more efficient fertilization strategies, especially in clayey soils. However, this does not happen in practice because of the fear of yield loss or simply because of lack of information. Thus, the objective of this work was to validate the balance of N, P and K associated with maintenance fertilization for greater efficiency of nutrient use in the double cropping system in Cerrado soil with high fertility. Field experiments were carried out for three agricultural years in farm condition, in high fertility soil in the municipality of Unai - MG. Seven fertilization options were tested in two cropping systems in the soybean/corn (or sorghum) succession in double cropping. One of the systems involved soybean cultivation as first crop and the introduction of ruzigrass intercropped with the second crop (corn or sorghum). In another system ruzigrass has not been used as intercropping. The NPK fertilization options were: 1) Control without fertilization; 2) Maintenance fertilization of the exported nutrients; 3) Maintenance +30%; 4) Maintenance - 30%; 5) System fertilization; 6) Standard farm fertilization; and 7) Farm +30%. The design was randomized blocks with four replications, and plots measuring 30 m wide by 150 m long. The evaluations were: vegetation indices generated from proximal sensors and multispectral images from Sentinel-2A satellite, yield, nutrient balance, profitability, nutrient use efficiency and soil fertility attributes. Vegetation indices obtained from sensors are ineffective in discriminating crop vigor in high fertility soil, even with differences of 30% in the amounts of nutrients supplied to crops. In sorghum or corn intercropped with ruzigrass, monitoring based on vegetation indices may not reflect the nutritional status or yield potential of the main crop. Sorghum and second crop corn are more responsive to variations in NPK fertilization in high fertility soil, impacting grain yield, which is not observed in soybean cultivated as first crop. Intercropping with ruzigrass reduces sorghum yield and does not change second-crop corn yield, but can increase subsequent soybean yield, in addition to providing greater soil cover.

Maintenance fertilization associated with nutrient balance maintains yield levels and promotes more efficient use of nutrients, preserving soil fertility. The maintenance fertilization and maintenance +30% provide greater economic return compared to farm management.

Keywords: Nutrient balance. Fertilization management. No-till crop. Double cropping. Ruzigrass. Ecological intensification.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>9</b>
1.1 Referências bibliográficas.....	9
<b>2. EFETIVIDADE DE SENSORES NO MONITORAMENTO DO ESTADO NUTRICIONAL E POTENCIAL PRODUTIVO DE CULTURAS GRANÍFERAS EM SOLO DE FERTILIDADE CONSTRUÍDA .....</b>	<b>11</b>
2.1 Introdução.....	11
2.2 Material e métodos .....	12
2.3 Resultados e discussão .....	19
2.3.1 Resposta espectral e produtividade das culturas.....	19
2.3.2 Correlações entre os índices de vegetação e a resposta das culturas .....	28
2.4 Conclusões.....	34
2.5 Referências bibliográficas.....	34
<b>3. BALANÇO DE NUTRIENTES E ADUBAÇÃO DE RESTITUIÇÃO: ESTRATÉGIA PARA ASSOCIAR PRODUTIVIDADE, RENTABILIDADE E EFICIÊNCIA DE USO DE NUTRIENTES EM SOLO DE FERTILIDADE CONSTRUÍDA .....</b>	<b>37</b>
3.1. Introdução.....	37
3.2 Material e métodos .....	40
3.3 Resultados e discussão .....	48
3.3.1 Produtividade de grãos e palhada residual.....	48
3.3.2 Retorno econômico .....	56
3.3.3 Eficiência e taxa de desfrute da adubação .....	59
3.3.4 Balanço de nutrientes e alterações na fertilidade do solo .....	61
3.4 Conclusões.....	65
3.5 Referências bibliográficas.....	66
<b>4. CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>70</b>
<b>5. APÊNDICE .....</b>	<b>71</b>

## **1. INTRODUÇÃO GERAL**

A conversão das terras em ambientes propícios ao adequado desenvolvimento das lavouras se deu pela disseminação de práticas de correção da acidez do solo e aplicação de fertilizantes (Lopes & Guilherme, 2016), prática referida como construção da fertilidade. A partir do estabelecimento do sistema, a dinâmica dos nutrientes aplicados ao solo se altera, onde o solo deixa de ser um dreno (onde parte dos nutrientes fica retido) para ser um reservatório (onde fica armazenado e disponível em formas mais ou menos lábeis). Nessas circunstâncias, o manejo da fertilidade envolve lidar com os reservatórios e o fluxo de nutrientes (aplicação e remoção pela colheita), além de aprimorar os diagnósticos (Resende et al., 2016).

A produção de grãos no cerrado se caracteriza pelo elevado grau de investimento tecnológico, no qual a utilização de fertilizantes é um dos pilares de sustentação de altas produtividades, mas também um item com alto custo (Lopes & Guilherme, 2016). Devido ao efeito residual cumulativo de adubações sucessivas ao longo dos anos, extensas áreas de produção agrícola brasileira apresentam estoques de nutrientes cada vez mais consistentes (Pavinato et al., 2020).

Nesse contexto, são desejáveis estratégias de manejo que favoreçam a sincronia entre fornecimento de nutrientes via adubação e a real demanda das culturas. A filosofia de adubação de restituição pressupõe que, em solos de alta fertilidade, sejam aplicados fertilizantes apenas para repor as quantidades de nutrientes exportadas nas colheitas (Silva et al., 2016; Resende et al., 2016). Trabalhos de pesquisa podem comprovar a efetividade da adubação de restituição e desenvolver abordagens práticas mais eficientes no âmbito de fazenda, que seriam fatores de estímulo para adoção, podendo impactar positivamente no desempenho econômico e na sustentabilidade agrícola das regiões mais tecnificadas.

Desse modo, o presente trabalho buscou avanços para ganho de eficiência técnica e rentabilidade no manejo da adubação em solos de fertilidade construída no Cerrado, utilizando como estudo de caso um sistema de produção de safra/segunda safra em sequeiro, na região de Unaí – MG. Assim, o objetivo deste trabalho foi validar o balanço de N, P e K associado à adubação restituição para maior eficiência de uso de nutrientes no sistema safra/segunda safra em solo de Cerrado com fertilidade construída

### **1.1 Referências bibliográficas**

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. A career perspective on soil management in the Cerrado region of Brazil. **Advances in Agronomy**, v. 137, p. 1–72, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/bs.agron.2015.12.004>

PAVINATO, P. S.; CHERUBIN, M. R.; SOLTANGHEISI, A.; ROCHA, G. C.; CHADWICK, D. R.; JONES, D. L. Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, p. 15615, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72302-1>

RESENDE, A.V.; FONTOURA, S. M. V.; BORGHI, E.; SANTOS, F. C.; KAPPES, C.; MOREIRA, S. G.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; BORIN, A. L. D. C. Solos de fertilidade construída: características, fundamento e manejo. **Informações Agronômicas**, n. 156, p. 1-19, 2016.

SILVA, L. S.; GATIBONI, L. C.; ANGHINONI, I.; SOUZA, O. S. (Ed.) **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. SBCS. 2016. 376p.

WITHERS, P. J. A.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; CARVALHO, T. S.; GUILHERME, L. R. G.; BENITES, V. M.; GATIBONI, L. C.; SOUSA D. M. G.; NUNES, R. S.; ROSOLEM, C. A.; ANDREOTE, F. D.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; COUTINHO, E. L. M.; PAVINATO, P. S. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, v. 8, p. 2537, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20887-z>

## **2. EFETIVIDADE DE SENSORES NO MONITORAMENTO DO ESTADO NUTRICIONAL E POTENCIAL PRODUTIVO DE CULTURAS GRANÍFERAS EM SOLO DE FERTILIDADE CONSTRUÍDA**

### **2.1 Introdução**

A aplicação de sensoriamento remoto na agricultura é baseada na interação da radiação eletromagnética com solo e plantas. Assim, sensoriamento remoto envolve a medição da radiação refletida, transmitida ou absorvida (Mulla, 2013). Sensores utilizando diferentes princípios de funcionamento vêm sendo desenvolvidos para auxiliar no diagnóstico de fatores condicionantes à produtividade das culturas. Hoje existem sensores para atender aos mais diversos objetivos, desde a pesquisa científica até aplicações em larga escala cobrindo grandes extensões territoriais (Resende et al., 2015).

Um destes sensores utilizados na agricultura é o medidor manual SPAD (Soil Plant Analysis Development, Minolta, Inc.) que mede a absorvância da luz pelas folhas em dois comprimentos de onda, o vermelho (R, que é absorvido pela clorofila) e o infravermelho próximo (NIR, que não é absorvido pela clorofila). As leituras deste equipamento são correlacionadas com o teor de clorofila e com o teor de nitrogênio nas folhas (Schepers et al., 1992; Markwell et al., 1995).

Outro equipamento empregado é o Greenseeker (Trimble, Inc.), que produz leituras de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), além de poder ser utilizado manualmente ou acoplado à equipamentos motorizados. Na história dos índices de vegetação, NDVI tem sido o mais utilizado (Huang et al., 2021), estando relacionado com a estrutura da copa das plantas, índice de área foliar, além do teor de clorofila, teor de nitrogênio das folhas e biomassa verde. Porém em ambientes onde o índice de área foliar é muito alto, ultrapassando o valor de 2, ocorre a saturação do NDVI, não havendo mais boa relação entre o índice e os parâmetros citados (Gamon et al., 1995; Huang et al., 2021)

Já câmeras multiespectrais (leitura do espectro em pelo menos dois comprimentos de onda) apresentam maior versatilidade. Elas permitem a identificação de estresse nutricional, índices fisiológicos e cobertura vegetal. Por sua vez, as câmeras térmicas têm uso na avaliação do efeito do estresse hídrico e uniformidade de irrigação em lavouras. Mesmo as imagens RGB (leitura apenas na faixa da luz visível) têm aplicações diversas, como a detecção de falhas de semeadura, de diferenças de desenvolvimento da cultura e de formação da planta (Jorge e Inamasu, 2014). O lançamento de novos satélites, dotados de câmeras

multiespectrais de altíssima definição, e a disponibilização gratuita das imagens online permitiu a popularização desta ferramenta. Esse é o caso do Satélite Sentinel-2A, com um tempo de revisita de 5 dias e uma resolução espacial de 10 m para as bandas do espectro visível e o infravermelho próximo (ESA, 2013).

Os estudos com sensores que fornecem índices de vegetação durante o ciclo das culturas têm apontado boas possibilidades de predição do potencial produtivo (Wilda, 2018) e, conseqüentemente, da resposta a níveis de adubação. O uso desse tipo de sensor representa um grande atrativo na busca do manejo mais eficiente dos nutrientes, sobretudo do nitrogênio (N), considerando que ainda não há métodos de análises de solo disponíveis em rotina para predição de resposta à adubação nitrogenada no Brasil.

Adicionalmente, há poucos estudos na literatura brasileira, com delineamento e tamanho de parcela que permita avaliação com sensores orbitais. Além disso, em ambientes de lavoura com fertilidade adequada, devido a manejos mais criteriosos ao longo do tempo, é possível que não haja contrastes quanto a refletância espectral das culturas em função de mudanças da adubação em curto prazo. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar a efetividade de índices de vegetação oriundos de sensores no diagnóstico do estado nutricional e do potencial produtivo de culturas graníferas em solo de Cerrado com fertilidade construída.

## **2.2 Material e métodos**

O trabalho foi conduzido *on-farm*, em talhão de produção comercial da Fazenda Decisão, em Unaí - MG (16,412 °S, 47,301 °O e altitude de 992 m). O solo local é classificado como Latossolo Vermelho-amarelo argiloso, com alto nível de fertilidade, conforme expresso na análise inicial da área utilizada (Tabela 1). Experimentos foram conduzidos por três anos agrícolas em sequeiro, nas condições de manejo cultural da fazenda. Os dados meteorológicos do período são apresentados na Figura 1.

Tabela 1. Caracterização química e textural do solo, antes da implantação dos experimentos. Unai – MG, 2018.

Atributo	Profundidade	
	0-10 cm*	10-20 cm*
pH <sub>água</sub>	6,6	6,1
P <sub>Mehlich</sub> (mg dm <sup>-3</sup> )	38	23
K <sub>Mehlich</sub> (mg dm <sup>-3</sup> )	183	157
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	5,2	3,3
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,8	1,1
CTC (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	9,7	8,3
Saturação por bases (%)	77	57
B (mg dm <sup>-3</sup> )	0,5	0,4
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	0,9	0,9
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	25	31
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	35	26
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	9	9
Mat. Orgânica – MOS (g kg <sup>-1</sup> )	41	34
S (mg dm <sup>-3</sup> )**	5	22
Argila (g kg <sup>-1</sup> ***)	470, 650 e 690	

\* Média de 30 amostras compostas. \*\* Enxofre: teores nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm, respectivamente. \*\*\* Profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, respectivamente. Média de 5 amostras compostas.

O estudo foi constituído de experimentos em que se avaliaram opções de adubação NPK em dois sistemas de sucessão soja/milho (ou sorgo) segunda safra. Um dos sistemas envolveu a introdução de braquiária ruzizensis (*Urochloa ruzizensis*) como planta de cobertura em consórcio na segunda safra (CB) e foi conduzido em área adjacente à do sistema tradicional com sucessão simples das culturas de grãos, sem a presença de braquiária (SB). Em função das demandas operacionais da fazenda, foi cultivado sorgo na segunda safra do primeiro ano agrícola e milho nos demais anos. Na Tabela 2 são sumarizadas as informações referentes a cultivares, data e densidade de semeadura dos cultivos.

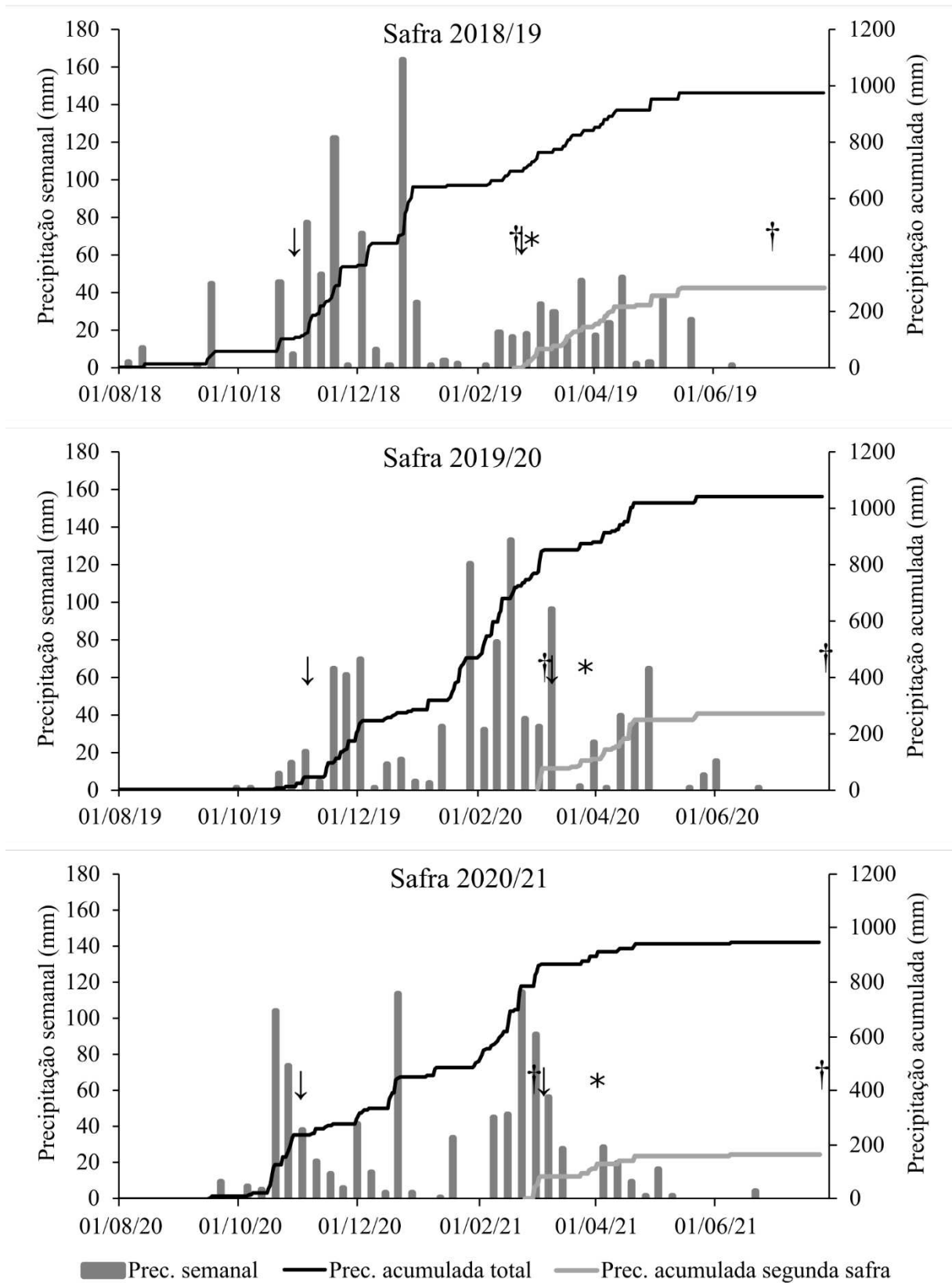


Figura 1. Distribuição da precipitação semanal e total acumulado em cada ano agrícola. Unaí – MG, 2022. Legenda: ↓ plantio; † colheita; \* aplicação de nitrogênio.

Tabela 2. Informações sobre a sucessão de culturas utilizada no experimento. Unai – MG, 2022.

Detalhamento	Ano agrícola/cultura					
	2018/19		2019/20		2020/21	
	Soja	Sorgo	Soja	Milho	Soja	Milho
Cultivar	M6210 IPRO	Enforcer	M6210 IPRO	MG408 PowerCore	M6210 IPRO	AS1820 VT Pro3
Densidade de semeadura (sementes ha <sup>-1</sup> )	250.000	180.000	250.000	50.000	260.000	60.000
Data de semeadura	26/10/18	21/02/19	07/11/19	05/03/20	04/11/20	10/03/21

Em cada experimento/sistema, o delineamento foi de blocos casualizados com quatro repetições, espaçamento entre linhas de 0,5 m, com tamanho de parcela de 30 m de largura por 150 m de comprimento, ajustado às bitolas do maquinário disponível na fazenda. Os tratamentos avaliados representaram diferentes opções de adubação NPK: 1) controle sem adubação (CONT); 2) adubação de restituição repondo as quantidades de nutrientes exportadas nos grãos colhidos na cultura anterior (REST); 3) adubação de restituição mais 30%, para cobrir eventuais perdas do sistema (REST+30%); 4) adubação de restituição menos 30%, para aferir a possibilidade de redução da adubação (REST –30%); 5) adubação de restituição do sistema aplicada toda na safra de verão com soja (SIST), a partir do segundo ano, pois, no primeiro ano este tratamento foi análogo ao tratamento de restituição; 6) adubação padrão da fazenda (FAZ); e 7) adubação da fazenda mais 30%, para aferir a possibilidade de resposta adicional (FAZ+30%).

Para o tratamento REST, as quantidades de P e K foram definidas conforme a exportação desses nutrientes pelos grãos da cultura anterior (Tabela 3). Já a quantidade de N para o milho ou sorgo segunda safra foi definida levando em conta a expectativa de produtividade/exportação de N dessas culturas (correspondendo a 6.000 e 7.500 kg ha<sup>-1</sup> para o sorgo e o milho, respectivamente). O primeiro cultivo de soja (2018/19) foi feito sobre palhada de milheto consorciado com *Crotalaria ochroleuca*, sendo o dimensionamento do tratamento REST feito levando em conta a produtividade (4.920 kg ha<sup>-1</sup>) e a análise dos grãos do cultivo precedente, que também havia sido com soja na safra 2017/18 (anterior ao experimento). Do segundo cultivo em diante, os cálculos tiveram por base a exportação determinada pela cultura antecessora, na sequência soja/sorgo/soja/milho/soja/milho.

Tabela 3. Taxas de exportação de nutrientes consideradas para o cálculo da exportação nas colheitas. Unaí – MG, 2022.

	N (kg Mg <sup>-1</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg Mg <sup>-1</sup> )	K <sub>2</sub> O (kg Mg <sup>-1</sup> )	Referência
Soja	47,3	9,7	21,4	Amostragem na fazenda
Sorgo	13,3	6,2	4,2	Amostragem na fazenda
Milho	13,1	4,8	3,7	Duarte et al. (2019)

No tratamento SIST, o total da adubação de restituição com P e K para o sistema safra/segunda safra foi aplicado na soja (safra verão), visando economia e rendimento operacional, enquanto o N em cobertura para a segunda safra foi distribuído durante o ciclo do sorgo ou do milho. Por fim, o tratamento FAZ representou o manejo realizado segundo critérios próprios da fazenda.

De acordo com os tratamentos, as adubações de base e em cobertura tiveram as dosagens automaticamente variadas nas parcelas, por meio de sistema de guia por satélite e dispositivos de aplicação de fertilizantes a taxa variável, em distribuidor centrífugo a lanço Hercules<sup>®</sup> e sistema Rawson<sup>TM</sup> acoplado à semeadora pneumática John Deere 2117<sup>®</sup>. Esses equipamentos permitiram trabalhar com parcelas de grandes dimensões.

As fontes de N, P e K utilizadas variaram com o ano agrícola, conforme os insumos adquiridos pela fazenda em diferentes momentos. O adubo fosfatado de base (fosfato monoamônico – MAP, NPK 14-25-00, ou NPK 08-40-00, conforme o cultivo) foi distribuído no sulco de semeadura, variando as doses nas parcelas por mecanismos de aplicação a taxa variável na semeadora. As adubações potássicas foram realizadas distribuindo-se o cloreto de potássio (KCl) a lanço em pré-semeadura da soja ou pós-semeadura inicial do sorgo e do milho, utilizando equipamento com distribuidor centrífugo de aplicação a taxa variável. De forma análoga, foram realizadas as adubações nitrogenadas em cobertura para o sorgo (nitrato de amônio 27-00-00), aos sete dias após a semeadura (DAS), e para o milho (ureia com NBPT), aos 14 e 21 dias após a semeadura do milho nas safras 2019/20 e 2020/21, respectivamente. As quantidades de nutrientes referentes aos tratamentos em cada cultivo constam na Tabela 4, assim como a quantidade de cada formulado utilizado foi apresentado no material suplementar.

A semeadura da braquiária no respectivo experimento foi feita à lanço, imediatamente antes da semeadura da cultura de sorgo ou milho segunda safra, com distribuidor elétrico Ikeda<sup>®</sup> acoplado à barra do pulverizador Uniport<sup>®</sup>. Foi utilizada uma densidade média de

distribuição de 8 kg ha<sup>-1</sup> de semente com 80% de valor cultural. Após as colheitas de segunda safra, a braquiária foi deixada como planta de cobertura até o início da safra seguinte.

As operações de controle de plantas daninhas, tratos fitossanitários e de manejo geral foram realizadas utilizando maquinário, insumos e procedimentos da fazenda, observando as orientações técnicas relacionadas às culturas.

Tabela 4. Quantidades equivalentes de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O (kg ha<sup>-1</sup>) fornecidas nas adubações de base ou de cobertura em cada cultivo, nos experimentos com e sem braquiária, de acordo com as opções de adubação. Unaí – MG, 2022.

	CONT		REST		REST +30%		REST -30%		SIST		FAZ		FAZ +30%	
	CB	SB	CB	SB	CB	SB	CB	SB	CB	SB	CB	SB	CB	SB
Soja 2018/19														
N	0	0	12	12	15	15	8	8	12	12	20	20	26	26
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0	56	56	72	72	39	39	56	56	94	94	122	122
K <sub>2</sub> O	0	0	107	107	139	139	75	75	107	107	54	54	70	70
Sorgo 2019														
N	0	0	83	83	108	108	58	58	83	83	49	49	64	64
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0	41	41	53	53	29	29	41	41	78	78	101	101
K <sub>2</sub> O	0	0	98	98	127	127	68	68	98	98	60	60	78	78
Soja 2019/20														
N	0	0	11	13	15	17	8	9	21	22	18	18	23	23
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0	54	63	70	81	38	44	98	106	83	83	108	108
K <sub>2</sub> O	0	0	31	37	40	48	22	26	127	133	90	90	117	117
Milho 2020														
N	0	0	102	102	132	132	71	71	77	77	118	118	153	153
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0	44	44	57	57	31	31	0	0	50	50	65	65
K <sub>2</sub> O	0	0	96	96	125	125	67	67	0	0	90	90	117	117
Soja 2020/21														
N	0	0	8	7	10	9	5	5	17	17	14	14	19	19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0	38	36	50	47	27	25	85	83	72	72	94	94
K <sub>2</sub> O	0	0	32	23	42	30	22	16	135	126	90	90	117	117
Milho 2021														
N	0	0	102	102	133	133	72	72	92	92	114	114	148	148
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0	47	47	61	61	25	25	0	0	114	114	149	149
K <sub>2</sub> O	0	0	103	103	134	134	72	72	0	0	90	90	117	117

CB: com braquiária; SB: sem braquiária.

A resposta espectral foi avaliada com auxílio de imagens multiespectrais obtidas a partir do satélite Sentinel-2A nas datas 25/07/2019 (sorgo 60 dias após a semeadura), 30/03/2020 (milho 25 dias após a semeadura) e 14/04/2021 (milho 35 dias após a semeadura). Para tanto, as seguintes bandas das imagens geradas foram utilizadas: 2 (490 nm; B – azul), 3

(560 nm; G – verde), 4 (665 nm; R – vermelho) e 8 (842 nm. NIR – infravermelho próximo) (ESA, 2013). A partir destas bandas foram calculados índices de vegetação com apoio do software QGIS 3.12 (OSGeo, 2020) e para cada parcela dos experimentos foi obtido o valor médio da resposta espectral ao redor do ponto central (254 m<sup>2</sup>). Os seguintes índices foram calculados:

- Normalized Difference Vegetation Index (Rouse et al., 1974)  

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$
- Enhanced Vegetation Index (Huete et al., 1988)  

$$EVI = \frac{2,5(NIR - R)}{1 + NIR + 6R - 7,5B}$$
- Green Atmospherically Resistant Vegetation Index (Gitelson et al., 1996)  

$$GARI = \frac{NIR - [G - 0,5(B - R)]}{NIR + [G - 0,5(B - R)]}$$
- Modified Photochemical Reflectance Index (Yang et al., 2008)  

$$MPRI = \frac{G - R}{G + R}$$
- Soil Adjusted Difference Vegetation Index (Huete et al., 1988)  

$$SAVI = \frac{(1 + 0,4)(NIR - R)}{NIR + R + 0,4}$$
- Triangular Vegetation Index (Broge e Leblanc 2001)  

$$TVI = 0,5[120(NIR - G) - 200(R - G)]$$

Também foram utilizados os sensores proximais SPAD<sup>®</sup> (Soil Plant Analysis Development, Minolta) e Greenseeker<sup>®</sup> (Trimble). No milho ou sorgo, o índice SPAD foi medido em dez plantas, no terço médio da última folha completamente expandida durante os estádios vegetativos. No início do estágio reprodutivo, foi utilizada a folha oposta abaixo da espiga para milho e a quarta folha a partir da inflorescência para o sorgo. Já o NDVI<sup>Greenseeker</sup> foi medido em duas linhas de três metros, mantendo o sensor 40 cm acima do dossel, independentemente da cultura.

Amostragens foliares durante o florescimento das culturas foram realizadas para monitorar a suficiência dos nutrientes nos tecidos em todos os cultivos, exceto milho em 2020. Foram coletadas 16 folhas em um raio de 5 m para a soja (última folha completamente desenvolvida, sem o pecíolo), milho (terço médio da folha oposta abaixo da espiga, sem

bainha nem nervura) e sorgo (quarta folha do sorgo a partir da inflorescência, com nervura). As amostras foram secas a 65 °C, trituradas em moinho tipo Willey e analisadas para a determinação das concentrações de macro e micronutrientes, conforme metodologias descritas em Malavolta et al. (1997).

As avaliações de altura de planta, diâmetro de colmo e produtividade foram realizadas sempre na porção central das parcelas, em pontos georreferenciados previamente definidos, evitando-se assim as zonas de transição associadas à mudança automática de aplicação dos tratamentos pelo maquinário utilizado. As avaliações de produtividade de grãos foram realizadas após a maturação fisiológica das culturas, com base na colheita de uma área útil de 4,5 m<sup>2</sup> para a soja e o sorgo (3 linhas de 3 metros de comprimento) e 6 m<sup>2</sup> para o milho (4 linhas de 3 metros de comprimento), corrigindo para 13% de umidade.

No momento da colheita das culturas de sorgo e de milho, também foi quantificada a biomassa de braquiária a partir da amostragem em quadro de 1 m<sup>2</sup> por parcela. A cada cultivo, concluída a colheita mecanizada, os restos culturais foram mantidos na superfície do solo, compondo a palhada. Após o cultivo de sorgo na safra 2019, foi necessário um manejo diferencial no sistema consorciado, onde foi utilizado picador para fragmentar a palhada e evitar o embuchamento da semeadora.

Os dados obtidos de sensores e medidos nas parcelas foram submetidos a análise de variância conjunta, de modo a verificar a existência de interação entre opções de adubação e sistemas de produção com e sem braquiária. Foi utilizado o programa Sisvar (Ferreira, 2019) e, quando significativo o teste F ( $p < 0,05$ ), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey. Já os dados da análise foliar foram comparados aos teores considerados adequados por Oliveira (2004). Também foram realizadas análises de regressão e de correlação para identificar relação entre as características avaliadas.

## **2.3 Resultados e discussão**

### **2.3.1 Resposta espectral e produtividade das culturas**

Para a cultura da soja, os índices de vegetação gerados por sensores proximais discriminaram pouco os manejos de adubação. No caso do índice SPAD, não houve diferença entre os tratamentos em nenhuma safra (Tabela 5). Já o NDVI<sub>GreenSeeker</sub> demonstrou leituras levemente inferiores no CONT em relação a FAZ+30% nas safras 2018/19 e 2020/21 (tabela 6), porém isso não se refletiu em diferença de produtividade (Tabela 12). O que refletiu em

aumento de produtividade de soja foi o consórcio de sorgo e milho com braquiária, com incremento de produtividade de 335 e 214 kg ha<sup>-1</sup> na soja subsequente nas safras 2019/20 e 2020/21, respectivamente. Os índices de vegetação obtidos a partir de imagens de satélite também não demonstraram diferenças entre os tratamentos (dados não apresentados). Porém vale lembrar que durante a estação chuvosa há muitos dias nublados que inviabilizam com o uso de imagens de satélite.

Tabela 5. Índice SPAD de cultivos de sucessão safra/segunda safra, em sistemas com ou sem introdução de braquiária, sob diferentes opções de adubação NPK. Unai - MG, 2022.

F. V.	G. L.	Soja	Sorgo	Sorgo	Soja	Soja	Milho	Milho
		2018/19 <sup>2</sup>	2019 <sup>1</sup>	2019 <sup>2</sup>	2019/20 <sup>2</sup>	2020/21 <sup>2</sup>	2021 <sup>1</sup>	2021 <sup>2</sup>
		Quadrado médio						
S	1	1,09 <sup>ns</sup>	4,46 <sup>ns</sup>	28,57**	6,65 <sup>ns</sup>	4,86 <sup>ns</sup>	2,57 <sup>ns</sup>	3,02 <sup>ns</sup>
Bl. (S)	6	2,61	4,25	18,30	2,62	10,0	0,56	0,27
A	6	0,58 <sup>ns</sup>	17,81**	5,88 <sup>ns</sup>	2,22 <sup>ns</sup>	2,23 <sup>ns</sup>	21,46**	148,10**
S * A	6	0,89 <sup>ns</sup>	0,42 <sup>ns</sup>	2,15 <sup>ns</sup>	2,21 <sup>ns</sup>	0,25 <sup>ns</sup>	2,61 <sup>ns</sup>	6,42*
Erro	36	1,11	2,22	2,64	2,30	1,38	2,12	2,00
C. V. (%)		3,01	3,39	3,20	4,46	3,55	2,91	2,76
CONT		34,6	40,6b	49,2	33,2	32,2	47,5c	41,8c
REST		35,0	44,3a	50,8	34,0	32,9	51,0a	52,9ab
REST +30%		35,4	44,9a	51,3	33,8	32,9	50,1ab	53,2a
REST -30%		34,8	43,7a	50,5	33,8	33,3	47,9bc	50,9b
SIST		34,8	44,3a	51,0	34,3	33,4	50,8a	53,3a
FAZ		35,0	44,6a	51,6	34,2	33,2	51,2a	52,7ab
FAZ +30%		35,3	44,8a	51,7	34,9	33,9	51,6a	54,2a
Com braquiária		35,1	44,2	50,2B	34,4	33,4	50,2	51,5
Sem braquiária		34,8	43,6	51,6A	33,7	32,8	49,8	51,0

S: Sistema de manejo; Bl. (S): blocos dentro de sistema; A: opção de adubação; S\*A: interação; <sup>1</sup>avaliação 30 dias após a semeadura; <sup>2</sup>avaliação durante o florescimento; \*\* significativo a 1% de probabilidade de erro; \* significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> não significativo.

No início do ciclo do sorgo na safra 2018/19, o índice SPAD demonstrava menor valor no CONT em relação aos demais (Tabela 5). Porém durante o florescimento a situação foi distinta. Nesse ponto foi constatado menor valor no sistema consorciado. O que explica essa alteração foi o fato de a braquiária começar a sombrear o sorgo, chegando ao ponto de toda a superfície do dossel do sorgo ser coberta por folhas de braquiária até o final do ciclo do sorgo (Figura 2). Assim, entende-se que a braquiária competiu com o sorgo por luz e nutrientes. Ao receber mais luz, a braquiária tem seu crescimento estimulado, tornando-se forte competidora (Borghetti et al., 2013).

Na cultura do sorgo, os índices de vegetação baseados no comprimento de onda infravermelho próximo (tanto dos sensores proximais quanto dos orbitais acoplados ao satélite), exceto NDVI<sub>Sentinel-2A</sub> apresentaram menores valores no tratamento controle, assim como maiores valores no sistema consorciado (Tabelas 6 e 7). Porém, maiores leituras no sistema consorciado não são necessariamente algo positivo, pois existe a possibilidade de haver competição entre as espécies.

Tabela 6. Valores de NDVI<sub>Greenseeker</sub> de cultivos de sucessão safra/segunda safra, em sistemas com ou sem introdução de braquiária, sob diferentes opções de adubação NPK. Unaí - MG, 2022.

F. V.	G. L.	Soja	Sorgo	Soja	Soja	Milho
		2018/19 <sup>2</sup>	2019 <sup>1</sup>	2019/20 <sup>2</sup>	2020/21 <sup>2</sup>	2021 <sup>1</sup>
		Quadrado médio				
S	1	0,005402**	0,003616*	0,010864**	0,000145 <sup>ns</sup>	0,004645 <sup>ns</sup>
Bl. (S)	6	0,005454	0,000316	0,02681	0,003297	0,001949
A	6	0,002531**	0,005824**	0,001314 <sup>ns</sup>	0,000229*	0,029864**
S * A	6	0,000456 <sup>ns</sup>	0,000191 <sup>ns</sup>	0,001239 <sup>ns</sup>	0,000053 <sup>ns</sup>	0,000907 <sup>ns</sup>
Erro	36	0,000673	0,000624	0,001400	0,000089	0,001173
C. V. (%)		3,43	3,37	5,22	1,19	5,48
CONT		0,72b	0,68b	0,71	0,78b	0,53b
REST		0,76a	0,76a	0,71	0,79ab	0,64a
REST +30%		0,76a	0,76a	0,71	0,79ab	0,66a
REST -30%		0,76a	0,75a	0,72	0,79ab	0,63a
SIST		0,74ab	0,75a	0,70	0,79ab	0,55b
FAZ		0,76a	0,74a	0,73	0,79ab	0,68a
FAZ +30%		0,77a	0,75a	0,74	0,80a	0,67a
Com braquiária		0,77A	0,75A	0,73A	0,79	0,63
Sem braquiária		0,75B	0,73B	0,70B	0,79	0,62

S: Sistema de manejo; Bl. (S): blocos dentro de sistema; A: opção de adubação; S\*A: interação; <sup>1</sup>avaliação 30 dias após a semeadura; <sup>2</sup>avaliação durante o florescimento; \*\* significativo a 1% de probabilidade de erro; \* significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> não significativo.



Figura 2. Consórcio com braquiária na fase vegetativa do sorgo granífero (esquerda) e próximo à maturação fisiológica (direita). Fotos: Álvaro Vilela de Resende.

Tabela 7. Índices de vegetação a partir de imagem do satélite Sentinel-2A no cultivo de sorgo, aos 60 dias após a semeadura (25/04/2019), em sistemas com ou sem introdução de braquiária, sob diferentes opções de adubação NPK. Unai - MG, 2022.

F. V.	G. L.	NDVI	EVI	GARI	MPRI	SAVI	TVI
Quadrado Médio							
S	1	0,000172 <sup>ns</sup>	0,002418**	0,005149**	0,000969 <sup>ns</sup>	0,001794**	0,178089**
Bl. (S)	6	0,000193	0,000119	0,000244	0,000220	0,000026	0,010163
A	6	0,000282**	0,001563**	0,002829**	0,000199 <sup>ns</sup>	0,000677**	0,153104**
S * A	6	0,000047 <sup>ns</sup>	0,000058 <sup>ns</sup>	0,000076 <sup>ns</sup>	0,000128 <sup>ns</sup>	0,000010 <sup>ns</sup>	0,001881 <sup>ns</sup>
Erro	36	0,000098	0,000155	0,000172	0,000334	0,000070	0,006304
C. V. (%)		1,17	1,66	1,97	8,88	1,20	1,82
CONT		0,84b	0,72b	0,62b	0,21	0,68b	4,05b
REST		0,86a	0,76a	0,67a	0,21	0,71a	4,42a
REST+30%		0,86a	0,76a	0,68a	0,21	0,71a	4,46a
REST-30%		0,85ab	0,75a	0,66a	0,20	0,70a	4,34a
SIST		0,86a	0,76a	0,67a	0,21	0,71a	4,41a
FAZ		0,85ab	0,75a	0,67a	0,21	0,70a	4,37a
FAZ+30%		0,85ab	0,76a	0,67a	0,20	0,70a	4,42a
Com braquiária		0,85	0,76A	0,67A	0,21	0,71A	4,41A
Sem braquiária		0,85	0,74B	0,66B	0,20	0,69B	4,29B

S: Sistema de manejo; Bl. (S): blocos dentro de sistema; A: opção de adubação; S\*A: interação; <sup>1</sup>avaliação 30 dias após a semeadura; <sup>2</sup>avaliação durante o florescimento; \*\* significativo a 1% de probabilidade de erro; \* significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> não significativo.

Um ponto importante é o fato de a primeira imagem de satélite, sem a presença de nuvens, durante o ciclo do sorgo ter sido captada 60 dias após a semeadura (Figura 3). Do ponto de vista prático, para que imagens de satélite possam ser utilizadas para manejo de adubação de cobertura, há a necessidade de que elas estejam disponíveis mais precocemente no ciclo, caso contrário o momento ideal de aplicação dos fertilizantes nitrogenados seria perdido.



Figura 3. Composição de imagens obtidas em cor verdadeira (4-3-2, RGB) obtidas do sensor Sentinel-2A, no cultivo de (A) sorgo aos 60 dias após a semeadura (25/04/2019), (B) milho aos 25 dias após a semeadura (30/03/2020) e (C) milho aos 35 dias após a semeadura (14/04/2021). Fonte: Copernicus & SENTINEL Hub.

Já na cultura do milho, nas safras 2019/20 e 2020/21 houve maior diferenciação entre os tratamentos considerando diferentes índices, entre eles o  $NDVI_{Sentinel-2}$  (Figura 4). A diferença absoluta entre o índice  $NDVI_{Sentinel-2}$  das opções de adubação CONT e REST+30% foi de 0,02 no caso do sorgo, e 0,13 e 0,14 no caso do milho, nas safras 2019/20 e 2020/21, respectivamente (Tabelas 8 e 9). Guardadas as proporções, esses dados demonstram que a opção por deixar de adubar em solos de fertilidade construída, pode não demonstrar perda de potencial da lavoura no primeiro ano, porém o esgotamento da fertilidade com o passar do tempo se apresenta. No caso deste trabalho, o efeito foi evidente na cultura de milho segunda safra, possivelmente pela cultura do milho ter uma demanda alta por nutrientes, especialmente N (Silva et al., 2018), além de a segunda safra ser conduzida em condições hídricas limitantes (Andrea et al., 2018), o que limita a absorção de nutrientes via fluxo de massa.

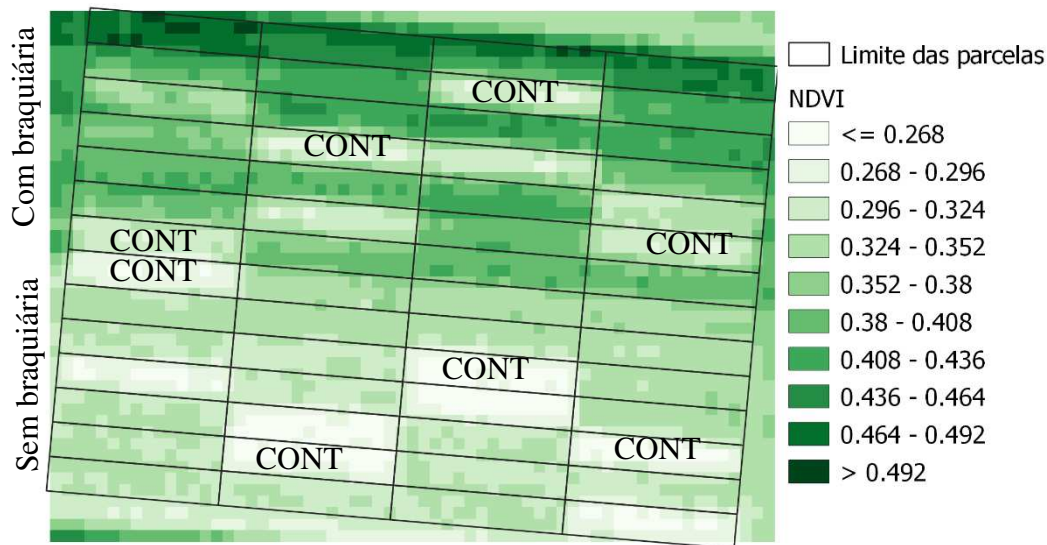


Figura 4. Índice de vegetação NDVI a partir de imagem do satélite Sentinel-2A no cultivo de milho, aos 25 dias após a semeadura (30/03/2020), em sistemas com ou sem introdução de braquiária, sob diferentes opções de adubação NPK. Unai - MG, 2022.

Tabela 8. Índices de vegetação a partir de imagem do satélite Sentinel-2A no cultivo de milho, aos 25 dias após a semeadura (30/03/2020), em sistemas com ou sem introdução de braquiária, sob diferentes opções de adubação NPK. Unai - MG, 2022.

F. V.	G. L.	NDVI	EVI	GARI	MPRI	SAVI	TVI
		Quadrado Médio					
S	1	0,015645**	0,006776**	0,007685**	-	0,005461**	0,265926**
Bl. (S)	6	0,000917	0,000409	0,000545	-	0,000315	0,019024
A	6	0,027587**	0,010838**	0,016423**	-	0,009183**	0,438048**
S * A	6	0,000188 <sup>ns</sup>	0,000078 <sup>ns</sup>	0,000110 <sup>ns</sup>	-	0,000063 <sup>ns</sup>	0,003236 <sup>ns</sup>
Erro	36	0,000746	0,000317	0,000436	-	0,000258	0,012916
C. V. (%)		7,50	8,48	5,56	-	7,56	10,80
CONT		0,28d	0,16d	0,31d	-0,20	0,16d	0,72d
REST		0,39bc	0,22bc	0,39bc	-0,16	0,22bc	1,13bc
REST+30%		0,41ab	0,24ab	0,41ab	-0,15	0,24ab	1,24ab
REST-30%		0,35c	0,20c	0,36c	-0,18	0,20c	0,98c
SIST		0,30d	0,17d	0,32d	-0,20	0,17d	0,78d
FAZ		0,39ab	0,23ab	0,40ab	-0,16	0,23ab	1,17ab
FAZ+30%		0,43a	0,26a	0,43a	-0,13	0,25a	1,34a
Com braquiária		0,38A	0,22A	0,39A	-0,16	0,22A	1,12A
Sem braquiária		0,35B	0,20B	0,36B	-0,18	0,20B	0,98B

S: Sistema de manejo; Bl. (S): blocos dentro de sistema; A: opção de adubação; S\*A: interação; <sup>1</sup>avaliação 30 dias após a semeadura; <sup>2</sup>avaliação durante o florescimento; \*\* significativo a 1% de probabilidade de erro; \* significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> não significativo.

Tabela 9. Índices de vegetação a partir de imagem do satélite Sentinel-2A no cultivo de milho, aos 35 dias após a semeadura (14/04/2021), em sistemas com ou sem introdução de braquiária, sob diferentes opções de adubação NPK. Unai - MG, 2022.

F. V.	G. L.	NDVI	EVI	GARI	MPRI	SAVI	TVI
		Quadrado Médio					
S	1	0,000148 <sup>ns</sup>	0,000016 <sup>ns</sup>	0,000046 <sup>ns</sup>	-	<0,000001 <sup>ns</sup>	0,000154 <sup>ns</sup>
Bl. (S)	6	0,000043	0,000246	0,000036	-	0,000065	0,002473
A	6	0,037761 <sup>**</sup>	0,054737 <sup>**</sup>	0,029788 <sup>**</sup>	-	0,028867 <sup>**</sup>	0,582357 <sup>**</sup>
S * A	6	0,000330 <sup>ns</sup>	0,000323 <sup>ns</sup>	0,000190 <sup>ns</sup>	-	0,000152 <sup>ns</sup>	0,002473 <sup>ns</sup>
Erro	36	0,000257	0,000477	0,000161	-	0,000207	0,004792
C. V. (%)		2,10	3,49	1,80	-	2,70	3,71
CONT		0,63d	0,48e	0,58e	-0,01	0,42e	1,39e
REST		0,79a	0,66b	0,73b	0,12	0,56b	1,97b
REST+30%		0,80a	0,67ab	0,74ab	0,12	0,57ab	2,03ab
REST-30%		0,77b	0,62c	0,71c	0,09	0,53c	1,85c
SIST		0,71c	0,54d	0,67d	0,01	0,48d	1,61d
FAZ		0,81a	0,69ab	0,75ab	0,15	0,58ab	2,08ab
FAZ+30%		0,82a	0,70a	0,75a	0,15	0,59a	2,12a
Com braquiária		0,76	0,62	0,70	0,08	0,53	1,87
Sem braquiária		0,76	0,63	0,70	0,10	0,53	1,86

S: Sistema de manejo; Bl. (S): blocos dentro de sistema; A: opção de adubação; S\*A: interação; <sup>1</sup>avaliação 30 dias após a semeadura; <sup>2</sup>avaliação durante o florescimento; \*\* significativo a 1% de probabilidade de erro; \* significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> não significativo.

A opção SIST também se apresentou-se como limitante ao crescimento inicial da cultura do milho. As observações dos diferentes índices baseados em NIR de SIST, foram equivalentes à opção CONT na safra 2019/20 e intermediários entre CONT e REST na safra 2020/21. Assim sendo, o fato de SIST apresentar índices de vegetação inferiores à REST demonstra a diferença entre concentrar a adubação na soja ou parcelar entre as duas culturas. Isso se dá pela capacidade da adubação de base na linha, especialmente com N, em estimular o vigor inicial da cultura mesmo em solos com alto teor de P (Roth et al., 2003). Já o índice SPAD foi semelhante entre SIST e REST, sugerindo que a diferença entre estas opções de adubação não está associada à intensidade de verde, mas sim à menor biomassa das plantas associada com o crescimento inicial mais lento.

Já para o caso de REST, REST+30% e FAZ, os índices de vegetação não são capazes de diferenciá-los. Sendo assim, para este caso, é necessária a análise da produtividade, associada à análise dos custos, para concluir sobre a melhor opção de adubação (vide capítulo 2). A análise foliar, por sua vez, não discriminou bem os tratamentos, permanecendo todos os

tratamentos dentro dos níveis considerados adequados para as culturas para os elementos N, P e K (Apêndice).

Quanto à produtividade de grãos, o sorgo e o milho responderam às opções de adubação, sendo que para o primeiro houve interação com o sistema consorciado ou não com braquiária (Tabela 10). O sorgo respondeu a adubação apenas no sistema solteiro, com produtividade variando de 8.148 a 9.482 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 11). No sistema em consórcio com braquiária, houve menor rendimento de grãos alcançando 7.131 kg ha<sup>-1</sup>, porém ainda bem superior à média estadual de 3.492 kg ha<sup>-1</sup> em 2019 (Conab, 2022).

Tabela 10. Produtividade de grãos (kg ha<sup>-1</sup>) de cultivos de sucessão safra/segunda safra, em sistemas com ou sem introdução de braquiária, sob diferentes opções de adubação NPK. Unai - MG, 2022.

F. V.	G. L.	Soja 2018/19	Sorgo 2019	Soja 2019/20	Milho 2020	Soja 2020/21	Milho 2021
		Quadrado médio					
Sistema - S	1	26.448 <sup>ns</sup>	46.133.671 <sup>**</sup>	1.566.798 <sup>**</sup>	562.403 <sup>ns</sup>	641.572 <sup>**</sup>	218.625 <sup>ns</sup>
Bloco (S)	6	28.429	152.922	267.439	894.961	85.294	971.015
Adubação - A	6	177.090 <sup>ns</sup>	227.202 <sup>ns</sup>	29.106 <sup>ns</sup>	12.004.703 <sup>**</sup>	61.268 <sup>ns</sup>	12.603.511 <sup>**</sup>
S * A	6	34.958 <sup>ns</sup>	1.136.568 <sup>**</sup>	49.768 <sup>ns</sup>	153.959 <sup>ns</sup>	105.554 <sup>ns</sup>	406.974 <sup>ns</sup>
Erro	36	13.737	327.144	39.016	202.203	49.718	339.734
C. V. (%)		8,03	7,12	4,39	5,95	4,67	8,60
CONT		4.427	7.734	4.577	5.075 e	4.864	4.061 c
REST		4.473	8.022	4.411	7.901 bc	4.885	7.483 a
REST+30%		4.803	8.306	4.552	8.624 a	4.776	7.579 a
REST-30%		4.560	8.021	4.455	7.189 d	4.838	6.558 b
SIST		4.609	8.032	4.524	7.342 cd	4.672	6.908 ab
FAZ		4.794	8.112	4.458	8.298 ab	4.682	7.503 a
FAZ+30%		4.702	8.040	4.533	8.482 ab	4.723	7.362 ab
Com braquiária		4.646	7.131 B	4.669 A	7.458	4.884 A	6.717
Sem braquiária		4.602	8.946 A	4.334 B	7.659	4.670 B	6.842

\*\* significativo a 1% de probabilidade de erro; \* significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> não significativo.

Tabela 11. Produtividade de grãos ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) de sorgo segunda safra 2019, em sistemas com ou sem introdução de braquiária, sob diferentes opções de adubação NPK. Unai - MG, 2022.

	Com braquiária	Sem braquiária
CONT	7320Ba	8148Ab
REST	7343Ba	8702Aab
REST+30%	7425Ba	9186Aab
REST-30%	7257Ba	8785Aab
SIST	6571Ba	9495Aa
FAZ	6743Ba	9482Aa
FAZ+30%	7256Ba	8825Aab
Média	7131B	8946A

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

### 2.3.2 Correlações entre os índices de vegetação e a resposta das culturas

O sensor de melhor correlação com a produtividade do sorgo foi o SPAD, com leituras realizadas durante o florescimento (Tabela 12). Apesar de significativa, a correlação entre produtividade e SPAD é baixa ( $r = 0,58$ ). Plotando a relação entre produtividade e o índice SPAD em uma regressão, percebe-se que o coeficiente de determinação também é baixo ( $R^2 = 0,35$ ), ficando pouco melhor ( $R^2 = 0,42$ ) pela exclusão do CONT do conjunto de dados (Figura 5). Algo semelhante ocorreu com a correlação entre produtividade e teor de N na folha, que apesar de significativa, é baixa ( $r = 0,68$ ), além de possuir baixo coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,47$ ; Figura 6).

Possivelmente isso ocorreu pela competição da braquiária com o sorgo de dar a partir de algum ponto avançado na fase vegetativa do sorgo. Outro motivo é o fato de os índices de vegetação apresentarem leituras superiores no sistema consorciado, onde boa parte da energia solar absorvida pelo dossel foi convertida em biomassa de braquiária ao invés de grãos de sorgo. O total da biomassa de braquiária após a maturação do sorgo alcançou em média  $2.515 \text{ kg ha}^{-1}$ . Assim sendo, caso a braquiária venha a competir com a cultura principal, recomendações de manejo da adubação nitrogenada baseadas em sensores se tornam viesadas.

Tabela 12. Correlação entre produtividade de grãos (Prod), altura de planta (Alt) e diâmetro de colmo (Diam) do sorgo segunda safra 2019, e índices de vegetação obtidos com sensores proximais (SPAD® e Greenseeker®) e orbitais (satélite Sentinel-2A), em sistemas com ou sem introdução de braquiária, sob diferentes opções de adubação NPK. Unai - MG, 2022.

	Prod	Alt	Diam	SPAD <sup>1,3</sup>	SPAD <sup>2,3</sup>	NDVI <sup>1,3</sup>	NDVI <sup>4</sup>	EVI <sup>4</sup>	GARI <sup>4</sup>	MPRI <sup>4</sup>	SAVI <sup>4</sup>	TVI <sup>4</sup>	N <sub>folha</sub>	P <sub>folha</sub>	K <sub>folha</sub>	
Produtividade	1,00															
Altura <sup>1</sup>	-0,15	1,00														
Diâmetro <sup>1</sup>	0,58	0,50	1,00													
SPAD <sup>1,3</sup>	-0,08	0,88	0,48	1,00												
SPAD <sup>2,3</sup>	0,59	0,25	0,67	0,52	1,00											
NDVI <sup>GreenSeeker</sup> <sup>1,3</sup>	-0,18	0,91	0,44	0,94	0,36	1,00										
NDVI <sup>Sentinel-2</sup> <sup>4</sup>	-0,17	0,64	0,24	0,77	0,33	0,81	1,00									
EVI <sup>4</sup>	-0,29	0,87	0,24	0,93	0,27	0,95	0,83	1,00								
GARI <sup>4</sup>	-0,31	0,91	0,25	0,94	0,23	0,96	0,79	0,99	1,00							
MPRI <sup>4</sup>	-0,53	0,01	-0,53	0,12	-0,21	0,19	0,60	0,36	0,30	1,00						
SAVI <sup>4</sup>	-0,38	0,84	0,13	0,87	0,12	0,90	0,86	0,97	0,97	0,46	1,00					
TVI <sup>4</sup>	-0,27	0,88	0,30	0,96	0,32	0,97	0,83	0,99	0,99	0,30	0,96	1,00				
N <sub>folha</sub>	0,68	0,15	0,68	0,36	0,70	0,19	0,17	0,12	0,09	-0,38	0,02	0,17	1,00			
P <sub>folha</sub>	0,58	0,43	0,69	0,62	0,75	0,52	0,40	0,45	0,42	-0,25	0,32	0,49	0,72	1,00		
K <sub>folha</sub>	0,13	0,38	0,46	0,51	0,37	0,43	0,08	0,32	0,36	-0,44	0,22	0,41	0,31	0,69	1,00	

<sup>1</sup> avaliado 30 dias após o plantio; <sup>2</sup> avaliado no florescimento; <sup>3</sup> utilizando sensor proximal; <sup>4</sup> utilizando sensor orbital; \* significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> não significativo.

Diferentemente do sorgo, o milho não foi afetado no sistema de consórcio com braquiária, o que deve estar associado ao rápido fechamento do dossel pelo milho e por consequência a menor produção de biomassa pela braquiária, 617 e 873 kg ha<sup>-1</sup> nas safras 2019/20 e 2020/21, respectivamente. Na safra 2019/20 a produtividade do milho variou de 5.075 a 8.624 kg ha<sup>-1</sup> e na safra 2020/21 de 4.061 a 7.579 kg ha<sup>-1</sup>. Em ambas as safras, o índice de vegetação obtido a partir das imagens de satélite com a melhor correlação com produtividade foi o índice GARI ( $r = 0,82$  e  $0,93$  em 2019/20 e 2020/21, respectivamente; Tabelas 13 e 14).

Tabela 13. Correlação entre produtividade de grãos e altura de planta do milho segunda safra 2020, e índices de vegetação obtidos com sensores orbitais (satélite Sentinel-2A), em sistemas com ou sem introdução de braquiária, sob diferentes opções de adubação NPK. Unaí - MG, 2022.

	Prod.	Altura	NDVI	EVI	GARI	MPRI	SAVI	TVI
Produtividade	1,00							
Altura	0,95	1,00						
NDVI <sub>Sentinel-2</sub>	0,80	0,81	1,00					
EVI	0,79	0,80	1,00	1,00				
GARI	0,82	0,82	1,00	1,00	1,00			
MPRI	0,74	0,75	0,99	0,99	0,98	1,00		
SAVI	0,80	0,80	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	
TVI	0,79	0,80	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00

\* significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> não significativo.

Percebe-se a ocorrência de melhores correlações entre os índices de vegetação e a produtividade com o passar dos anos, pelos efeitos cumulativos das opções de adubação. Porém, quando é removido o conjunto de dados do CONT, reduz-se consideravelmente o coeficiente de determinação da regressão ( $R^2$  passa de 0,67 para 0,56 em 2019/20 e de 0,86 para 0,38 em 2020/21). Fato semelhante também acontece com a relação entre produtividade e o teor de nitrogênio na folha. Há uma alta correlação entre as variáveis ( $r = 0,88$ ,  $R^2 = 0,77$ ), porém o tratamento CONT apresenta uma grande influência nas estimativas ( $R^2 = 0,29$  quando removido CONT do conjunto de dados). Assim sendo, a maior eficiência no uso de sensores pode ser esperada em ambientes com as maiores discrepâncias ou amplitudes no suprimento de nutrientes, especialmente do N. No caso de menores diferenças no aporte de nutrientes, em condições de fertilidade construída, eventuais variações nas leituras dos sensores tendem a ser circunstanciais, sem necessariamente atestarem diferenças de potencial produtivo. Em cenários assim, o uso de sensores pode ser pouco efetivo para diagnósticos do estado nutricional e tomada de decisão de manejo da adubação.

Tabela 14. Correlação entre produtividade de grãos (Prod), altura de planta (Alt) e diâmetro de colmo (Diam) do milho segunda safra 2021, e índices de vegetação obtidos com sensores proximais (SPAD® e GreenSeeker®) e orbitais (satélite Sentinel-2A), em sistemas com ou sem introdução de braquiária, sob diferentes opções de adubação NPK. Unai - MG, 2022.

	Prod	Alt	Diam	SPAD <sup>1,3</sup>	SPAD <sup>2,3</sup>	NDVI <sup>1,3</sup>	NDVI <sup>4</sup>	EVI <sup>4</sup>	GARI <sup>4</sup>	MPRI <sup>4</sup>	SAVI <sup>4</sup>	TVI <sup>4</sup>	N <sub>folha</sub>	P <sub>folha</sub>	K <sub>folha</sub>	
Produtividade	1,00															
Altura	0,95	1,00														
Diâmetro	0,89	0,92	1,00													
SPAD <sup>1,3</sup>	0,74	0,62	0,63	1,00												
SPAD <sup>2,3</sup>	0,93	0,91	0,86	0,78	1,00											
NDVI <sup>GreenSeeker</sup> <sup>1,3</sup>	0,74	0,83	0,80	0,49	0,64	1,00										
NDVI <sup>Sentinel-2</sup> <sup>4</sup>	0,90	0,94	0,85	0,62	0,82	0,93	1,00									
EVI <sup>4</sup>	0,85	0,90	0,80	0,60	0,75	0,96	0,99	1,00								
GARI <sup>4</sup>	0,93	0,96	0,88	0,65	0,86	0,91	1,00	0,98	1,00							
MPRI <sup>4</sup>	0,77	0,84	0,71	0,53	0,65	0,94	0,96	0,99	0,94	1,00						
SAVI <sup>4</sup>	0,88	0,92	0,84	0,63	0,79	0,95	1,00	1,00	0,99	0,97	1,00					
TVI <sup>4</sup>	0,85	0,90	0,82	0,62	0,77	0,96	0,99	1,00	0,98	0,98	1,00	1,00				
N <sub>folha</sub>	0,88	0,79	0,73	0,86	0,90	0,47	0,70	0,63	0,74	0,55	0,67	0,65	1,00			
P <sub>folha</sub>	0,84	0,81	0,87	0,79	0,93	0,59	0,72	0,66	0,77	0,54	0,71	0,69	0,86	1,00		
K <sub>folha</sub>	0,39	0,45	0,59	0,48	0,53	0,33	0,32	0,28	0,36	0,17	0,32	0,30	0,53	0,73	1,00	

<sup>1</sup> avaliado 30 dias após o plantio; <sup>2</sup> avaliado no florescimento; <sup>3</sup> utilizando sensor proximal; <sup>4</sup> utilizando sensor orbital; \* significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> não significativo.

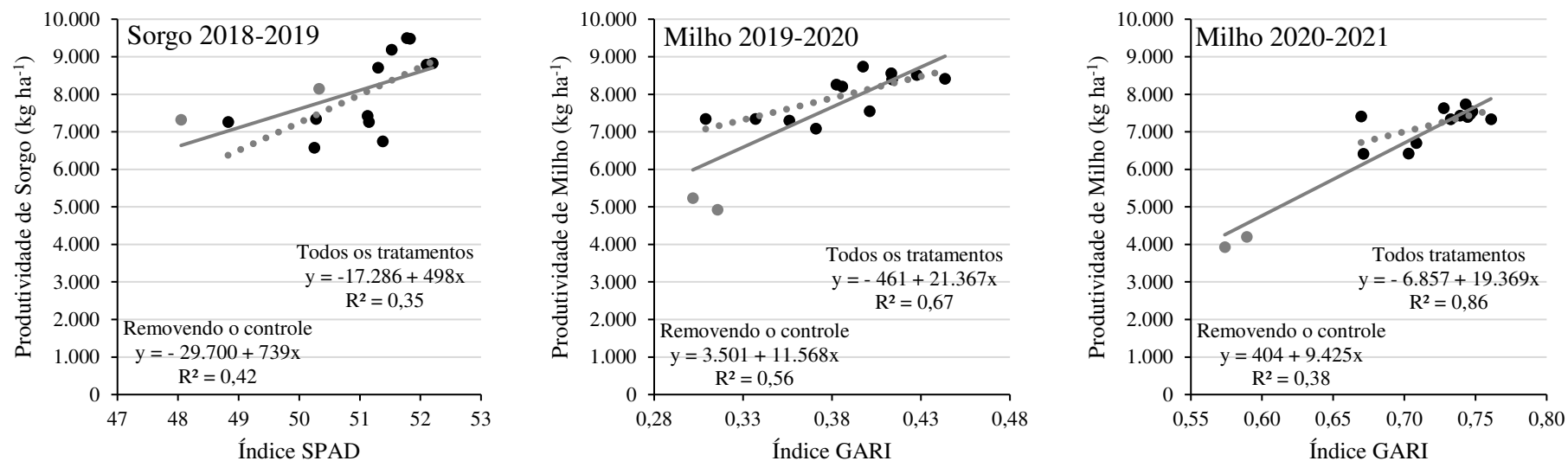


Figura 5. Relação entre produtividade (kg ha<sup>-1</sup>) e os índices SPAD para sorgo segunda safra 2019 e GARI para o milho segunda safra 2020 e 2021, em sistemas com ou sem introdução de braquiária, sob diferentes opções de adubação NPK. Unai - MG, 2022. Pontos na cor cinza representam o tratamento de adubação CONT, enquanto os pontos na cor preto representam os demais tratamentos; A reta contínua representa a regressão utilizando todos os tratamentos, enquanto a reta pontilhada representa a regressão excluindo os pontos do tratamento CONT.

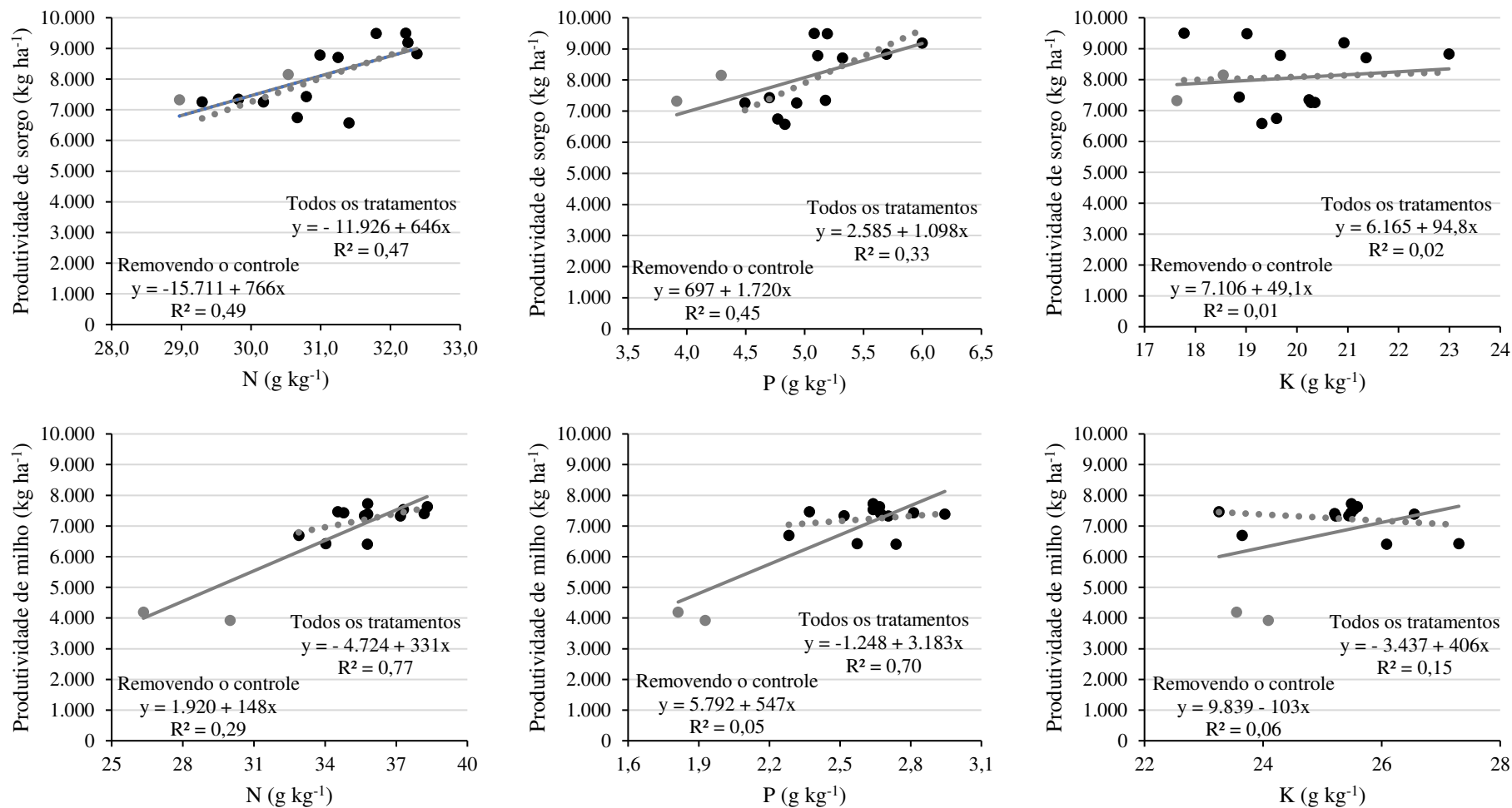


Figura 6. Relação entre as concentrações de N, P e K (g kg<sup>-1</sup>) na folha indicadora e a produtividade de sorgo (segunda safra 2019) e de milho (segunda safra 2021), em sistemas com ou sem introdução de braquiária, sob diferentes opções de adubação NPK. Unaí – MG, 2022. Pontos na cor cinza representam o tratamento de adubação CONT, enquanto os pontos na cor preto representam os demais tratamentos; A reta contínua representa a regressão utilizando todos os tratamentos, enquanto a reta pontilhada representa a regressão excluindo os pontos do tratamento CONT.

## 2.4 Conclusões

Índices de vegetação são pouco efetivos em discriminar condições de lavoura em solo de fertilidade construída, mesmo com diferenças de 30% nas quantidades de nutrientes fornecidas às culturas.

As culturas do sorgo e do milho foram mais responsivas aos tratamentos, com reflexos nas leituras dos sensores e na produtividade de grãos, o que não se verificou no caso da soja.

Em sistemas de sorgo ou milho consorciado com braquiária, o monitoramento baseado em índices de vegetação pode não refletir o estado nutricional ou potencial produtivo da cultura principal.

Dentre os índices de vegetação, GARI, obtido a partir de imagens de satélite, foi mais sensível em discriminar o estado nutricional e o potencial produtivo do milho segunda safra.

## 2.5 Referências bibliográficas

ANDREA, M. C. S.; BOOTE, K. J.; SENTELHAS, P. C.; ROMANELLI, T. L. Variability and limitations of maize production in Brazil: Potential yield, water-limited yield and yield gaps. **Agricultural Systems**, v. 165, p. 264-273, 2018.

BORGHI, E.; CRUSCIOL, C. A. C.; MATEUS, G. P.; NASCENTE, A. S.; MARTINS, P. O. Intercropping time of corn and palisadegrass or guineagrass affecting grain yield and forage production. **Crop Science**, v. 53, n. 2, p. 629–636, 2013. <https://doi.org/10.2135/cropsci2012.08.0469>

BROGE, N. H.; LEBLANC, E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, n. 6, p. 156- 172, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00197-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00197-8)

Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB. **Portal de informações agropecuárias: Série histórica dos grãos**. 2022. Disponível em: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-serie-historica-graos.html>. Acesso em: 03 de julho de 2022.

ESA – European Space agency. **SENTINEL-2 User handbook**. Paris: ESA Standard document. 2013. 64p.

FERREIRA, D. F. 2019. Sisvar: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 37, n. 4, p. 529-535. <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>

GAMON, J. A.; FIELD, C. B.; GOULDEN, M. L.; GRIFFIN, K. L.; HARTLEY, A. E.; JOEL, G.; PENUELAS, J.; VALENTINI, R. Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three californian vegetation types. **Ecological Applications**, v. 5, p. 28-41, 1995. <https://doi.org/10.2307/1942049>

- GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 289-298, 1996.
- HUANG, S.; TANG, L.; HUPY, J. P.; WANG, Y.; SHAO, G. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. **Journal of Forestry Research**, v. 32, p. 1–6, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- HUETE, A. R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- JORGE, L. A. C.; INAMASU, R. Y. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H., INAMASU, R. Y. (Eds). **Agricultura de precisão: Resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa; 2014. Disponível em: <http://www.macroprograma1.cnptia.embrapa.br/redeap2/publicacoes/publicacoes-da-rede-ap/agricultura-de-precisao-resultados-de-um-novo-olhar-1>. Acessado em: 20 de fevereiro de 2019.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.
- MARKWELL, J.; OSTERMAN, J.C.; MITCHELL, J. L. Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. *Photosynthesis Research*, v. 46, p. 467–472, 1995. <https://doi.org/10.1007/BF00032301>
- MULLA, D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. **Biosystems Engineering**, v. 114, p. 4, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>.
- OLIVEIRA, S. A. **Análise foliar**. In: SOUSA, D. M. G., LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. 416p
- OSGeo - Open Source Geospatial Foundation. **Guia do usuário QGIS**. Disponível em: [https://qgis.org/pt\\_BR/site/index.html](https://qgis.org/pt_BR/site/index.html). Acessado em: 23 de julho de 2022.
- RESENDE, A. V.; BRANDÃO, Z. N.; GREGO, C. R.; BORGHI, E.; WILDA, L. R. M. **Manejo do solo sob o enfoque da agricultura de precisão**. Viçosa: SBCS, 2015. 52p.
- ROTH, G. W.; BEEGLE, D. B.; ANTLE, M. E. Evaluation of starter fertilizers for corn on soils testing high for phosphorus. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 34, n. 9, p. 1381-1392, 2003.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W.; HARLAN, J. C. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation**. Texas: Texas A&M University, 1974.
- SCHEPERS, J. S.; FRANCIS, D. D.; VIGIL, M.; BELOW, F. E. Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 23, p. 2173-2187, 1992. <https://doi.org/10.1080/00103629209368733>
- SILVA, C. G. M.; RESENDE, A. V.; GUTIÉRREZ, A. M.; MOREIRA, S. G.; BORGHI, E.; ALMEIDA, G. O. Macronutrient uptake and export in transgenic corn under two levels of fertilization. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, p. 1363-1372, 2018.

WILDA, L. R. M. **Plant sensors for nitrogen monitoring and fertilization impacts on the nutrient dynamic on maize crop**. Lavras: UFLA, 2018. 93p. (Tese doutorado - Universidade Federal de Lavras)

YANG, Z.; WILLIS, P.; MUELLER, R. **Impact of band-ratio enhanced AWIFS image to crop classification accuracy**. In: Pecora 17 Symposium – The Future of Land Imaging ... Going Operational. 2008. Disponível em: <http://www.asprs.org/a/publications/proceedings/pecora17/0041.pdf>. Acesso em: 19 de julho de 2022.

### **3. BALANÇO DE NUTRIENTES E ADUBAÇÃO DE RESTITUIÇÃO: ESTRATÉGIA PARA ASSOCIAR PRODUTIVIDADE, RENTABILIDADE E EFICIÊNCIA DE USO DE NUTRIENTES EM SOLO DE FERTILIDADE CONSTRUÍDA**

#### **3.1. Introdução**

O Cerrado é um bioma brasileiro que engloba grande área com vegetação de savana. A maior parte desse bioma é formado por solos altamente intemperizados, com sérias limitações para a produção de alimentos devido à baixa fertilidade natural. Além de baixas concentrações de nutrientes, apresentam alta saturação por alumínio, e alta capacidade de fixação de fósforo pela predominância de argilas minerais de baixa atividade e óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al). Porém, a combinação de terras planas, boa agregação do solo, assim como boas condições de profundidade e drenagem são características que conferem alta probabilidade de sucesso com agricultura mecanizada (Lopes & Guilherme, 2016).

Com a evolução da agricultura no Cerrado, o Brasil passou de um cenário com cultivos de baixas produtividades para sistemas de produção intensivos. Roy et al. (2016) relatam que vários fatores, que inexistem em outras regiões, foram importantes na evolução da agricultura brasileira: (i) economia de escala com grandes áreas adquiridas a baixos preços; (ii) clima favorável; (iii) agricultores com o capital necessário para suprir a necessidade de fósforo e outros insumos para altas produtividades e (iv) a facilidade de comércio de *commodities* dentro e fora do país.

Em muitas lavouras, sucessivas aplicações de corretivos e fertilizantes possibilitaram efeitos residuais cumulativos que acabaram por condicionar os atributos químicos de fertilidade acima dos respectivos níveis críticos indicados na literatura, sendo assim a disponibilidade de nutrientes interpretada como alta ou muito alta, caracterizando solos de fertilidade construída. Esses solos estão geralmente associados ao manejo do sistema de produção, envolvendo plantio direto e uso de plantas de cobertura, que conferem benefícios adicionais associados à manutenção ou aumento da matéria orgânica do solo, além da constante utilização de calcário e gesso para controle da acidez (Resende et al., 2016).

A adubação corresponde a grande parte do investimento na produção agrícola brasileira. Outro “custo” associado ao P é relativo à sua fixação no solo, por adsorção devido à alta concentração de óxidos de Fe e Al, típica dos solos tropicais mais argilosos, além da tendência de precipitação com cálcio (Ca) e Al. Estima-se que as culturas extraem aproximadamente apenas metade do fósforo aplicado em solos brasileiros, ficando o restante

retido no solo, caracterizando uma baixa eficiência de uso (Roy et al., 2016). Não obstante, ao contrário do que se acreditava, a fixação do fósforo em formas de baixa labilidade não é permanente, havendo um equilíbrio entre as diversas frações deste nutriente. Esse fósforo residual no solo é lentamente liberado, porém esse processo não é rápido o suficiente para a nutrição de uma cultura sem haver prejuízo de produtividade, até que se alcance o nível crítico deste nutriente no solo (Syers et al., 2008).

Dados experimentais demonstram que as sucessivas aplicações de fósforo inorgânico contribuem para a elevação do P do solo e reduzem a capacidade de adsorção (Roy et al., 2017). Porém estes mesmos dados dão indicativos de que três décadas de cultivo e adubação não são suficientes para saturar completamente o solo, podendo ser necessário até um século para que o balanço de P possa ser nulo sem reduzir a produtividade. Essa inferência, contudo, parece não se aplicar a todas as situações de lavouras no Cerrado, haja vista os relatos de cultivos sem perda de produtividade da soja por uma ou mais safras na ausência de adubação, como foi o caso numa fazenda na região de Unaí-MG (Lacerda et al., 2015).

Ao contrário do fósforo, o potássio não permanece fortemente retido no solo. Porém, este nutriente também se apresenta em formas trocáveis e não trocáveis. A aplicação de quantidades de K abaixo da exportação das culturas causa redução das concentrações de K trocável e não trocável no solo, enquanto que doses acima da exportação causam migração do nutriente no perfil do solo, causando perdas. Além disso, as próprias espécies de interesse agrícola possuem diferentes capacidades de absorção deste nutriente. Desse modo, o desafio é o estabelecimento do nível de suficiência, a partir do qual a recomendação de K deve se basear na restituição da exportação da cultura e não com base em faixas de interpretação da análise de solo e das tabelas de recomendação (Kaminski et al., 2010), como ainda predomina atualmente na maioria das regiões agrícolas brasileiras.

Existem estratégias para aumentar a eficiência do uso de fertilizantes. O sistema de plantio direto, por exemplo, além de aumentar a concentração de fósforo na camada superficial, ainda aumenta a fração de fósforo em formas mais lábeis como o fósforo orgânico, que é mais disponível ao aproveitamento pelas plantas (Rodrigues et al., 2016).

Outra estratégia é o uso de duas culturas em sucessão no mesmo ano agrícola (safra e segunda safra), como é o caso da sucessão soja/milho, que possibilita o aumento da taxa de recuperação. No caso da cultura de segunda safra, muitas vezes não é aplicado P, e mesmo

quando aplicado, a quantidade exportada de P na colheita dos grãos é superior à taxa aplicada, aumentando a recuperação do nutriente no sistema (Roy et al., 2017).

Além disso, existe a possibilidade de se utilizar plantas de cobertura, como a braquiária. Essa espécie forrageira pode ser cultivada em consórcio com a cultura de segunda safra (milho ou sorgo). Para o sistema plantio direto, o uso da braquiária possibilita o aumento da biomassa de palhada adicionada ao sistema. Isso influencia a fertilidade, pelo aumento da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes, além de melhorar as condições físicas do solo pela ação e incremento da biomassa de raízes (Salton & Tomazi, 2014).

Também é possível obter aumentos de eficiência pelo melhor dimensionamento das doses aplicadas. Experimentos permitiram identificar situações de lavouras em solos de fertilidade construída em que o manejo realizado pelos produtores poderia ser redimensionado (Lacerda et al., 2015; Hickmann et al., 2018), com menor aplicação de determinados nutrientes e sem perda de produtividade, resultando em ganhos de rentabilidade. Nesse sentido, a adubação de restituição é uma forma de dimensionamento mais racional do fornecimento de nutrientes em condições de solos de fertilidade construída. Consiste na filosofia de conservação dos estoques de nutrientes do solo, restituindo na forma de aporte de nutrientes as quantidades exportadas nas colheitas (Silva et al., 2016; Resende et al. 2016; Resende et al., 2019). Desse modo, se as perdas não forem significativas, não há redução dos estoques de nutrientes do solo, além de possibilitar um maior retorno econômico.

A diferença entre a quantidade de nutrientes aportada na adubação e removida na colheita se constitui no balanço de nutrientes. Desta forma, saldos negativos, nos quais a remoção excede o aporte, ocorre diminuição da fertilidade, enquanto saldos positivos estão associados ao aumento da fertilidade, e podem estar relacionados ao risco de perda de nutrientes (Fixen, 2011). Assim sendo, a adubação de restituição visa manter o balanço de nutrientes próximo de zero.

Além disso, partindo do pressuposto de que a “produtividade esperada” para os cultivos é classicamente utilizada como critério fundamental no cálculo da quantidade de nutrientes a fornecer na adubação (Silva et al., 2016), a filosofia da adubação de restituição sugere que a “produtividade realizada” seja utilizada como tal critério. Dessa forma é possível contabilizar o efeito de anos de alta ou baixa produtividade. Assim sendo, por exemplo, após safras com menor produtividade, e por consequência, menor exportação de nutrientes, a quantidade necessária para reposição é menor. Além disso, a disponibilidade de ferramentas

de agricultura de precisão, como o monitoramento de colheita facilitam a operacionalização desta estratégia (Resende et al., 2019).

Assim, o objetivo deste trabalho foi validar o balanço de N, P e K associado à adubação restituição visando maior eficiência de uso de nutrientes no sistema safra/segunda safra em solo de Cerrado com fertilidade construída, bem como caracterizar os impactos dessa estratégia de manejo na produtividade e na fertilidade do solo.

### 3.2 Material e métodos

O trabalho foi conduzido *on-farm*, em talhão de produção comercial da Fazenda Decisão, em Unaí - MG (16,412 °S, 47,301 °O e altitude de 992 m). O solo local é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo argiloso, com alto nível de fertilidade, conforme expresso na análise inicial da área utilizada (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização química e textural do solo, antes da implantação dos experimentos. Unaí – MG, 2018.

Atributo	Profundidade	
	0-10 cm*	10-20 cm*
pH <sub>água</sub>	6,6	6,1
P <sub>Mehlich</sub> (mg dm <sup>-3</sup> )	38	23
K <sub>Mehlich</sub> (mg dm <sup>-3</sup> )	183	157
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	5,2	3,3
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,8	1,1
CTC (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	9,7	8,3
Saturação por bases (%)	77	57
B (mg dm <sup>-3</sup> )	0,5	0,4
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	0,9	0,9
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	25	31
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	35	26
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	9	9
Mat. Orgânica – MOS (g kg <sup>-1</sup> )	41	34
S (mg dm <sup>-3</sup> )**	5	22
Argila (g kg <sup>-1</sup> ***)	470, 650 e 690	

\* Média de 30 amostras compostas. \*\* Enxofre: teores nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm, respectivamente. \*\*\* Profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, respectivamente. Média de 5 amostras compostas.

O estudo foi constituído de experimentos em que se avaliaram opções de adubação NPK em dois sistemas de sucessão soja/milho (ou sorgo) segunda safra por três anos agrícolas. Um dos sistemas envolveu a introdução de braquiária ruziziensis (*Urochloa ruziziensis*) como planta de cobertura em consórcio na segunda safra (CB) e foi conduzido em área adjacente à do sistema tradicional com sucessão simples das culturas de grãos, sem a presença de braquiária (SB). Em função das demandas operacionais da fazenda, foi cultivado sorgo na segunda safra do primeiro ano agrícola e milho nos demais anos. As informações referentes a cultivares, data e densidade de semeadura dos cultivos estão sumarizadas na Tabela 2 e dados meteorológicos do período são apresentados na Figura 1.

Tabela 2. Informações sobre a sucessão de culturas utilizada no experimento. Unai – MG, 2022.

Detalhamento	Ano agrícola/cultura					
	2018/19		2019/20		2020/21	
	Soja	Sorgo	Soja	Milho	Soja	Milho
Cultivar	M6210 IPRO	Enforcer	M6210 IPRO	MG408 PowerCore	M6210 IPRO	AS1820 VT Pro3
Densidade de semeadura (sementes ha <sup>-1</sup> )	250.000	180.000	250.000	50.000	260.000	60.000
Data de semeadura	26/10/18	21/02/19	07/11/19	05/03/20	04/11/20	10/03/21

Em cada experimento/sistema, o delineamento foi de blocos casualizados com quatro repetições, espaçamento entre linhas de 0,5 m, com tamanho de parcela de 30 m de largura por 150 m de comprimento, ajustado às bitolas do maquinário disponível na fazenda. Os tratamentos avaliados representaram diferentes opções de adubação NPK: 1) controle sem adubação (CONT); 2) adubação de restituição repondo as quantidades de nutrientes exportadas nos grãos colhidos na cultura anterior (REST); 3) adubação de restituição mais 30%, para cobrir eventuais perdas do sistema (REST+30%); 4) adubação de restituição menos 30%, para aferir a possibilidade de redução da adubação (REST –30%); 5) adubação de restituição do sistema aplicada toda na safra de verão com soja (SIST), a partir do segundo ano, pois, no primeiro ano este tratamento foi análogo ao tratamento de restituição; 6) adubação padrão da fazenda (FAZ); e 7) adubação da fazenda mais 30%, para aferir a possibilidade de resposta adicional (FAZ+30%).

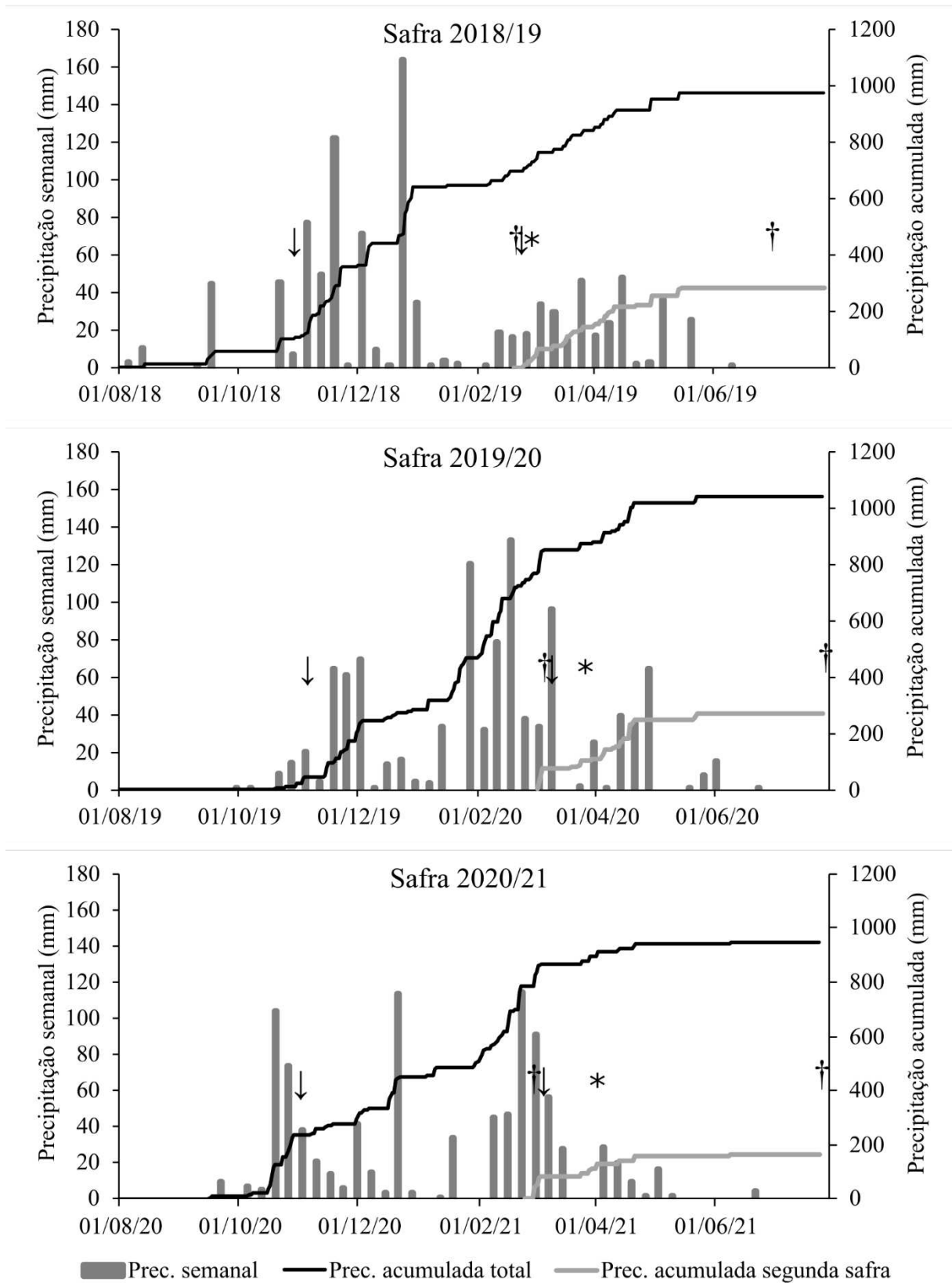


Figura 1. Distribuição da precipitação semanal e total acumulado em cada ano agrícola. Unai – MG, 2022. Legenda: ↓ plantio; † colheita; \* aplicação de nitrogênio.

Para o tratamento REST, as quantidades de P e K foram definidas conforme a exportação desses nutrientes pelos grãos da cultura anterior (Tabela 3). Já a quantidade de N para o milho ou sorgo segunda safra foi definida levando em conta a expectativa de produtividade/exportação de N dessas culturas (correspondendo a 6.000 e 7.500 kg ha<sup>-1</sup> para o sorgo e o milho, respectivamente). O primeiro cultivo de soja (2018/19) foi feito sobre palhada de milho consorciado com *Crotalaria ochroleuca*, sendo o dimensionamento do tratamento REST feito levando em conta a produtividade (4.920 kg ha<sup>-1</sup>) e a análise dos grãos do cultivo precedente, que também havia sido com soja na safra 2017/18 (anterior ao experimento). Do segundo cultivo em diante, os cálculos tiveram por base a exportação determinada pela cultura antecessora, na sequência soja/sorgo/soja/milho/soja/milho.

Tabela 3. Taxas de exportação de nutrientes consideradas para o cálculo da exportação nas colheitas. Unai – MG, 2022.

	N (kg Mg <sup>-1</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg Mg <sup>-1</sup> )	K <sub>2</sub> O (kg Mg <sup>-1</sup> )	Referência
Soja	47,3	9,7	21,4	Amostragem na fazenda
Sorgo	13,3	6,2	4,2	Amostragem na fazenda
Milho	13,1	4,8	3,7	Duarte et al. (2019)

No tratamento SIST, o total da adubação de restituição com P e K para o sistema safra/segunda safra foi aplicado na soja (safra verão), visando economia e rendimento operacional, enquanto o N em cobertura para a segunda safra foi distribuído durante o ciclo do sorgo ou do milho. Por fim, o tratamento FAZ representou o manejo realizado segundo critérios próprios da fazenda.

De acordo com os tratamentos, as adubações de base e em cobertura tiveram as dosagens automaticamente variadas nas parcelas, por meio de sistema de guia por satélite e dispositivos de aplicação de fertilizantes a taxa variável, em distribuidor centrífugo a lanço Hercules<sup>®</sup> e o sistema Rawson<sup>™</sup> acoplado a semeadora pneumática John Deere 2117<sup>®</sup>. Esses equipamentos permitiram trabalhar com parcelas de grandes dimensões.

As fontes de N, P e K utilizadas variaram com o ano agrícola, conforme os insumos adquiridos pela fazenda em diferentes momentos. O adubo fosfatado de base (fosfato monoamônico – MAP, NPK 14-25-00, ou NPK 08-40-00, conforme o cultivo) foi distribuído no sulco de semeadura, variando as doses nas parcelas por mecanismos de aplicação a taxa variável na semeadora. As adubações potássicas foram realizadas distribuindo-se o cloreto de potássio (KCl) a lanço em pré-semeadura da soja ou pós-semeadura inicial do sorgo e do

milho, utilizando equipamento com distribuidor centrífugo de aplicação a taxa variável. De forma análoga, foram realizadas as adubações nitrogenadas em cobertura para o sorgo (nitrato de amônio 27-00-00), aos sete dias após a semeadura (DAS), e para o milho (ureia com NBPT), aos 14 e 21 dias após a semeadura do milho nas safras 2019/20 e 2020/21, respectivamente. As quantidades de nutrientes referentes aos tratamentos em cada cultivo constam na Tabela 4 e os totais aplicados no período experimental estão indicados na Figura 2, assim como a quantidade de cada formulado utilizado foi apresentado no material suplementar.

Tabela 4. Quantidades equivalentes de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O (kg ha<sup>-1</sup>) fornecidas nas adubações de base ou de cobertura em cada cultivo, nos experimentos com e sem braquiária, de acordo com as opções de adubação. Unaí – MG, 2022.

	CONT		REST		REST +30%		REST -30%		SIST		FAZ		FAZ +30%	
	CB	SB	CB	SB	CB	SB	CB	SB	CB	SB	CB	SB	CB	SB
Soja 2018/19														
N	0	0	12	12	15	15	8	8	12	12	20	20	26	26
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0	56	56	72	72	39	39	56	56	94	94	122	122
K <sub>2</sub> O	0	0	107	107	139	139	75	75	107	107	54	54	70	70
Sorgo 2019														
N	0	0	83	83	108	108	58	58	83	83	49	49	64	64
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0	41	41	53	53	29	29	41	41	78	78	101	101
K <sub>2</sub> O	0	0	98	98	127	127	68	68	98	98	60	60	78	78
Soja 2019/20														
N	0	0	11	13	15	17	8	9	21	22	18	18	23	23
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0	54	63	70	81	38	44	98	106	83	83	108	108
K <sub>2</sub> O	0	0	31	37	40	48	22	26	127	133	90	90	117	117
Milho 2020														
N	0	0	102	102	132	132	71	71	77	77	118	118	153	153
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0	44	44	57	57	31	31	0	0	50	50	65	65
K <sub>2</sub> O	0	0	96	96	125	125	67	67	0	0	90	90	117	117
Soja 2020/21														
N	0	0	8	7	10	9	5	5	17	17	14	14	19	19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0	38	36	50	47	27	25	85	83	72	72	94	94
K <sub>2</sub> O	0	0	32	23	42	30	22	16	135	126	90	90	117	117
Milho 2021														
N	0	0	102	102	133	133	72	72	92	92	114	114	148	148
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0	47	47	61	61	25	25	0	0	114	114	149	149
K <sub>2</sub> O	0	0	103	103	134	134	72	72	0	0	90	90	117	117

CB: com braquiária; SB: sem braquiária.

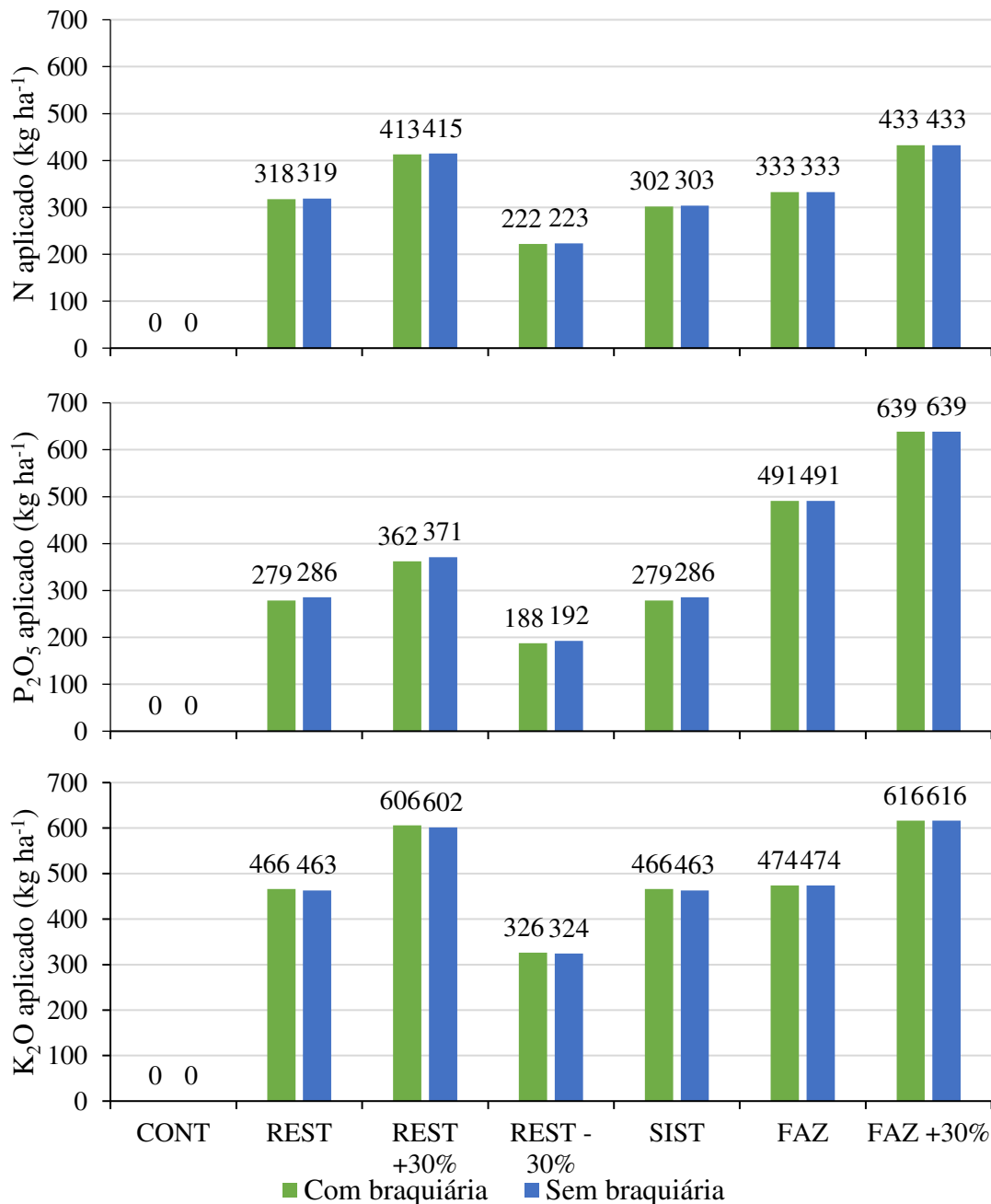


Figura 2. Quantidades totais equivalentes de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O (kg ha<sup>-1</sup>) fornecidas até o sexto cultivo, de acordo com os tratamentos de adubação, nos sistemas com e sem braquiária. Unaí – MG, 2022. Legenda: Cont.: Controle sem adubação; Rest.: Restituição dos nutrientes exportados pela cultura anterior; Sist.: Adubação de sistema, com todo P e K aplicado na safra e N em cobertura na segunda safra; Faz.: Manejo padrão da fazenda.

A semeadura da braquiária no respectivo experimento foi feita à lanço, imediatamente antes da semeadura da cultura de sorgo ou milho segunda safra, com distribuidor elétrico Ikeda<sup>®</sup> acoplado à barra do pulverizador Uniport<sup>®</sup>. Foi utilizada uma densidade média de distribuição de 8 kg ha<sup>-1</sup> de semente com 80% de valor cultural. Após as colheitas de segunda safra, a braquiária foi deixada como planta de cobertura até o início da safra seguinte.

As operações de controle de plantas daninhas, tratos fitossanitários e de manejo geral foram realizadas utilizando maquinário, insumos e procedimentos da fazenda, observando as orientações técnicas relacionadas às culturas.

As avaliações foram realizadas sempre na porção mais central das parcelas, evitando-se assim as zonas de transição associadas à mudança automática de aplicação dos tratamentos pelo maquinário utilizado. Amostragens de solo e planta/palhada, assim como avaliações de produtividade foram efetuadas em pontos georreferenciados, previamente definidos em cada parcela e localizados com utilização de GPS portátil de alta sensibilidade.

Amostragens manuais para determinação da produtividade de grãos foram realizadas após a maturação fisiológica das culturas, com base na colheita de uma área útil de 4,5 m<sup>2</sup> para a soja e o sorgo (3 linhas de 3 metros de comprimento) e 6 m<sup>2</sup> para o milho (4 linhas de 3 metros de comprimento), corrigindo para 13% de umidade.

No momento da colheita das culturas de sorgo e de milho, também foi quantificada a biomassa de braquiária a partir da amostragem em quadro de 1 m<sup>2</sup> por parcela. A cada cultivo, concluída a colheita mecanizada, os restos culturais foram mantidos na superfície do solo, compondo a palhada. Após a dessecação das áreas, antecedendo a semeadura da soja em cada safra, foi quantificada biomassa de palhada remanescente, além da porcentagem de cobertura do solo pelo método descrito em Bataglia et al. (2009). Após o cultivo de sorgo na safra 2019, foi necessário um manejo diferencial no sistema consorciado, onde foi utilizado picador para fragmentar a palhada e evitar o embuchamento da semeadora.

Para a análise econômica, foi estimada a receita bruta em cada tratamento, obtida conforme os preços de venda dos grãos pela fazenda ao longo do período de estudo. Os custos contabilizados foram referentes apenas aos fertilizantes das adubações de semeadura e de cobertura e à semente de braquiária, quando pertinente, com base nas cotações de compra pela fazenda. Pela diferença entre a receita bruta e esses custos foi calculada a receita líquida derivada dos tratamentos. Os outros gastos não foram levados em conta, tendo em vista que as quantidades dos demais insumos, operações mecanizadas e manejo cultural foram homogêneos entre os tratamentos.

A eficiência da adubação foi estimada pela relação entre a produtividade de grãos e as quantidades de nutrientes aplicadas (kg kg<sup>-1</sup>), conforme proposição de Moll et al. (1982). A taxa de desfrute da adubação foi expressa pela proporção (%) das quantidades de nutrientes

exportadas na colheita dos grãos em relação aos respectivos aportes via fertilizantes, de acordo com Cunha et al. (2018).

Em novembro de 2021, após a finalização dos experimentos, foram amostradas as parcelas de todos os tratamentos, nas profundidades 0-10 e 10-20 cm. Neste caso, foram compostas amostras a partir da coleta em nove pontos ao redor da área central das parcelas, sendo seis nas entrelinhas e três nas linhas de semeadura. Análises de rotina para caracterização da fertilidade do solo foram realizadas conforme metodologias descritas em Teixeira et al. (2017).

A partir dos dados de produtividade e análise dos grãos, foi estimada a exportação de nutrientes pelos cultivos, estimando-se o balanço parcial de nutrientes pela diferença em relação às quantidades aplicadas nas adubações. No cálculo do balanço de N, considerou-se que a quantidade exportada pela soja seria coberta pela entrada via fixação biológica de nitrogênio (FBN), em concordância com a contabilização indicada por Alves et al. (2006) e um dos possíveis cenários reportados por Ciampitti & Salvagiotti (2018).

Para P e K, também foi estabelecida a relação do balanço cumulativo entre adubação e exportação com a disponibilidade desses nutrientes no solo após os três ciclos safra/segunda safra. No caso do P, foram considerados os resultados de análise de 0-10 cm de profundidade, camada que concentra a maior parte do estoque disponível às plantas, devido à baixa mobilidade desse nutriente nos solos argilosos. Já para o K, que apresenta maior mobilidade, foram considerados os resultados da camada de 0-20 cm.

Os dados foram submetidos a análise de variância. No caso das variáveis produtividade de grãos, biomassa de palhada e porcentagem de cobertura do solo, procedeu-se à análise de variância conjunta, de modo a verificar a existência de interação entre tratamentos de adubação e sistemas de produção com e sem braquiária. Foi utilizado o programa Sisvar (Ferreira, 2019) e, quando significativo o teste F ( $p < 0,05$ ), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey. Para os resultados de análise de solo, foi realizada análise estatística descritiva, sendo apresentados média e desvio padrão para cada tratamento.

### 3.3 Resultados e discussão

#### 3.3.1 Produtividade de grãos e palhada residual

A cultura da soja mostrou-se indiferente às diversas opções de adubação (Tabela 5). Nem mesmo no tratamento CONT, no quinto cultivo sem adubação NPK, houve redução de produtividade da oleaginosa (Figura 3), confirmando que as reservas de P e K presentes no solo do talhão podem suprir a demanda por alguns cultivos. Os produtores na região do Cerrado normalmente são avessos a riscos e, diante de alguma incerteza sobre a real capacidade de o solo atender a demanda de nutrientes pelos cultivos, muitos têm receio de diminuir a adubação para buscar um melhor ajuste. No presente estudo, os critérios técnicos estabelecidos para o manejo da fertilidade dos solos de cerrado mostram-se válidos e efetivos para nortear o dimensionamento das adubações de manutenção. Tratando-se de um solo argiloso e com alto teor de matéria orgânica, os teores iniciais disponíveis de P e K (Tabela 1), bem acima dos respectivos níveis críticos, de 10 e 80 mg dm<sup>-3</sup> (Sousa e Lobato, 2004), já eram um indicativo do baixo potencial de resposta à adubação.

O sistema com braquiária em consórcio na segunda safra, permanecendo como planta de cobertura, promoveu maiores produtividades de soja na sequência, com acréscimos médios de 335 e 214 kg ha<sup>-1</sup> nas safras 2019/20 e 2020/21, respectivamente (Figura 3c, 3e). Correa et al (2013) também encontraram incremento na produtividade de soja após o milho consorciado com braquiária ruziziensis em relação ao milho solteiro, variando de 258 a 818 kg ha<sup>-1</sup> de incremento. Assim, também houve incremento da produtividade da soja após milho consorciado com braquiária brizantha em relação ao milho solteiro, na ordem de 286 kg ha<sup>-1</sup> (Fortes et al., 2016). Segundo Balbinot Junior et al. (2017), a maior produtividade de cultivos de soja após cultivos com braquiária se dá majoritariamente pelos efeitos das raízes de braquiária nas condições físicas e químicas do solo.

As culturas do sorgo e do milho responderam à adubação, sendo que para o primeiro houve interação com o sistema consorciado ou não com braquiária (Tabela 5). No sorgo solteiro, o tratamento CONT perdeu produtividade em relação FAZ, produzindo 14% menos (Figura 3b). O desempenho do sorgo foi limitado pelo consórcio com braquiária, que, em média, resultou em perda de 1.815 kg ha<sup>-1</sup> (-20%) de rendimento de grãos em comparação ao cultivo solteiro. Ainda assim, a produtividade média no consórcio alcançou 7.131 kg ha<sup>-1</sup>, bem superior à média estadual de 3.492 kg ha<sup>-1</sup> em 2019 (Conab, 2022).

O impacto negativo do sistema consorciado para o sorgo provavelmente resultou da competição interespecífica, em que a braquiária apresentou crescimento muito agressivo devido à condição de alta fertilidade do solo e, principalmente, à baixa capacidade de sombreamento do sorgo granífero. Ao receber mais luz, a braquiária tem seu crescimento estimulado, tornando-se forte competidora (Borghetti et al., 2013). Em estudo com braquiária brizantha, Mateus et al. (2016) não constataram competição prejudicial ao sorgo, porém, as sementes do capim haviam sido incorporadas a seis centímetros de profundidade, o que possivelmente retardou a emergência e reduziu o potencial de competição. Ainda naquele trabalho, houve incremento da produtividade de grãos com o aumento da dose de nitrogênio.

As diferenças devido aos tratamentos de adubação NPK foram mais nítidas no milho, independentemente do sistema de cultivo solteiro ou consorciado com braquiária. Os cultivos de milho apresentaram perdas crescentes de rendimento sob os tratamentos REST -30% e CONT (Figura 3d, 3f), as quais se refletiram na produção acumulada dos três ciclos de safra/segunda safra (Figura 3g). É de se esperar que a insuficiência de N tenha sido o principal fator restritivo nesses dois tratamentos, considerando o grande requerimento pela cultura e a limitada capacidade de suprimento deste nutriente nos solos tropicais.

A extração de N por cultivares modernas de milho em cultivo tecnificado é da ordem de 26,5 kg para cada tonelada de grãos produzida (Silva et al., 2018), o que corresponderia a uma demanda de 180 kg ha<sup>-1</sup> para produtividade ao redor de 6,8 t ha<sup>-1</sup>, média da segunda safra 2021 no presente estudo. Assim, mesmo considerando a contribuição de créditos do cultivo antecessor de soja e da mineralização da matéria orgânica (Simão et al., 2020), numa estimativa da ordem de 128 kg ha<sup>-1</sup> de N para o milho segunda safra 2021, restaria um déficit do nutriente a ser coberto via adubação. No tratamento CONT, a segunda safra 2021 foi o sexto cultivo sucessivo sem aportes de N, P e K em adubações de base ou cobertura.

Não houve diferença significativa na produtividade de grãos entre as adubações REST e FAZ em qualquer dos seis cultivos. Considerando a produção acumulada dos três ciclos safra/segunda safra, os tratamentos REST, FAZ, REST+30% e FAZ+30% se equipararam, constituindo o agrupamento de melhor desempenho (Figura 3g). Esse nivelamento permitiu confirmar, para a realidade de lavoura no Cerrado, que a estratégia de restituição dos nutrientes exportados nas colheitas pode ser tomada como base para o dimensionamento racional das adubações de manutenção em solos argilosos de fertilidade construída.

Diferentemente do sorgo, o milho não foi afetado no sistema de consórcio com braquiária (Tabela 5; Figura 3), o que pode ser atribuído à sua maior capacidade de sombreamento, com fechamento mais rápido do dossel e porte mais elevado das plantas. Como o topo do dossel de sorgo fica mais próximo ao solo, a braquiária pode crescer mais, competindo por luz até na fase de enchimento de grãos. Assim, na avaliação do consórcio na colheita do sorgo, no dia 04/07/2019, a braquiária produziu média de 2.515 kg ha<sup>-1</sup> de biomassa seca, contra 617 e 873 kg ha<sup>-1</sup> quando consorciada com o milho, colhido em 11/08/2020 e 29/07/2021, respectivamente.

No trabalho de Mateus et al. (2016), no qual o consórcio com braquiária não limitou a produtividade do sorgo, a braquiária produziu menos biomassa seca, entre 620 e 1.180 kg ha<sup>-1</sup> até a colheita do sorgo, o que demonstra a necessidade de limitar o crescimento da braquiária para melhor controle da competição. No trabalho de Mateus et al. (2020), estudando o consórcio de braquiária brizantha com milho, também não verificaram perda de produtividade deste sistema em relação ao milho solteiro. No referido estudo, a braquiária produziu entre 550 e 990 kg ha<sup>-1</sup> de biomassa seca até o momento da colheita do milho, valores próximos ao observado no presente trabalho.

Tabela 5. Resumo da análise de variância para produtividade de grãos (kg ha<sup>-1</sup>) de cultivos da sucessão safra/segunda safra, em sistemas com ou sem introdução de braquiária e diferentes opções de adubação NPK. Unai - MG, 2022.

		Soja 2018/19	Sorgo 2019	Soja 2019/20	Milho 2020
F. V.	G. L.	Quadrado médio			
Sistema - S	1	26.448 <sup>ns</sup>	46.133.671**	1.566.798**	562.403 <sup>ns</sup>
Bloco (S)	6	28.429	152.922	267.439	894.961
Adubação - A	6	177.090 <sup>ns</sup>	227.202 <sup>ns</sup>	29.106 <sup>ns</sup>	12.004.703**
S x A	6	34.958 <sup>ns</sup>	1.136.568**	49.768 <sup>ns</sup>	153.959 <sup>ns</sup>
Erro	36	13.737	327.144	39.016	202.203
C. V. (%)		8,03	7,12	4,39	5,95
		Soja 2020/21	Milho 2021	Acumulado	
F. V.	G. L.	Quadrado médio			
Sistema - S	1	641.572**	218.625 <sup>ns</sup>	33.586.967**	
Bloco (S)	6	85.294	971.015	3.888.829	
Adubação - A	6	61.268 <sup>ns</sup>	12.603.511**	56.603.337**	
S x A	6	105.554 <sup>ns</sup>	406.974 <sup>ns</sup>	1.726.990 <sup>ns</sup>	
Erro	36	49.718	339.734	1.387.674	
C. V. (%)		4,67	8,60	3,25	

\*\* significativo a 1% de probabilidade de erro; \* significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> não significativo.

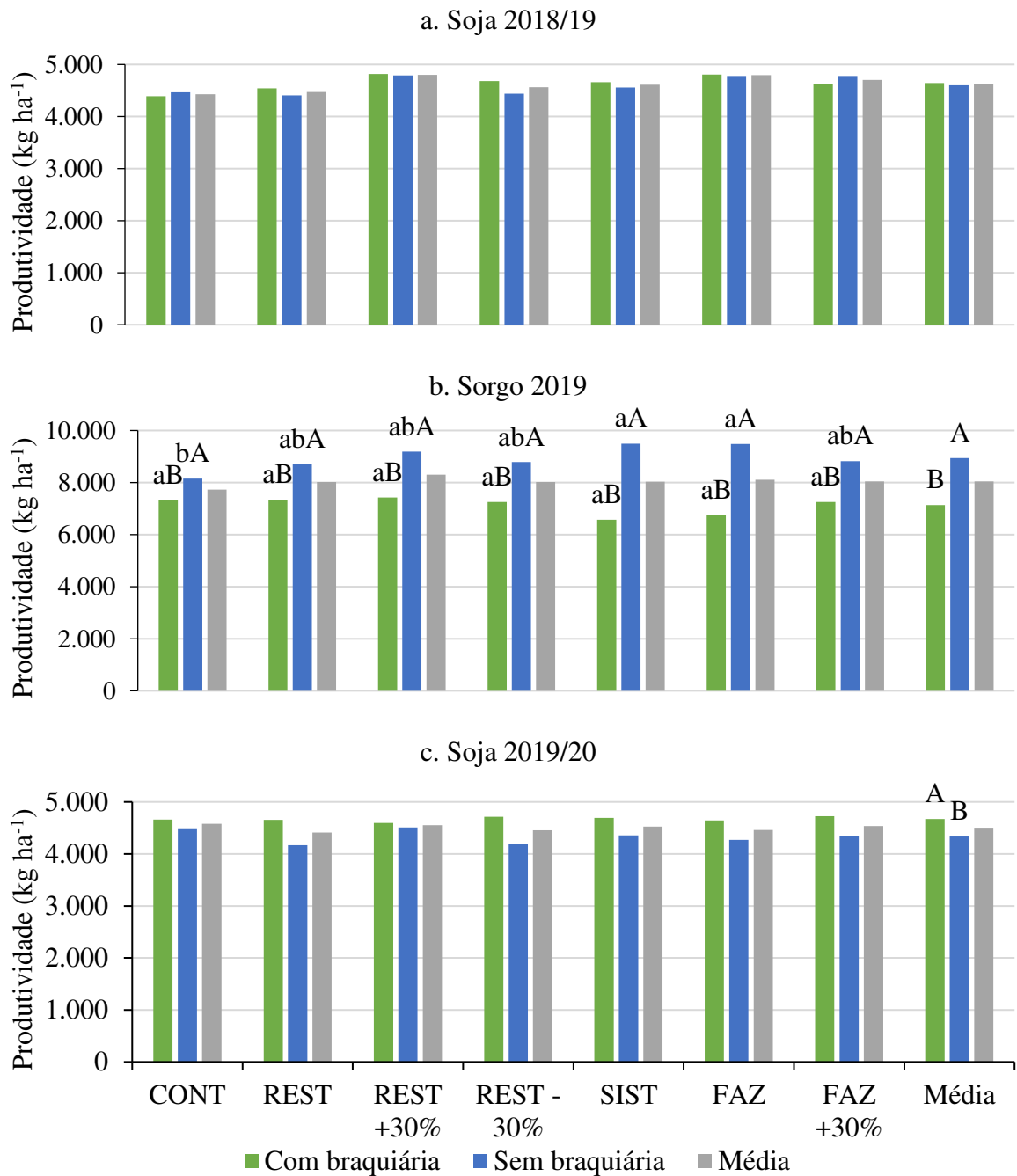


Figura 3. Produtividade de grãos em sistemas de sucessão safra/segunda safra com ou sem introdução de braquiária como planta de cobertura, sob diferentes opções de adubação NPK. Unai – MG, 2022. Letras minúsculas distintas indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre as opções de adubação nos sistemas com ou sem braquiária e letras maiúsculas entre os sistemas dentro de cada opção de adubação. CONT: Controle sem adubação; REST: Restituição dos nutrientes exportados pela cultura anterior; SIST: Adubação de sistema, com todo P e K aplicado na safra e N em cobertura na segunda safra; FAZ: Manejo padrão da fazenda.

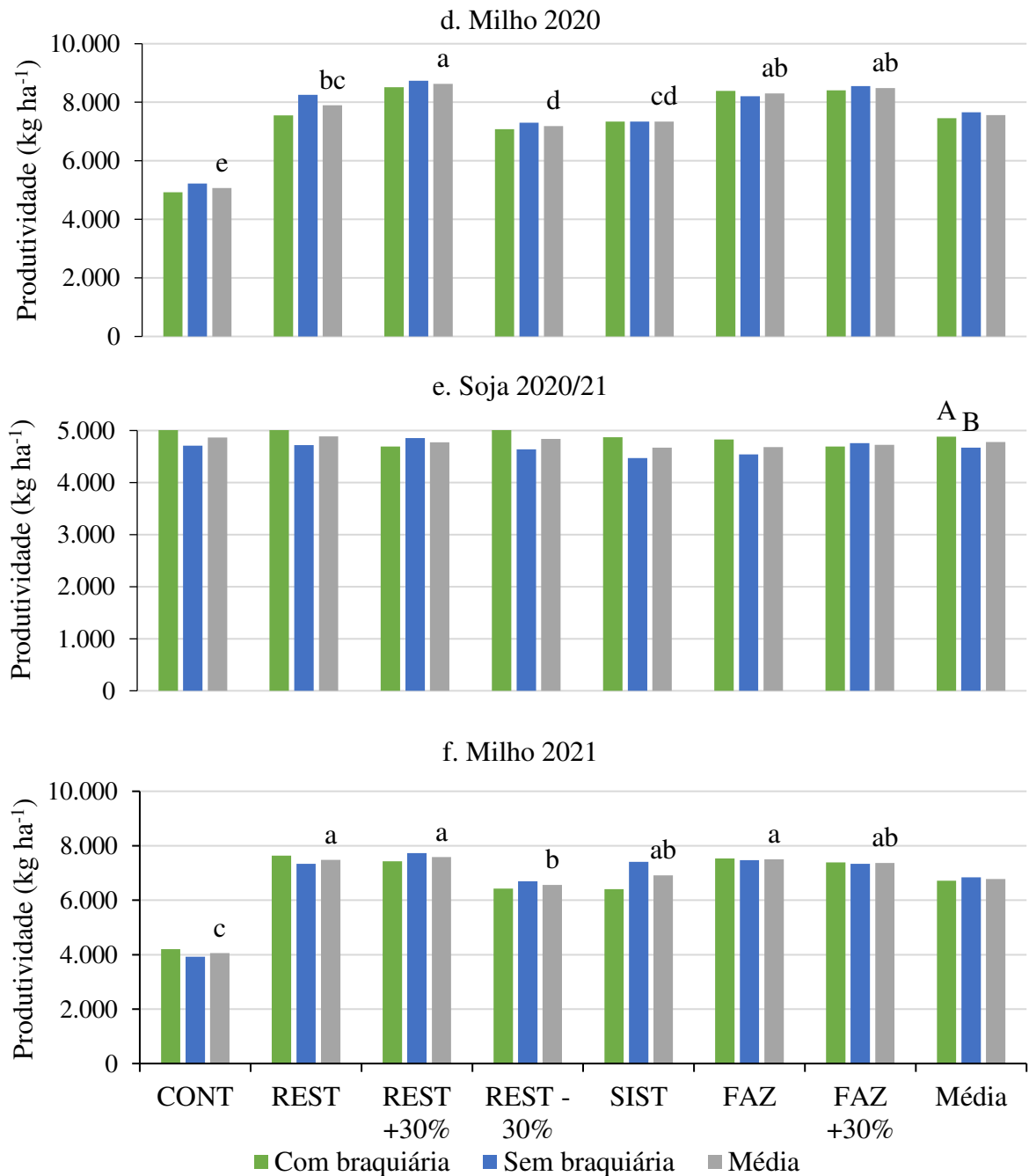


Figura 3. Continuação... Produtividade de grãos em sistemas de sucessão safra/segunda safra com ou sem introdução de braquiária como planta de cobertura, sob diferentes opções de adubação NPK. Unaí – MG, 2022. Letras minúsculas distintas indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre as opções de adubação nos sistemas com ou sem braquiária e letras maiúsculas entre os sistemas dentro de cada opção de adubação. CONT: Controle sem adubação; REST: Restituição dos nutrientes exportados pela cultura anterior; SIST: Adubação de sistema, com todo P e K aplicado na safra e N em cobertura na segunda safra; FAZ: Manejo padrão da fazenda.

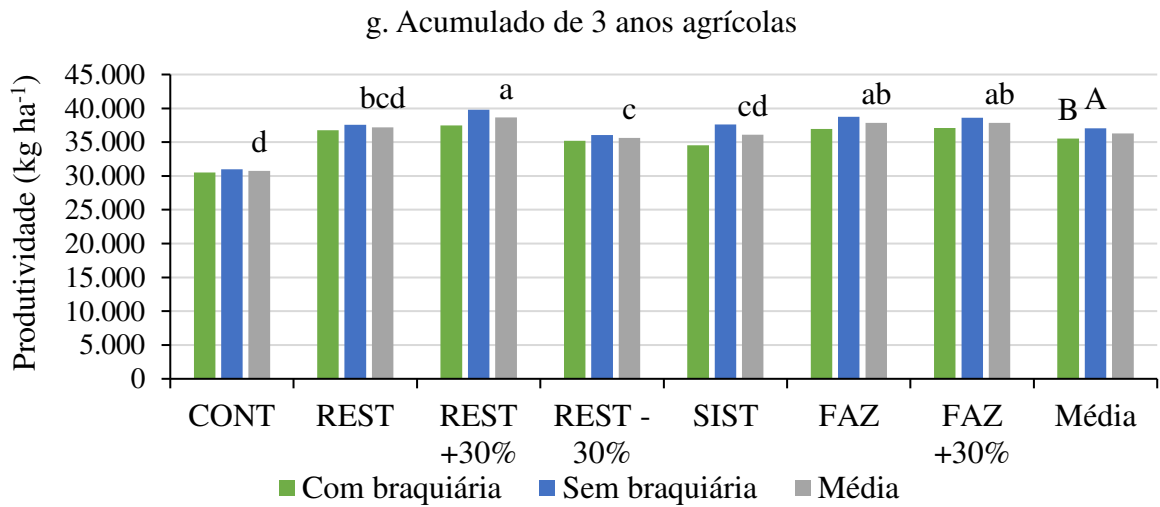


Figura 3. Continuação... Produtividade de grãos em sistemas de sucessão safra/segunda safra com ou sem introdução de braquiária como planta de cobertura, sob diferentes opções de adubação NPK. Unaí – MG, 2022. Letras minúsculas distintas indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre as opções de adubação nos sistemas com ou sem braquiária e letras maiúsculas entre os sistemas dentro de cada opção de adubação. CONT: Controle sem adubação; REST: Restituição dos nutrientes exportados pela cultura anterior; SIST: Adubação de sistema, com todo P e K aplicado na safra e N em cobertura na segunda safra; FAZ: Manejo padrão da fazenda.

Devido à passagem de picador para fragmentação dos restos culturais algum tempo após a colheita do sorgo, o sistema com braquiária não apresentou maior biomassa de palhada cobrindo o solo em novembro de 2019, por ocasião da semeadura da soja da safra 2019/20 (Tabela 6, Figura 5), levando à hipótese de que tenha havido decomposição e redução de massa do material picado, nivelando a quantidade remanescente de restos culturais nos sistemas consorciado e solteiro. Porém, essa palhada residual no sistema consorciado apresentou uma melhor distribuição sobre o solo e por consequência uma maior cobertura da superfície (Tabela 7, Figura 6). Já no milho 2020, o consórcio possibilitou maior biomassa de palhada, além da maior cobertura do solo, corroborando o trabalho de Fortes et al. (2016), que observaram maior cobertura do solo no sistema de milho consorciado em relação ao milho solteiro.

Tabela 6. Resumo da análise de variância para biomassa de palhada ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) remanescente após a segunda safra, antecedendo a semeadura da soja na safra seguinte, em sistemas com ou sem introdução de braquiária e diferentes opções de adubação NPK. Unai - MG, 2022.

F. V.	Sorgo 15/10/2019		Milho 02/11/2020		Milho 26/10/2021	
	G. L.	Q. M.	G. L.	Q. M.	G. L.	Q. M.
Sistema - S	1	1.738.883 <sup>ns</sup>	1	13.219.201**	1	547.201 <sup>ns</sup>
Bloco (S)	6	2.578.185	6	654.098	4	2.643.226
Adubação - A	6	1.906.751 <sup>ns</sup>	6	1.001.293 <sup>ns</sup>	6	3.561.471 <sup>ns</sup>
S x A	6	1.155.952 <sup>ns</sup>	6	1.487.229 <sup>ns</sup>	6	3.969.194 <sup>ns</sup>
Erro	36	1.033.993	36	1.676.175	24	3.491.833
Média		5.462		5.418		8.137
C. V. (%)		18,6		23,9		22,9

\*\* significativo a 1% de probabilidade de erro; \* significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> não significativo.

Tabela 7. Resumo da análise de variância para porcentagem de cobertura do solo (%) após a segunda safra, antecedendo a semeadura da soja na safra seguinte, em sistemas com ou sem introdução de braquiária e diferentes opções de adubação NPK. Unai - MG, 2022.

F. V.	Sorgo 15/10/2019		Milho 02/11/2020	
	G. L.	Q. M.	G. L.	Q. M.
Sistema - S	1	3.536,2**	1	8.257,1**
Bloco (S)	6	79,0	6	64,0
Adubação - A	6	153,9 <sup>ns</sup>	6	80,7 <sup>ns</sup>
S x A	6	473,2 <sup>ns</sup>	6	96,7 <sup>ns</sup>
Erro	36	168,9	36	150,8
Média		82,9		84,5
C. V. (%)		15,7		14,5

\*\* significativo a 1% de probabilidade de erro; \* significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> não significativo.

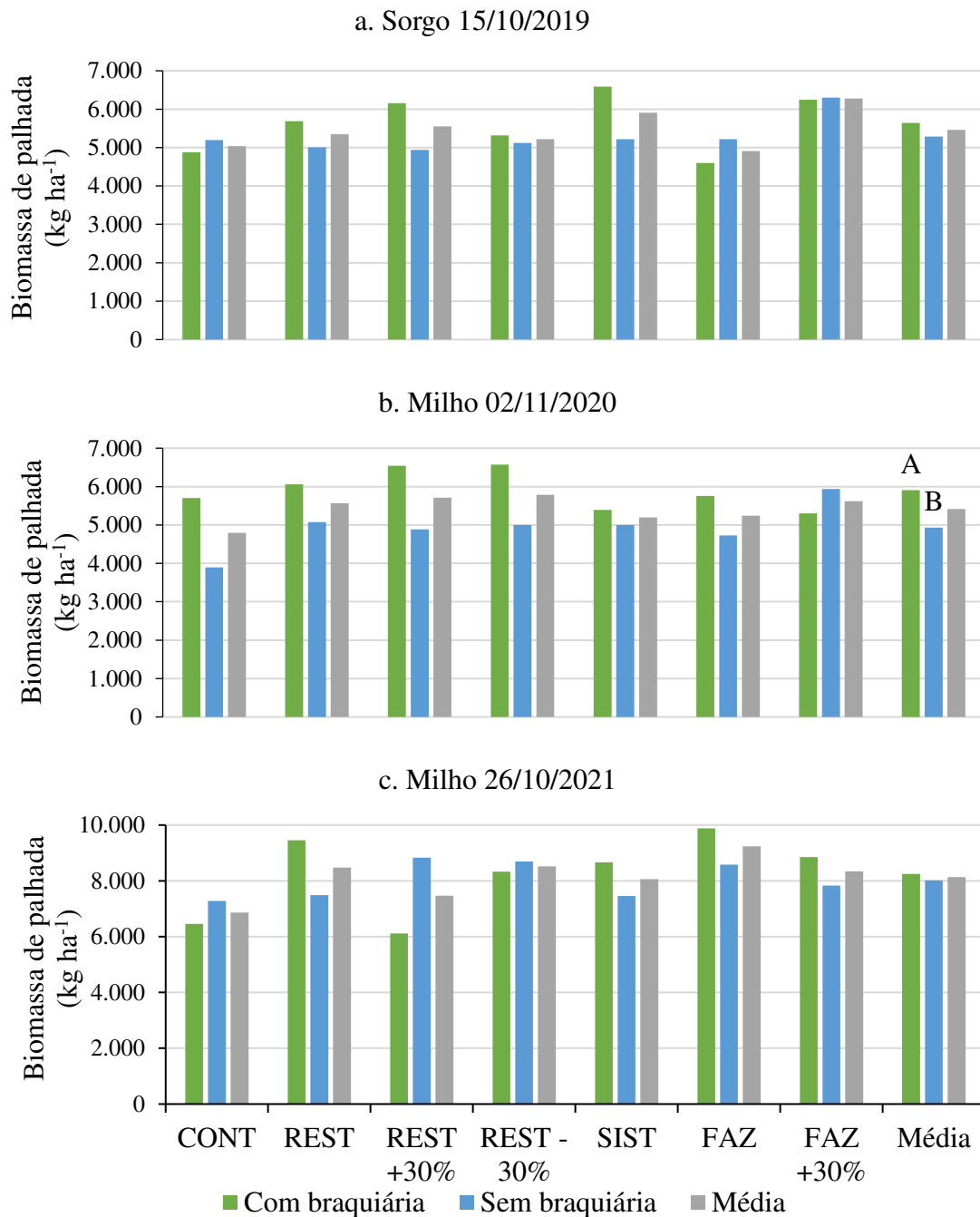


Figura 5. Biomassa de palhada remanescente após o sorgo ou o milho segunda safra, antecedendo a semeadura da soja na safra seguinte, em sistemas com ou sem introdução de braquiária e diferentes opções de adubação NPK. Unaí - MG, 2022. CONT: Controle sem adubação; REST: Restituição dos nutrientes exportados pela cultura anterior; SIST: Adubação de sistema, com todo P e K aplicado na safra e N em cobertura na segunda safra; FAZ: Manejo padrão da fazenda.

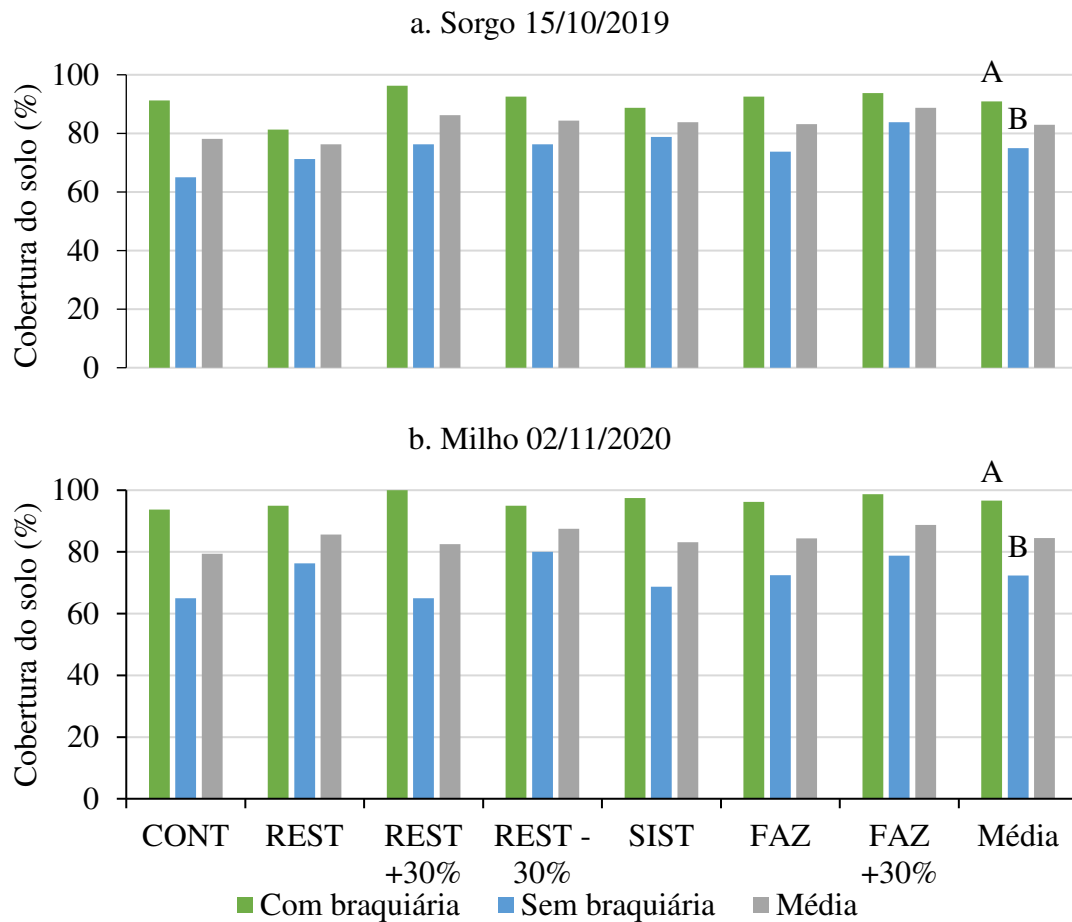


Figura 6. Porcentagem de cobertura do solo após o sorgo ou o milho segunda safra, antecedendo a semeadura da soja na safra seguinte, em sistemas com ou sem introdução de braquiária e diferentes opções de adubação NPK. Unaí - MG, 2022. CONT: Controle sem adubação; REST: Restituição dos nutrientes exportados pela cultura anterior; SIST: Adubação de sistema, com todo P e K aplicado na safra e N em cobertura na segunda safra; FAZ: Manejo padrão da fazenda.

### 3.3.2 Retorno econômico

Ao longo das safras houve um incremento de 62% no preço de venda dos grãos da soja, 35% no preço do MAP e 7% no preço do KCl (Apêndice), o que proporcionou fortes variações nos custos e receitas (Figura 7, Tabela 8). Comparando os tratamentos, de modo geral, a opção FAZ envolveu um investimento maior em adubação de base (51% na adubação de base P + N; 29% KCl e 21% N em cobertura), enquanto na opção REST o investimento e distribuição de custos foram mais equilibrados entre os adubos (36% na adubação de base P + N; 34% KCl e 30% N em cobertura). Outra diferença foi o fato de que para REST houve maior investimento do que para FAZ no primeiro ano, em função dos baixos aportes de nutrientes para a cultura do sorgo pela fazenda.

No aspecto de retorno financeiro, pode-se empiricamente separar em três grupos as opções de adubação, no primeiro grupo ficam os tratamentos REST, REST+30% e FAZ com receita acumulada superior a R\$ 39.055; no segundo grupo ficam os tratamentos REST-30%, SIST e FAZ+30% com receita entre R\$ 37.758 e 38.438, e no último grupo fica o tratamento CONT com receita de R\$ 35.154 (Tabela 8). Entre os tratamentos com melhor desempenho, estão REST e REST+30% que apresentam incremento em receita em relação a FAZ, pelo maior equilíbrio entre adubação e exportação de nutrientes, sem comprometer produtividade, economizando principalmente na adubação de base com P. Já o tratamento FAZ+30% apresentou incremento de custo sem correspondente ganho de produtividade, enquanto REST-30% e SIST apresentaram redução da produtividade.

A adição de braquiária no consórcio prejudicou a receita no cultivo de sorgo, porém o incremento de receita da soja em sequência minimizou a diferença. Assim, no acumulado dos três ciclos safra/segunda safra, o sistema com braquiária perdeu em receita (R\$ -383), porém ao se considerar apenas as safras 2019/20 e 2020/21, o sistema com braquiária traz um saldo positivo de receita (R\$ 388). Garbelini et al. (2020) analisaram o lucro bruto de alternativas à sucessão soja/milho e chegaram à conclusão de que o consórcio de braquiária com milho na segunda safra ou a braquiária solteira a cada três anos na segunda safra foram mais rentáveis do que a sucessão tradicional soja/milho, avaliados no período de 2012 a 2018. Estes autores chegaram à conclusão de que o consórcio de milho com braquiária aumenta a rentabilidade da fazenda pelo aumento do retorno na cultura da soja.

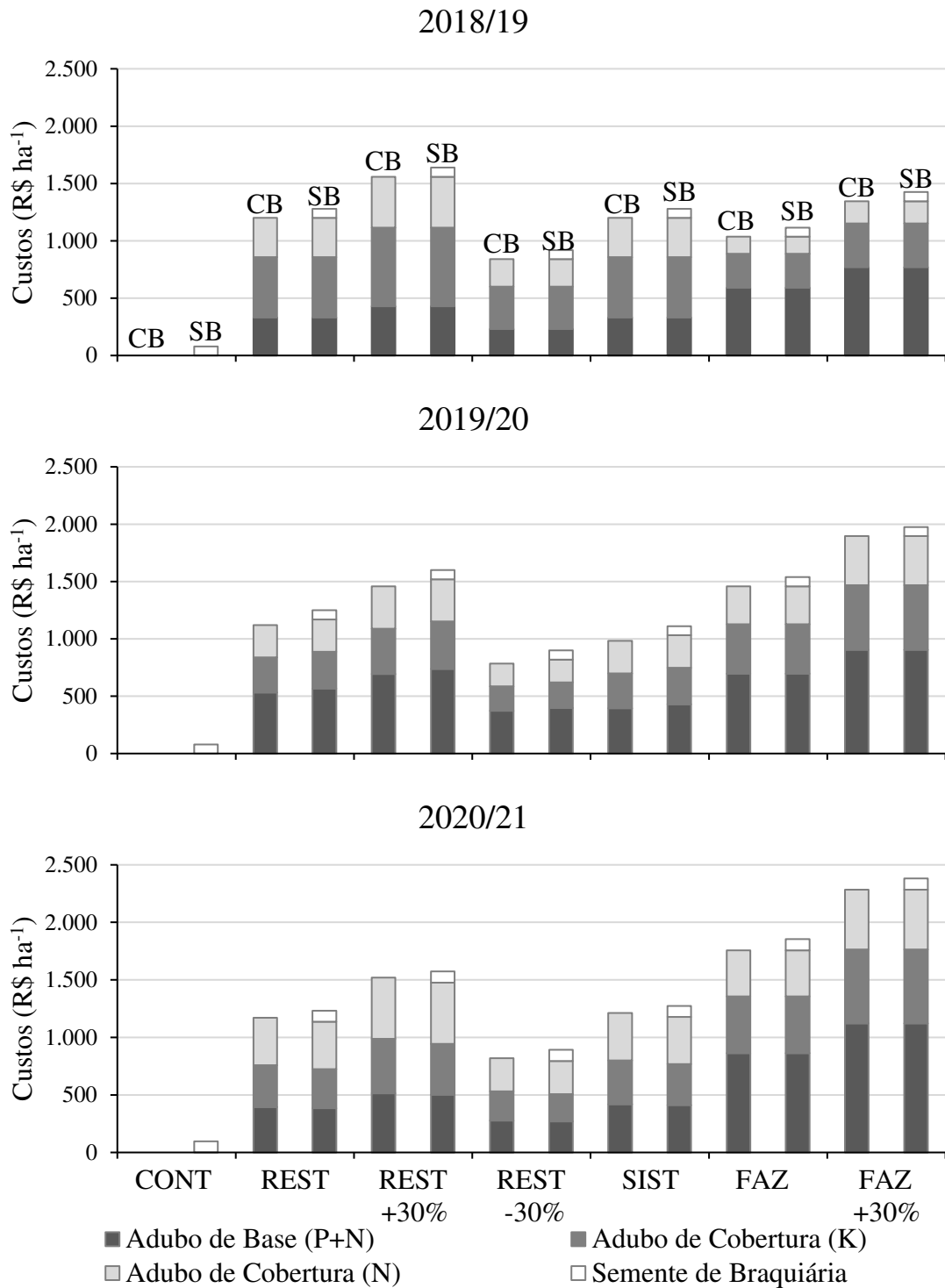


Figura 7. Composição dos custos considerados nos sistemas de sucessão safra/segunda safra com (CB) ou sem (SB) introdução de braquiária como planta de cobertura, sob diferentes opções de adubação NPK. Unaí – MG, 2022. CONT: Controle sem adubação; REST: Restituição dos nutrientes exportados pela cultura anterior; SIST: Adubação de sistema, com todo P e K aplicado na safra e N em cobertura na segunda safra; FAZ: Manejo padrão da fazenda.

Tabela 8. Receita líquida (R\$ ha<sup>-1</sup>) derivada dos tratamentos com diferentes opções de adubação NPK em sistemas de sucessão safra/segunda safra, com (CB) ou sem (SB) introdução de braquiária como planta de cobertura. Unai – MG, 2022.

		Soja (2018/19)	Sorgo (2019)	Soja (2019/20)	Milho (2020)	Soja (2020/21)	Milho (2021)	Acumulado
CONT	CB	5.412	2.828	6.522	4.027	10.033	6.498	35.154
	SB	5.508	3.259	6.292	4.356	9.423	6.149	
REST	CB	5.151	2.086	6.222	5.387	9.824	10.986	39.355
	SB	4.984	2.730	5.496	6.049	9.191	10.603	
REST +30%	CB	5.357	1.894	6.052	5.942	9.026	10.404	39.557
	SB	5.323	2.698	5.870	6.203	9.394	10.951	
REST -30%	CB	5.458	2.277	6.392	5.246	9.881	9.359	38.438
	SB	5.163	2.988	5.641	5.501	9.104	9.866	
SIST	CB	5.301	1.778	5.871	5.761	8.943	9.551	37.989
	SB	5.171	3.047	5.350	5.834	8.177	11.193	
FAZ	CB	5.489	2.003	5.951	6.013	9.040	10.583	39.055
	SB	5.454	3.198	5.429	5.929	8.466	10.555	
FAZ +30%	CB	5.131	2.030	5.900	5.754	8.586	10.013	37.758
	SB	5.321	2.757	5.358	5.952	8.717	9.997	
Média	CB	5.329	2.128	6.130	5.447	9.333	9.628	37.995
	SB	5.275	2.954	5.634	5.689	8.925	9.902	

CONT: Controle sem adubação; REST: Restituição dos nutrientes exportados pela cultura anterior; SIST: Adubação de sistema, com todo P e K aplicado na safra e N em cobertura na segunda safra; FAZ: Manejo padrão da fazenda.

### 3.3.3 Eficiência e taxa de desfrute da adubação

Além de ter reduzido o custo de produção, a opção REST também aumentou a eficiência de utilização de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em relação a FAZ, sendo esta na ordem de 132 kg de grãos (13% de umidade) por kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicado em REST e 77 kg kg<sup>-1</sup> para FAZ na média de três anos (Tabela 9). Além disso, a taxa de desfrute foi de 91% no caso de REST contra 53% para FAZ (Tabela 10). Assim sendo, a taxa de desfrute da FAZ está muito próximo do valor médio de 50%, observado por Roy et al. (2016) em fazendas do estado do Mato Grosso. Já no caso do K<sub>2</sub>O não houve diferença entre as opções REST e FAZ, devido ao fato das quantidades aplicadas na adubação serem similares, resultando em valores de 80 kg kg<sup>-1</sup> a eficiência agrônômica e 82-83% a taxa de desfrute.

Tabela 9. Eficiência da adubação P e K ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) sob diferentes opções de dimensionamento, em sistemas de sucessão safra/segunda safra, com (CB) ou sem (SB) introdução de braquiária como planta de cobertura. Unai – MG, 2022.

		2018/19	2019/20	2020/21	Média
$\text{P}_2\text{O}_5$					
REST	CB	123	125	150	132
	SB	136	117	145	
REST+30%	CB	98	103	110	105
	SB	112	96	117	
REST-30%	CB	177	172	221	187
	SB	196	154	224	
FAZ	CB	67	98	66	77
	SB	83	94	64	
FAZ+30%	CB	53	76	50	59
	SB	61	74	50	
$\text{K}_2\text{O}$					
REST	CB	58	96	94	80
	SB	64	94	96	
REST+30%	CB	46	79	69	64
	SB	53	77	77	
REST-30%	CB	84	133	122	110
	SB	93	124	129	
FAZ	CB	101	72	69	80
	SB	125	69	67	
FAZ+30%	CB	80	56	52	61
	SB	92	55	52	

Eficiência de adubação é a massa de grãos produzida por kg de nutriente aplicado. REST: Restituição dos nutrientes exportados pela cultura anterior; FAZ: Manejo padrão da fazenda.

Tabela 10. Taxa de desfrute (%) da adubação com fósforo e potássio em três ciclos safra/segunda safra, sob diferentes opções de dimensionamento, com (CB) ou sem (SB) introdução de braquiária como planta de cobertura. Unai – MG, 2022.

		2018/19	2019/20	2020/21	Média
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>					
REST	CB	93	83	101	91
	SB	100	75	98	
REST+30%	CB	74	67	74	73
	SB	83	62	78	
REST-30%	CB	134	117	154	132
	SB	145	102	153	
FAZ	CB	52	64	45	53
	SB	61	61	43	
FAZ+30%	CB	40	50	33	41
	SB	45	48	34	
<b>K<sub>2</sub>O</b>					
REST	CB	63	100	101	83
	SB	64	90	102	
REST+30%	CB	51	79	73	66
	SB	53	75	81	
REST-30%	CB	91	143	140	117
	SB	92	126	141	
FAZ	CB	115	73	73	82
	SB	125	68	69	
FAZ+30%	CB	87	57	55	64
	SB	94	53	55	

Taxa de desfrute é a porcentagem do nutriente exportado nos grãos em relação ao aplicado na adubação. REST: Restituição dos nutrientes exportados pela cultura anterior; FAZ: Manejo padrão da fazenda.

### 3.3.4 Balanço de nutrientes e alterações na fertilidade do solo

Após três ciclos safra/segunda safra, já foi possível observar tendência de os teores de P variarem na profundidade de 0-10 cm em função das opções de dimensionamento da adubação (Figura 8). Para o balanço de nutrientes, na estratégia da fazenda (FAZ), o P foi o nutriente com o maior saldo positivo (Figura 9). O balanço positivo se justificava no início do cultivo nos solos de Cerrado pela alta capacidade de adsorção de P. Porém, com as constantes adições deste nutriente ao solo, há uma gradual redução na capacidade de adsorção, o que possibilita melhor aproveitamento do P pelas plantas (Roy et al., 2017). Assim, esse balanço

positivo não é mais necessário, possibilitando estratégias mais racionais com balanço próximo a neutralidade.

Já no caso do potássio, que apresenta maior mobilidade no perfil de solo, é visível a variação em função dos tratamentos de adubação até 20 cm (Figura 8). Além disso, o balanço de nutrientes da opção da FAZ é muito próximo da REST (Figura 9). Um ponto importante na evolução do manejo desse nutriente está relacionado ao aumento da área de segunda safra, que está associada com uso de espécies com sistema radicular mais profundo, com capacidade de reciclar parte do K que percola no perfil de solo, reduzindo as perdas do sistema (Oliveira et al., 2020).

Em relação ao estoque de nutrientes no solo, três anos de manejo sem adubação do tratamento controle foram suficientes para reduzir os teores de P do solo para níveis próximos ao crítico ( $10 \text{ mg dm}^{-3}$ ), considerando a profundidade de 0-10 cm. A cada  $24,3 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  negativos no balanço de nutrientes houve a redução de  $1 \text{ mg dm}^{-3}$  no teor de P (Mehlich 1) no solo na profundidade de 0-10 cm (Figura 10). Segundo a literatura, para solos com teor de argila de 60% seriam necessários cerca de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  para elevar em  $1 \text{ mg dm}^{-3}$  o teor de P Mehlich no solo, na profundidade de 0-20 cm (Sousa et al., 2016; Resende et al., 2022). Portanto, levando em conta que a diferença de volume de solo nas respectivas camadas, o comportamento do P no presente estudo confirmou a expectativa baseada nos indicadores da literatura.

No caso do K, o teor ainda está relativamente mais distante do nível crítico ( $80 \text{ mg dm}^{-3}$ ). Para reduzir em  $1 \text{ mg dm}^{-3}$  o teor de K no solo na profundidade de 0-20 cm, foram necessários  $6,6 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  negativos no balanço (Figura 10). Pela literatura, o valor esperado seria de  $2,4 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  (Sousa e Lobato, 2004; Resende et al., 2022). Porém, é preciso considerar que, diferentemente do P, sendo o K oriundo das adubações mais móvel no solo, este não fica retido apenas na camada superficial do perfil. Além da absorção de K pelas culturas comerciais não ficar restrita à camada de 0-20 cm, gramíneas como o sorgo, milho e braquiária são capazes de reciclar o K presente em maiores profundidades (Oliveira et al., 2020), trazendo-o de volta e reabastecendo novamente a camada superficial quando os restos culturais não são removidos da lavoura. Esses fatores ajudam a explicar o fato de a depleção de K na camada de 0-20 cm ter ficado aquém da expectativa baseada nos indicadores da literatura.

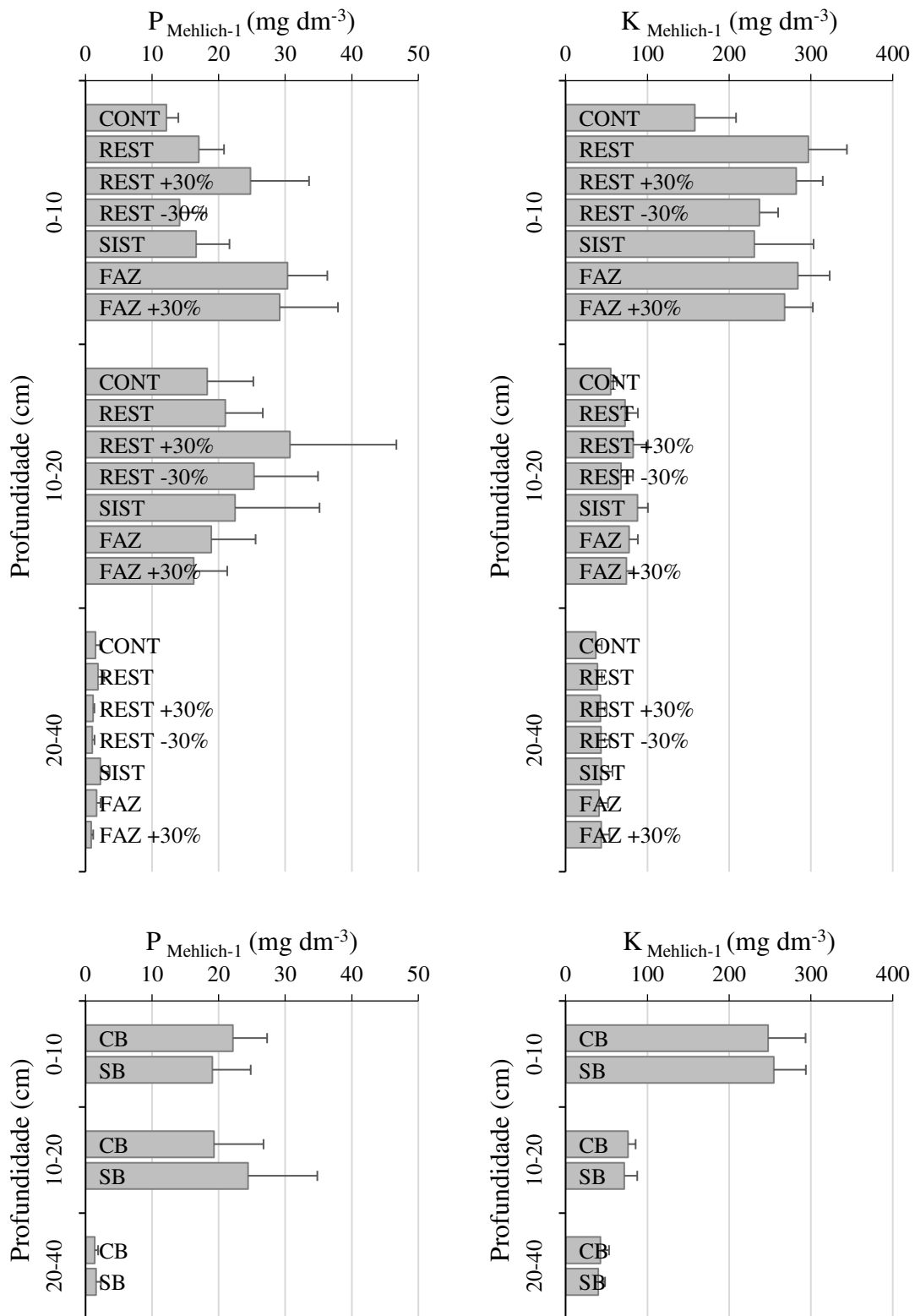


Figura 8. Teores de P e K no solo após três ciclos safra/segunda safra (outubro de 2021), sob diferentes opções de adubação NPK, em sistemas com (CB) ou sem (SB) introdução de braquiária como planta de cobertura. Unaí – MG, 2022. CONT: Controle sem adubação; REST: Restituição dos nutrientes exportados pela cultura anterior; SIST: Adubação de sistema, com todo P e K aplicado na safra e N em cobertura na segunda safra; FAZ: Manejo padrão da fazenda.

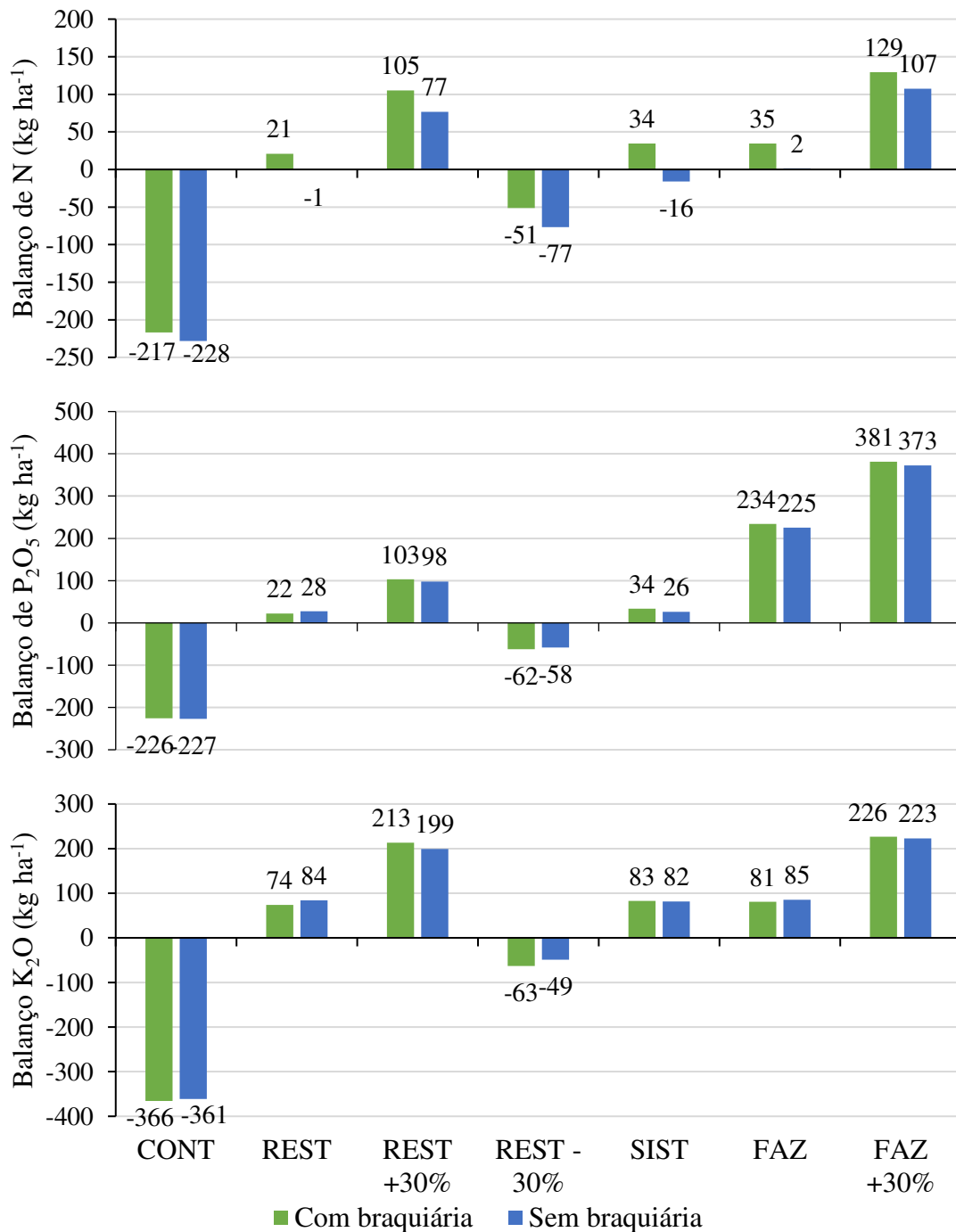


Figura 9. Balanço em equivalentes N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O após três ciclos safra/segunda safra (outubro de 2021), sob diferentes opções de adubação NPK, em sistemas com ou sem introdução de braquiária como planta de cobertura. Unaí – MG, 2022. CONT: Controle sem adubação; REST: Restituição dos nutrientes exportados pela cultura anterior; SIST: Adubação de sistema, com todo P e K aplicado na safra e N em cobertura na segunda safra; FAZ: Manejo padrão da fazenda.

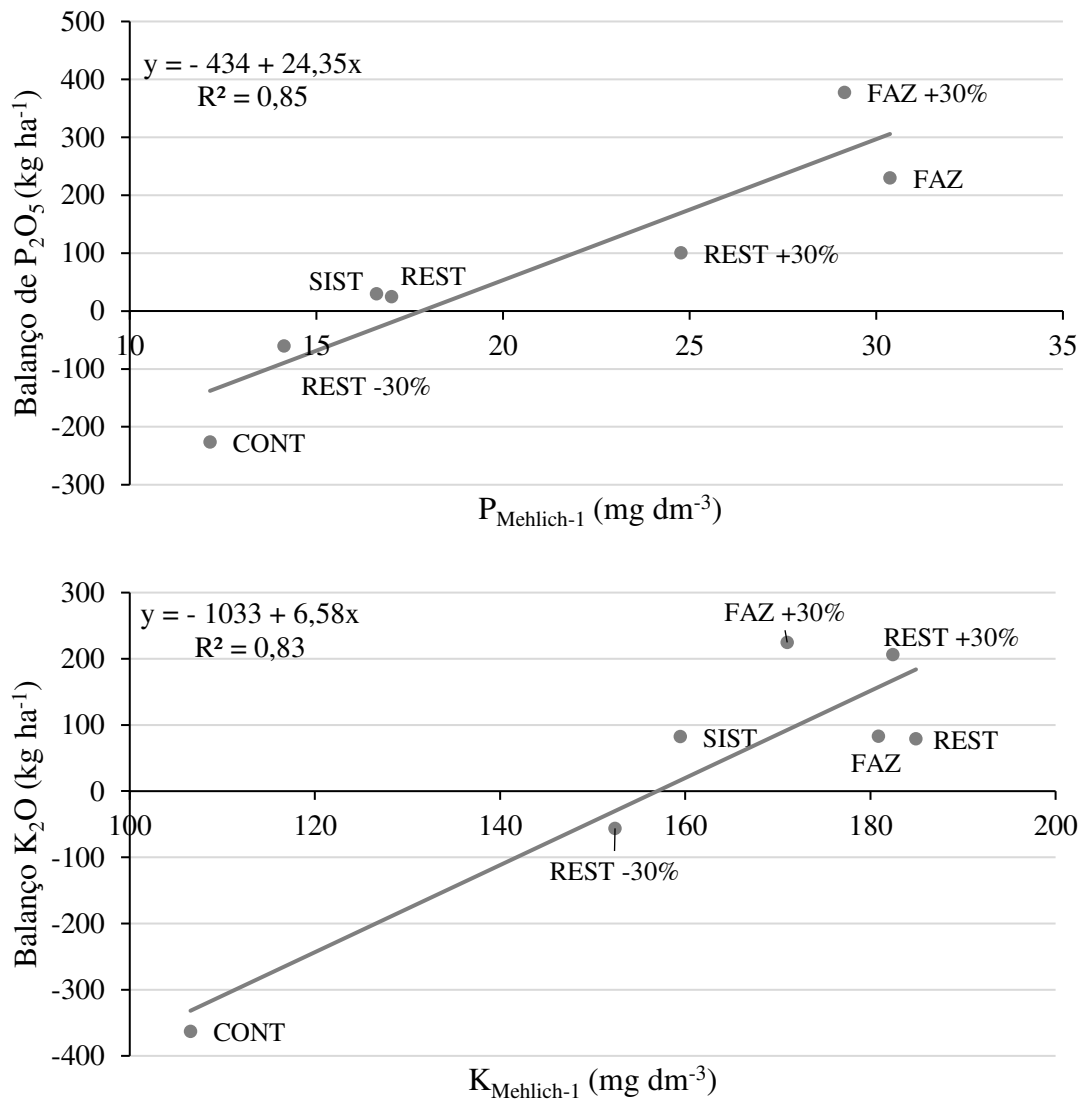


Figura 10. Relação entre balanço de  $P_2O_5$  e de  $K_2O$  com a disponibilidade de P (0 – 10 cm) e K (0 – 20 cm) no solo, após três ciclos safra/segunda safra (outubro de 2021), sob diferentes opções de adubação NPK. Unai – MG, 2022. Média dos sistemas com ou sem introdução de braquiária como planta de cobertura. CONT: Controle sem adubação; REST: Restituição dos nutrientes exportados pela cultura anterior; SIST: Adubação de sistema, com todo P e K aplicado na safra e N em cobertura na segunda safra; FAZ: Manejo padrão da fazenda.

### 3.4 Conclusões

O sorgo e o milho segunda safra são mais responsivos às variações na adubação NPK em solo de fertilidade construída, com reflexos na produtividade de grãos, o que não se verifica na soja cultivada na safra.

O consórcio com braquiária reduz a produtividade de sorgo e não altera a produtividade de milho segunda safra, mas pode aumentar a produtividade da soja subsequente, além de proporcionar maior cobertura do solo.

A adubação de restituição associada ao balanço de nutrientes mantém os níveis de produtividade e promove o uso mais eficiente de nutrientes, preservando a condição de fertilidade do solo.

A adubação de restituição e restituição mais 30% proporcionam maior retorno econômico em relação ao manejo da fazenda.

### 3.5 Referências bibliográficas

ALVES, B. J.; ZOTARELLI, L.; FERNANDES, F. M.; HECKLER, J. C.; MACEDO, R. A. T.; 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, p. 449-456, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000300011>.

BALBINOT JUNIOR, A. A.; SANTOS, J. C. F.; DEBIASI, H.; YOKOYAMA, A. H. Contribution of roots and shoots of Brachiaria species to soybean performance in succession. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, p. 592-598, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2017000800004>

BATAGLIA, O. C.; FERRAREZI, R. S.; FURLANI, P. R.; MEDINA, C. L. **Projeto fósforo no sistema de plantio direto** - Projeto Agrisus PA-541-09: relatório final. São Paulo: Fundação Agrisus, 2009. 30p. Disponível em: [http://www.agrisus.org.br/arquivos/PA541\\_Fosforo.pdf](http://www.agrisus.org.br/arquivos/PA541_Fosforo.pdf) Acesso em: 01/09/2014.

BORGHI, E.; CRUSCIOL, C. A. C.; MATEUS, G. P.; NASCENTE, A. S.; MARTINS, P. O. Intercropping time of corn and palisadegrass or guineagrass affecting grain yield and forage production. **Crop Science**, v. 53, n. 2, p. 629-636, 2013. <https://doi.org/10.2135/cropsci2012.08.0469>

CIAMPITTI, I. A.; SALVAGIOTTI, F. New insights into soybean biological nitrogen fixation. **Agronomy Journal**. v. 110, p. 1185-1196, 2018.

Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB. **Portal de informações agropecuárias: Série histórica dos grãos**. 2022. Disponível em: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-serie-historica-graos.html>. Acesso em: 03 de julho de 2022.

CORREIA, N. M.; LEITE, M.B.; FUZITA, W. E. Consórcio de milho com *Urochloa ruziziensis* e os efeitos na cultura da soja em rotação. **Bioscience Journal**, v. 29, p. 65-76, 2013

CUNHA, J. F.; FRANCISCO, E. A. B.; PROCHNOW, L. I. Balanço de nutrientes na agricultura brasileira no período de 2013 a 2016. **Informações Agrônomicas**, n. 162, p. 3-14, 2018.

- FERREIRA, D. F. Sisvar: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019. <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>
- FIXEN, P. E. Balanço de nutrientes em terras cultivadas: um desafio global para o setor de fertilizantes. **Informações Agronômicas**, n. 133, p. 1-6, 2011.
- FORTES, D. G.; ROSA JUNIOR, E. J.; ROSA, Y. B. C. J.; SOUZA, F. R.; GELAIN, E. Successive Cultivation of Soybean/Corn Intercropped with *Urochloa brizantha* topdressed with Nitrogen. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, e0140198, 2016. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20140198>
- GARBELINI, L. G.; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; BETIOLI JUNIOR, E.; TELLES, T. S. Profitability of soybean production models with diversified crops in the autumn-winter. **Agronomy Journal**. v. 112, p. 4092– 4103, 2020. <https://doi.org/10.1002/agj2.20308>
- HICKMANN, C.; RESENDE, A. V.; SILVA, C. A.; LACERDA, J. J. J.; MOREIRA, S. G.; CONCEIÇÃO, O. P. Profitability and efficiency of fertilization in a corn/soybean/corn system in a Latosol with improved fertility. **Revista Agrogeoambiental**, v. 9, p. 97-110, 2018. <http://dx.doi.org/10.18406/2316-1817v9n420171037>
- KAMINSKI, J.; MOTERLE, D. F.; RHEINHEIMER, D. S.; GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G. Potassium availability in a hapludalf soil under long term fertilization. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 783-791, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000300020>
- LACERDA, J. J. J.; RESENDE, A.V.; FURTINI NETO, A. E.; HICKMANN, C.; CONCEICAO, O. P. Adubação, produtividade e rentabilidade da rotação entre soja e milho em solo com fertilidade construída. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, p. 769-778, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2015000900005>
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. A career perspective on soil management in the Cerrado Region of Brazil. **Advances in Agronomy**. v. 137, p. 1-72, 2016. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.12.004>
- MATEUS, G. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; PARIZ, C. M.; BORGHI, E.; COSTA, C.; MARTELLO, J. M.; FRANZLUEBBERS, A. J.; CASTILHOS, A. M. Sidedress Nitrogen Application Rates to Sorghum Intercropped with Tropical Perennial Grasses. **Agronomy Journal**, v. 108, p. 433-447, 2016. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0236>
- MATEUS, G. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; PARIZ, C. M.; COSTA, N. R.; BORGHI, E.; COSTA, C.; MARTELLO, J. M.; CASTILHOS, A. M.; FRANZLUEBBERS, A. J.; CANTARELLA, H. Corn intercropped with tropical perennial grasses as affected by sidedress nitrogen application rates. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 116, p. 223–244, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10705-019-10040-1>
- MOLL, R. H.; KAMPRATH, E. J.; JACKSON, W. A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. **Agronomy Journal**, v. 74, p. 562-564, 1982.
- OLIVEIRA, S. M.; DIAS, D. S.; REIS, A. F. B.; CRUZ, S. C. S.; FAVARIN, J. L. Vertical stratification of K uptake for soybean-based crop rotation. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 117, p. 185–197, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10059-9>

RESENDE, A. V.; BORGHI, E.; GONTIJO NETO, M. M.; FONTOURA, S. M. V.; BORIN, A. L. D. C.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; CARVALHO, M. C. S.; KAPPES, C. Balanço de nutrientes e manejo da adubação em solos de fertilidade construída. *In*: SEVERIANO, E. C.; MORAIS, M. F.; PAULA, A. M. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. v. 10. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. p. 342-398.

RESENDE, A.V.; FONTOURA, S. M. V.; BORGHI, E.; SANTOS, F. C.; KAPPES, C.; MOREIRA, S. G.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; BORIN, A. L. D. C. Solos de fertilidade construída: características, fundamento e manejo. **Informações Agronômicas**, n. 156, p. 1-19, 2016.

RESENDE, A. V.; GIEHL, J.; GONTIJO NETO, M. M.; BORGHI, E.; ABREU, S. C.; SIMAO, E. P.; COELHO, A. M.; SANTOS, F. C.; SANTANA, D. P.; ALVES, V. M. C. É hora de usar a poupança de nutrientes do seu solo. **Revista Plantio Direto**, v. 2022, p. 15-23, 2022.

RODRIGUES, M.; PAVINATO, P. S.; WITHERS, P. J. A.; TELES, A. P. B.; HERRERA, W. F. B. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savana. **Science of the Total Environment**. v. 542, p. 1050-1061, 2016. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.118>

ROY, E. D.; RICHARDS, P. D.; MARTINELLI, L. A.; DELLA COLETTA, L; LINS, S. R. M.; VAZQUEZ, F. F.; WILLIG, E.; SPERA, S. A.; VANWEY, L. K.; PORDER, S. The phosphorus cost of agriculture intensification in the tropics. **Nature Plants**. v. 2, 2016. <https://doi.org/10.1038/NPLANTS.2016.43>

ROY, E. D.; WILLIG, E.; RICHARDS, P. D.; MARTINELLI, L. A.; VAZQUEZ, F. F.; PEGORINI, L.; SPERA, S. A.; PORDER, S. (2017) Soil phosphorus sorption capacity after three decades of intensive fertilization in Mato Grosso, Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. v. 249, p. 206-214, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.08.004>

SALTON, J. C.; TOMAZI, M. **Sistema radicular de plantas e qualidade do solo**. Comunicado Técnico n. 198. EMBRAPA: Dourados - MS. 2014. 6p.

SIMÃO, E. P.; RESENDE, A. V.; GONTIJO NETO, M. M.; SILVA, A. F.; GODINHO, V. P. C.; GALVÃO, J. C. C.; BORGHI, E.; OLIVEIRA, A. C.; GIEHL, J. Nitrogen fertilization in off-season corn crop in different Brazilian Cerrado environments. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, e01551, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.01551>

SILVA, F. C. (Ed.) **Manual de análise de solos, plantas e fertilizantes**, 2ª ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica. 2009. 624p.

SILVA, L. S.; GATIBONI, L. C.; ANGHINONI, I.; SOUZA, O. S. (Ed.) **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. SBCS. 2016. 376p.

SILVA, C. G. M.; RESENDE, A. V.; GUTIÉRREZ, A. M.; MOREIRA, S. G.; BORGHI, E.; ALMEIDA, G. O. Macronutrient uptake and export in transgenic corn under two levels of fertilization. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, p. 1363-1372, 2018.

SOUSA, D. M. G., LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. 416p.

SOUSA, D. M. G.; NUNES, R. S.; REIN, T. A.; SANTOS JUNIOR, J. D. G. Manejo do fósforo na região do Cerrado. *In*: FLORES, R. A.; CUNHA, P. P. (Eds.). **Práticas de manejo**

**do solo para adequada nutrição de plantas no Cerrado.** 1ª ed. Goiânia: Gráfica UFG. 2016. p. 291-357.

SYERS, J. K.; JOHNSTON, A. E.; CURTIN, D. **Efficiency of soil fertilizer phosphorus use.** FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 18. Food and Agriculture Organisation of the United Nation: Rome, Italy. 2008. 108p. <http://www.fao.org/3/a1595e/a1595e00.html>

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. (Eds.) **Manual de métodos de análise de solo.** 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 574 p.

#### 4. CONCLUSÕES GERAIS

Sensores baseados em índice de clorofila (SPAD) e índices de vegetação (Greenseeker, imagens orbitais) são pouco efetivos em discriminar condições de lavoura em solo de fertilidade construída, mesmo com diferenças de 30% nas quantidades de nutrientes fornecidas às culturas.

Em sistemas de sorgo ou milho consorciado com braquiária, o monitoramento baseado em índices de vegetação pode não refletir o estado nutricional ou potencial produtivo da cultura principal.

O sorgo e o milho segunda safra são mais responsivos às variações na adubação NPK em solo de fertilidade construída, com reflexos na produtividade de grãos, o que não se verifica na soja cultivada na safra.

O consórcio com braquiária reduz a produtividade de sorgo e não altera a produtividade de milho segunda safra, mas pode aumentar a produtividade da soja subsequente, além de proporcionar maior cobertura do solo.

A adubação de restituição associada ao balanço de nutrientes mantém os níveis de produtividade e promove o uso mais eficiente de nutrientes, preservando a condição de fertilidade do solo.

A adubação de restituição e restituição mais 30% proporcionam maior retorno econômico em relação ao manejo da fazenda.

## 5. APÊNDICE

Tabela 1. Fertilizantes aplicados (kg ha<sup>-1</sup>) ao longo de 3 anos em ensaio com diferentes estratégias de adubação. Unai – MG. 2022.

	Controle		Restituição		Rest. +30%		Rest. -30%		Sistema		Fazenda		Faz. +30%	
	CB	SB	CB	SB	CB	SB	CB	SB	CB	SB	CB	SB	CB	SB
Soja 2018/19														
MAP (11-52-00)	0	0	107	107	139	139	75	75	107	107	180	180	234	234
KCl (00-00-60)	0	0	178	178	231	231	124	124	178	178	90	90	117	117
Sorgo 2019														
MAP (11-52-00)	0	0	78	78	102	102	55	55	78	78	150	150	195	195
KCl (00-00-60)	0	0	163	163	211	211	114	114	163	163	100	100	130	130
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (27-00-00)	0	0	275	275	357	357	192	192	275	275	120	120	156	156
Soja 2019/20														
MAP (11-52-00)	0	0	104	121	135	157	73	84	188	204	160	160	208	208
KCl (00-00-60)	0	0	51	61	67	79	36	43	212	221	150	150	195	195
Milho 2020														
Formulado (14-25-00)	0	0	175	175	227	227	122	122	0	0	200	200	260	260
KCl (00-00-60)	0	0	161	161	209	209	112	112	0	0	150	150	195	195
Ureia (45-00-00) <sup>1</sup>	0	0	172	172	223	223	120	120	172	172	200	200	260	260
Soja 2020/21														
Formulado (08-40-00)	0	0	95	91	124	118	67	64	212	207	180	180	234	234
KCl (00-00-60)	0	0	53	38	69	50	37	27	224	210	150	150	195	195
Milho 2021														
MAP (11-52-00)	0	0	90	90	116	116	63	63	0	0	220	220	286	286
KCl (00-00-60)	0	0	171	171	223	223	120	120	0	0	150	150	195	195
Ureia (45-00-00) <sup>1</sup>	0	0	205	205	267	267	144	144	205	205	200	200	260	260

<sup>1</sup>Ureia protegida com NBPT.

Tabela 2. Resultados da análise foliar de cultivos de sucessão safra/segunda safra, em sistemas com ou sem introdução de braquiária, sob diferentes opções de adubação NPK. Unai - MG, 2022.

	Soja 2018/19										
	N (g kg <sup>-1</sup> )	P (g kg <sup>-1</sup> )	K (g kg <sup>-1</sup> )	Ca (g kg <sup>-1</sup> )	Mg (g kg <sup>-1</sup> )	S (g kg <sup>-1</sup> )	B (mg kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg kg <sup>-1</sup> )
CONT	54,4	2,6	17,6	9,8	3,3	2,7	-	59,8	130,5	253,2	7,0
REST	55,0	2,6	20,2	9,6	3,3	2,7	-	55,6	110,4	260,6	6,2
REST+30%	56,5	2,6	17,6	10,1	3,5	2,8	-	54,9	128,7	266,1	6,4
REST-30%	54,5	2,5	17,9	9,5	3,2	2,7	-	55,3	127,0	257,2	6,6
SIST	54,4	2,5	16,9	9,8	3,4	2,7	-	53,4	106,5	258,6	6,2
FAZ	55,7	2,6	18,3	9,6	3,4	2,7	-	53,9	108,5	259,8	6,0
FAZ+30%	54,8	2,5	16,9	9,9	3,5	2,7	-	52,2	129,0	270,9	5,7
Com braquiária	54,8	2,9	20,2	10,1	3,7	2,7	-	59,4	139,2	257,9	6,4
Sem braquiária	55,3	2,2	15,6	9,4	3,1	2,8	-	50,7	101,0	264,0	6,2
Adequado <sup>2</sup>	45-55	2,5-5,0	17-25	4-20	3-10	2,1-4,0	21-55	20-50	51-350	21-100	10-30
	Sorgo 2018/19										
	N (g kg <sup>-1</sup> )	P (g kg <sup>-1</sup> )	K (g kg <sup>-1</sup> )	Ca (g kg <sup>-1</sup> )	Mg (g kg <sup>-1</sup> )	S (g kg <sup>-1</sup> )	B (mg kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg kg <sup>-1</sup> )
CONT	29,8	4,1	18,1	3,8	3,3	1,7	-	25,5	272,9	37,1	5,8
REST	30,5	5,2	20,8	3,6	3,5	1,7	-	29,3	250,3	39,2	6,6
REST+30%	31,5	5,3	19,9	3,6	3,5	1,8	-	28,9	404,5	38,1	6,7
REST-30%	30,6	4,8	20,0	3,6	3,2	1,6	-	27,6	304,7	38,4	6,5
SIST	31,8	5,0	18,5	3,6	3,3	1,7	-	27,7	251,3	36,4	6,4
FAZ	31,2	5,0	19,3	3,7	3,4	1,7	-	28,8	271,4	38,3	6,7
FAZ+30%	30,8	5,3	21,6	4,0	3,7	1,8	-	29,6	447,0	39,4	6,8
Com braquiária	30,2	4,7	19,5	3,5	3,3	1,6	-	27,0	437,8	36,4	6,3
Sem braquiária	31,6	5,2	20,0	3,9	3,6	1,8	-	29,4	191,3	39,9	6,7
Adequado <sup>2</sup>	25-35	2,0-4,0	14-25	2,5-6,0	1,5-5,0	1,5-3,0	4-20	20-70	100-300	25-150	5-25

<sup>1</sup> Adubação de sistema se diferenciou de restituição a partir do segundo ano agrícola; <sup>2</sup> Faixas interpretadas como adequadas, segundo Oliveira (2004).

Tabela 2. Continuação... Resultados da análise foliar de cultivos de sucessão safra/segunda safra, em sistemas com ou sem introdução de braquiária, sob diferentes opções de adubação NPK. Unaí - MG, 2022.

	Soja 2019/20										
	N (g kg <sup>-1</sup> )	P (g kg <sup>-1</sup> )	K (g kg <sup>-1</sup> )	Ca (g kg <sup>-1</sup> )	Mg (g kg <sup>-1</sup> )	S (g kg <sup>-1</sup> )	B (mg kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg kg <sup>-1</sup> )
CONT	50,2	3,9	24,2	11,2	3,9	3,6	49,4	63,0	95,0	114,4	175,3
REST	50,7	3,8	24,6	11,3	4,0	3,6	50,0	59,6	95,3	124,4	162,3
REST+30%	51,2	3,6	24,4	11,2	3,9	3,5	46,9	51,2	123,2	94,3	160,5
REST-30%	50,8	3,6	22,9	10,6	3,7	3,4	49,2	53,0	91,1	102,4	146,8
SIST	51,2	3,8	24,9	11,1	4,0	3,6	53,7	56,4	102,5	132,3	165,7
FAZ	51,4	3,8	25,0	11,0	4,0	3,6	52,3	55,0	100,6	120,7	164,9
FAZ+30%	52,2	3,6	24,3	11,3	3,9	3,4	47,2	46,9	100,3	87,2	164,2
Com braquiária	50,4	3,7	24,6	11,2	3,9	3,5	47,6	54,7	96,7	97,8	152,0
Sem braquiária	51,8	3,8	24,0	11,0	3,9	3,6	52,0	55,4	105,6	123,8	173,6
Adequado <sup>2</sup>	45-55	2,5-5,0	17-25	4-20	3-10	2,1-4,0	21-55	20-50	51-350	21-100	10-30
	Soja 2020/21										
CONT	50,6	3,5	20,3	6,9	3,3	-	-	33,0	165,7	23,4	154,2
REST	50,8	3,5	19,8	6,8	3,3	-	-	31,3	143,7	24,0	155,9
REST+30%	50,5	3,5	19,3	6,9	3,3	-	-	30,0	242,5	25,0	131,7
REST-30%	50,3	3,4	20,2	6,7	3,2	-	-	31,4	196,3	24,8	159,2
SIST	51,7	3,5	20,9	6,6	3,2	-	-	30,8	147,4	24,9	124,0
FAZ	50,9	3,6	19,9	6,6	3,2	-	-	31,2	163,4	25,6	154,8
FAZ+30%	51,7	3,6	20,7	6,7	3,3	-	-	30,7	255,6	26,4	141,9
Com braquiária	50,1	3,6	19,4	6,7	3,3	-	-	32,2	250,0	25,4	144,3
Sem braquiária	51,7	3,5	20,9	6,7	3,2	-	-	30,2	125,6	24,3	147,6
Adequado <sup>2</sup>	45-55	2,5-5,0	17-25	4-20	3-10	2,1-4,0	21-55	20-50	51-350	21-100	10-30

<sup>1</sup> Adubação de sistema se diferenciou de restituição a partir do segundo ano agrícola; <sup>2</sup> Faixas interpretadas como adequadas, segundo Oliveira (2004).

Tabela 2. Continuação... Resultados da análise foliar de cultivos de sucessão safra/segunda safra, em sistemas com ou sem introdução de braquiária, sob diferentes opções de adubação NPK. Unaí - MG, 2022.

	Milho 2020/21										
	N (g kg <sup>-1</sup> )	P (g kg <sup>-1</sup> )	K (g kg <sup>-1</sup> )	Ca (g kg <sup>-1</sup> )	Mg (g kg <sup>-1</sup> )	S (g kg <sup>-1</sup> )	B (mg kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg kg <sup>-1</sup> )
CONT	28,2	1,9	23,8	5,0	1,7	1,7	6,5	34,3	242,0	38,8	6,8
REST	37,0	2,6	25,5	5,0	2,1	2,1	7,8	39,5	241,5	51,0	9,3
REST+30%	35,3	2,7	25,5	4,9	2,0	2,3	6,6	56,8	295,3	59,3	11,3
REST-30%	33,5	2,4	25,5	5,3	2,1	2,1	7,0	46,5	300,0	45,8	8,8
SIST	37,0	2,7	25,6	5,4	2,2	2,3	8,4	45,0	312,3	51,5	10,5
FAZ	35,9	2,5	24,4	5,2	2,0	2,1	5,3	39,0	242,5	52,3	9,8
FAZ+30%	36,5	2,8	25,9	5,2	2,1	2,4	8,8	54,0	389,3	57,5	11,3
Com braquiária	34,6	2,6	25,7	5,3	2,0	2,2	7,1	49,6	353,9	52,6	9,9
Sem braquiária	34,9	2,4	24,6	5,0	2,0	2,1	7,3	40,4	224,0	49,1	9,4
Adequado <sup>2</sup>	28-35	1,8-3,0	13-30	2,5-10	1,5-5,0	1,5-3,0	10-25	15-100	30-250	20-200	6-20

<sup>1</sup> Adubação de sistema se diferenciou de restituição a partir do segundo ano agrícola; <sup>2</sup> Faixas interpretadas como adequadas, segundo Oliveira (2004).

Tabela 3. Altura de planta (cm) de cultivos de sucessão safra/segunda safra, em sistemas com ou sem introdução de braquiária, sob diferentes opções de adubação NPK. Unaí - MG, 2022.

F. V.	G. L.	Sorgo 2019 <sup>2</sup>	Sorgo 2019 <sup>3</sup>	Milho 2020 <sup>1</sup>	Milho 2021 <sup>1</sup>
		Quadrado Médio			
Sistema - S	1	164,6**	100,4*	6,4 <sup>ns</sup>	60,1 <sup>ns</sup>
Bloco (S)	6	23,8	8,2	57,9	119,7
Adubação - A	6	240,0**	136,9**	1.355,2**	3.753,8**
S * A	6	7,5 <sup>ns</sup>	11,9 <sup>ns</sup>	11,1 <sup>ns</sup>	92,3 <sup>ns</sup>
Erro	36	12,2	19,6	19,0	92,3
C. V. (%)		5,81	3,01	1,84	3,76
CONT		48b	138b	210d	209c
REST		62a	149a	244ab	267a
REST+30%		63a	148a	247a	267a
REST-30%		61a	150a	239bc	262ab
SIST		63a	149a	232c	249b
FAZ		63a	149a	246ab	264ab
FAZ+30%		61a	149a	243ab	271a
Com braquiária		62A	149A	238	254
Sem braquiária		58B	146B	237	256

Momento de avaliação: <sup>1</sup> colheita; <sup>2</sup> 30 dias após a semeadura; <sup>3</sup> Florescimento; \*\* significativo a 1% de probabilidade de erro; \* significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> não significativo.

Tabela 4. Diâmetro do colmo (mm) do sorgo e do milho segunda safra, em sistemas com ou sem introdução de braquiária, sob diferentes opções de adubação NPK. Unaí - MG, 2022.

F. V.	G. L.	Sorgo 2019 <sup>2</sup>	Sorgo 2019 <sup>3</sup>	Milho 2021 <sup>1</sup>
		Quadrado médio		
Sistema - S	1	2,83 <sup>ns</sup>	8,41**	3,45 <sup>ns</sup>
Bloco (S)	6	1,46	0,46	3,88
Adubação - A	6	15,08**	2,20 <sup>ns</sup>	17,00**
S * A	6	0,19 <sup>ns</sup>	0,47 <sup>ns</sup>	2,40 <sup>ns</sup>
Erro	36	0,75	1,05	2,72
C. V. (%)		5,38	5,39	5,93
CONT		13,1b	17,9	24,6a
REST		16,5a	19,0	28,5b
REST+30%		17,2a	19,2	28,7b
REST-30%		16,2a	19,5	28,0b
SIST		16,9a	19,0	27,8b
FAZ		16,3a	19,4	28,2b
FAZ+30%		16,5a	19,0	29,0b
Com braquiária		15,9	18,6B	28,1
Sem braquiária		16,3	19,4A	27,6

Momento de avaliação: <sup>1</sup> colheita; <sup>2</sup> 30 dias após a semeadura; <sup>3</sup> Florescimento\*\* significativo a 1% de probabilidade de erro; \* significativo a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> não significativo.

Tabela 5. Valores de compra ou venda de produtos praticados pela fazenda e utilizados para os cálculos de rentabilidade econômica, Unai – MG, 2022.

Item	Valor
Soja 2018/19	74,00 R\$/saca 60 kg
Soja 2019/20	84,00 R\$/saca 60 kg
Soja 2020/21	120,00 R\$/saca 60 kg
Sorgo 2019	24,00 R\$/saca 60 kg
Milho 2020	50,00 R\$/saca 60 kg
Milho 2021	94,00 R\$/saca 60 kg
MAP (soja 2018/19)	1.700,00 R\$/tonelada
MAP (sorgo 2019)	1.900,00 R\$/tonelada
MAP (soja 2019/20)	2.100,00 R\$/tonelada
MAP (milho 2021)	2.300,00 R\$/tonelada
KCl (soja 2018/19)	1.500,00 R\$/tonelada
KCl (sorgo 2019)	1.600,00 R\$/tonelada
KCl (soja 2019/20)	1.440,00 R\$/tonelada
KCl (milho 2020)	1.440,00 R\$/tonelada
KCl (soja 2020/21)	1.700,00 R\$/tonelada
KCl (milho 2021)	1.600,00 R\$/tonelada
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (sorgo 2019)	1.245,00 R\$/tonelada
Ureia protegida (milho 2020)	1.650,00 R\$/tonelada
Ureia protegida (milho 2021)	2.000,00 R\$/tonelada
Formulado 14-25-00 (milho 2020)	1.800,00 R\$/tonelada
Formulado 08-40-00 (soja 2020/21)	1.980,00 R\$/tonelada
Braquiária Ruziziensis (2019)	10,00 R\$/kg
Braquiária Ruziziensis (2020)	10,00 R\$/kg
Braquiária Ruziziensis (2021)	12,00 R\$/kg

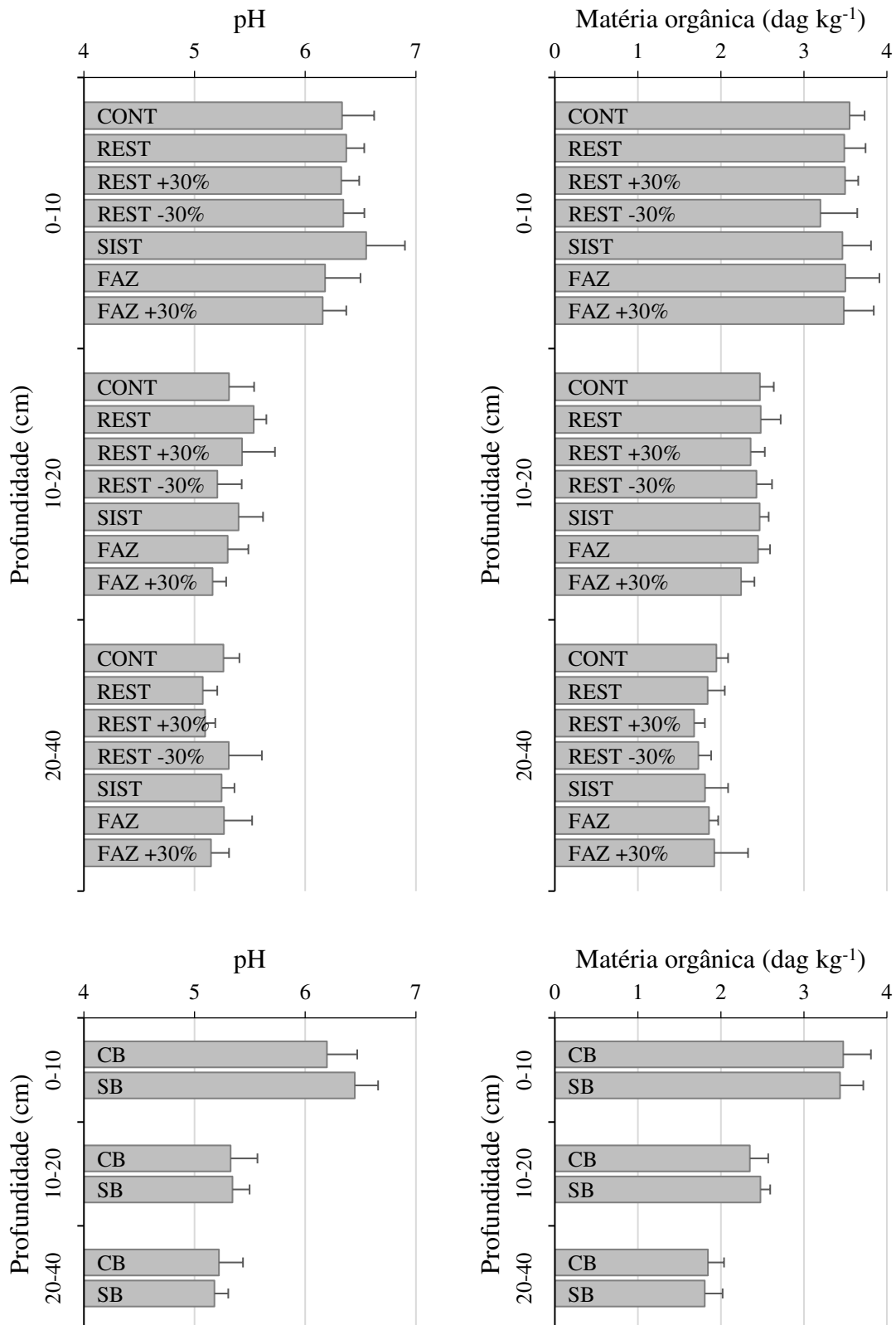


Figura 1. Valores de pH em água e teores de matéria orgânica no solo após três ciclos safra/segunda safra (outubro de 2021), sob diferentes opções de adubação NPK, em sistemas com (CB) ou sem (SB) introdução de braquiária como planta de cobertura. Unaí – MG, 2022.

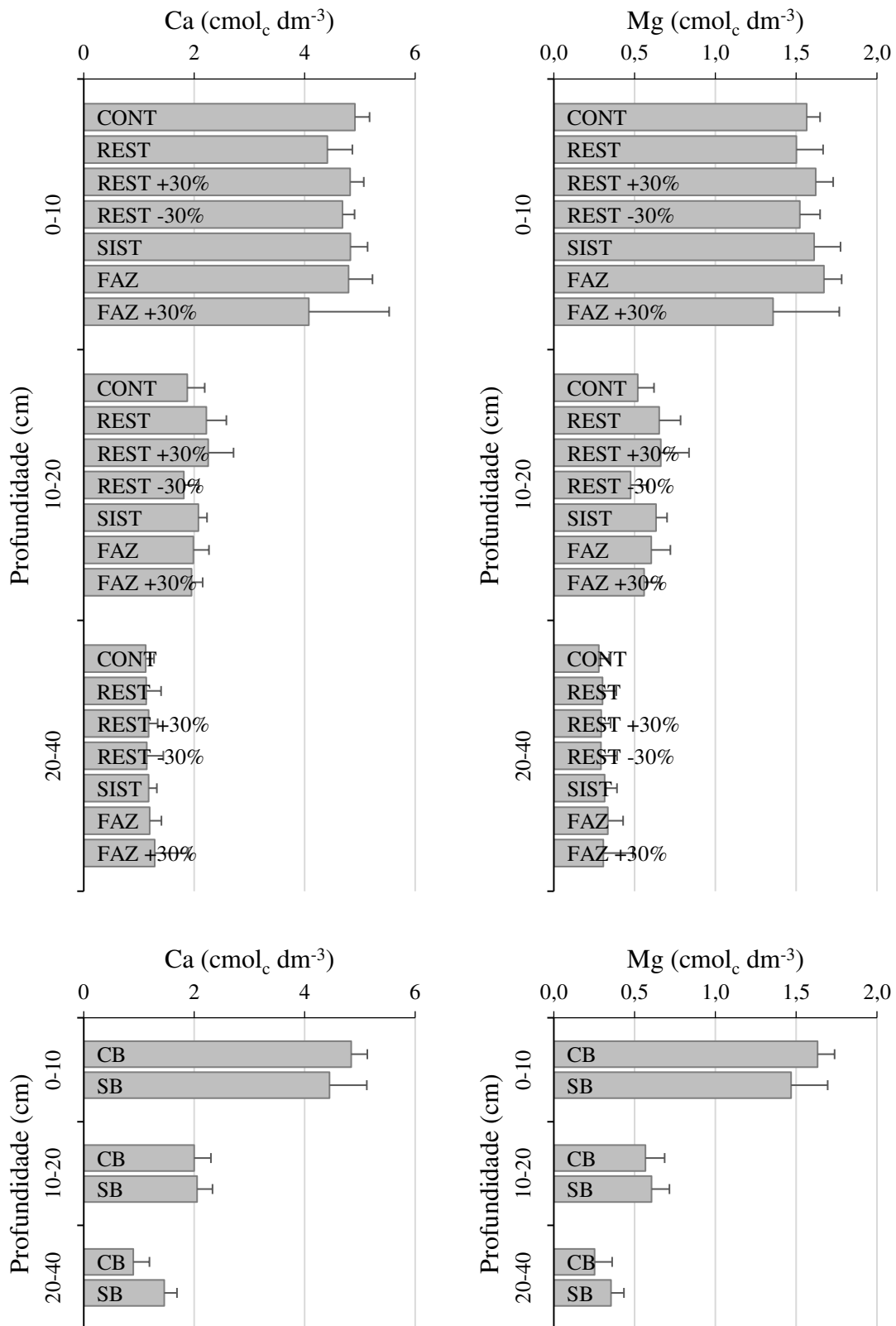


Figura 2. Teores de Ca e Mg no solo após três ciclos safra/segunda safra (outubro de 2021), sob diferentes opções de adubação NPK, em sistemas com (CB) ou sem (SB) introdução de braquiária como planta de cobertura. Unai – MG, 2022.

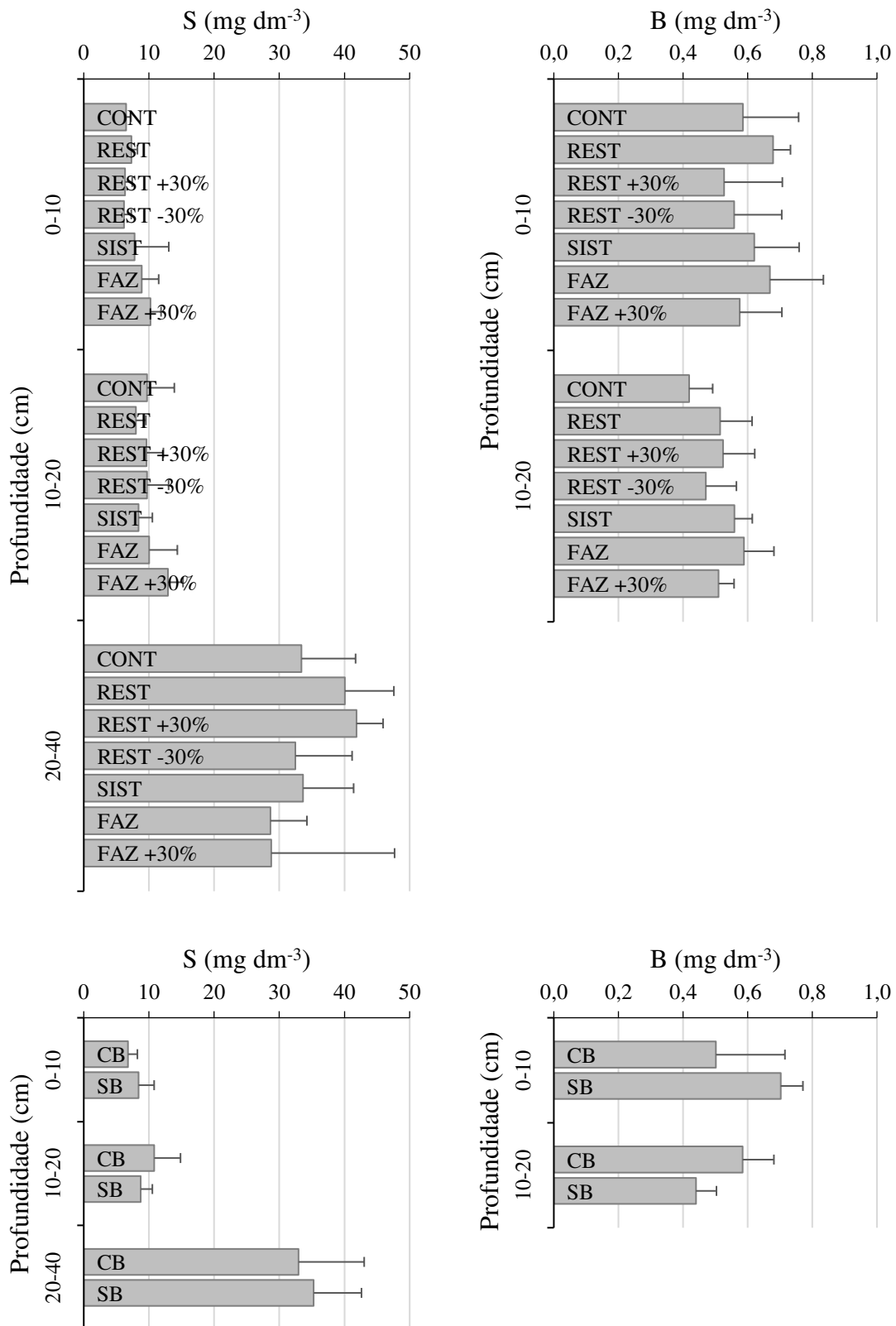


Figura 3. Teores de S e B no solo após três ciclos safra/segunda safra (outubro de 2021), sob diferentes opções de adubação NPK, em sistemas com (CB) ou sem (SB) introdução de braquiária como planta de cobertura. Unai – MG, 2022.

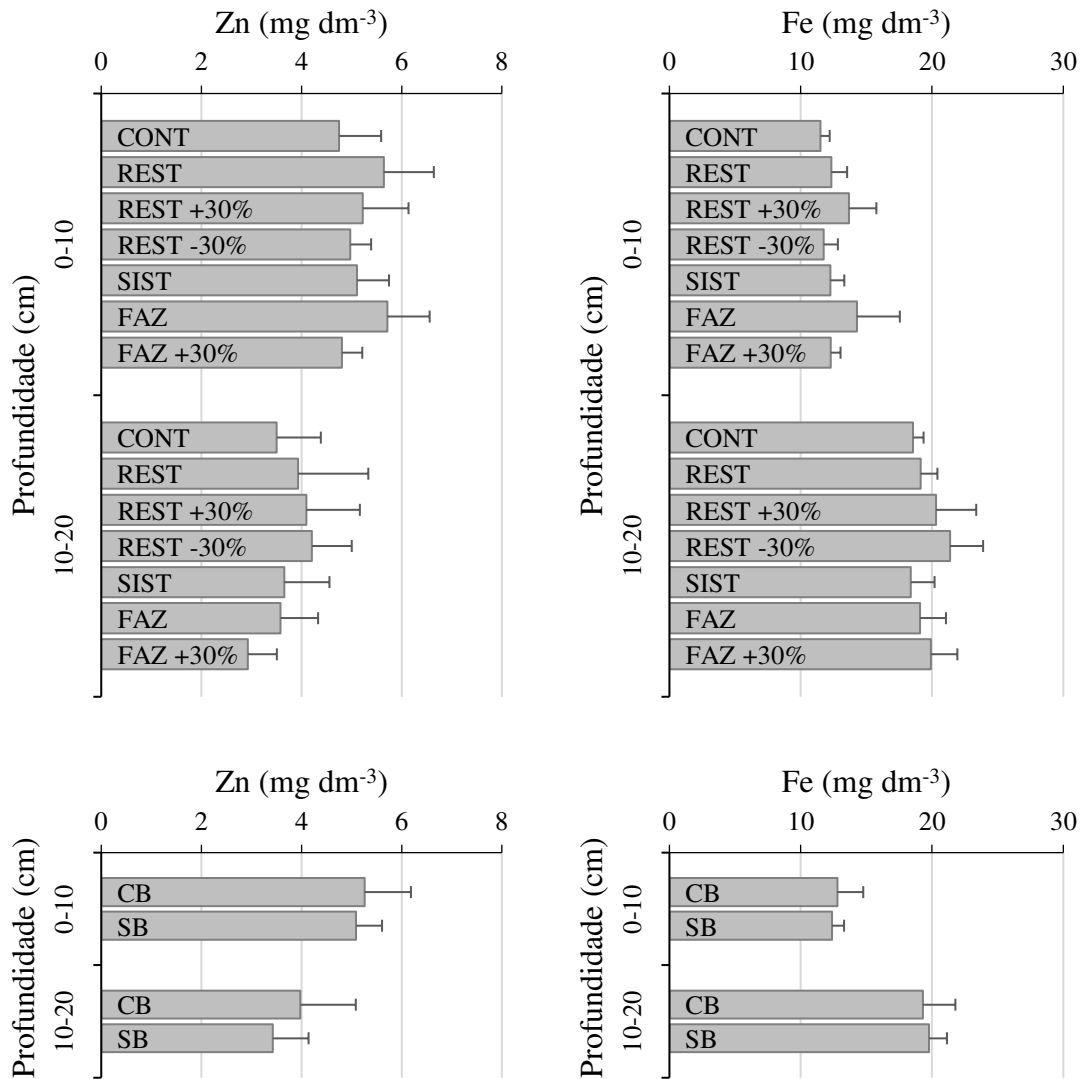


Figura 4. Teores de Zn e Fe no solo após três ciclos safra/segunda safra (outubro de 2021), sob diferentes opções de adubação NPK, em sistemas com (CB) ou sem (SB) introdução de braquiária como planta de cobertura. Unai – MG, 2022.

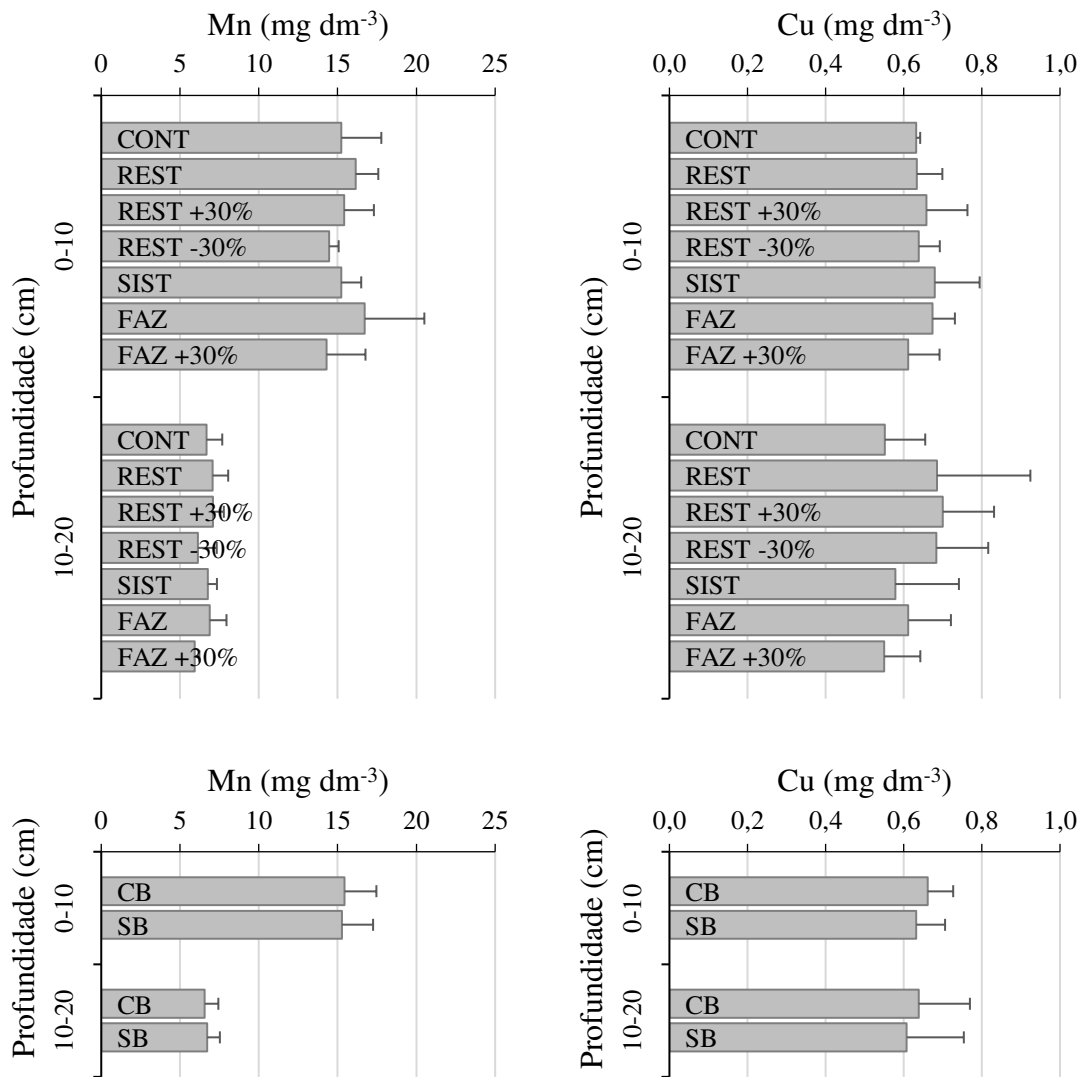


Figura 5. Teores de Mn e Cu no solo após três ciclos safra/segunda safra (outubro de 2021), sob diferentes opções de adubação NPK, em sistemas com (CB) ou sem (SB) introdução de braquiária como planta de cobertura. Unai – MG, 2022.

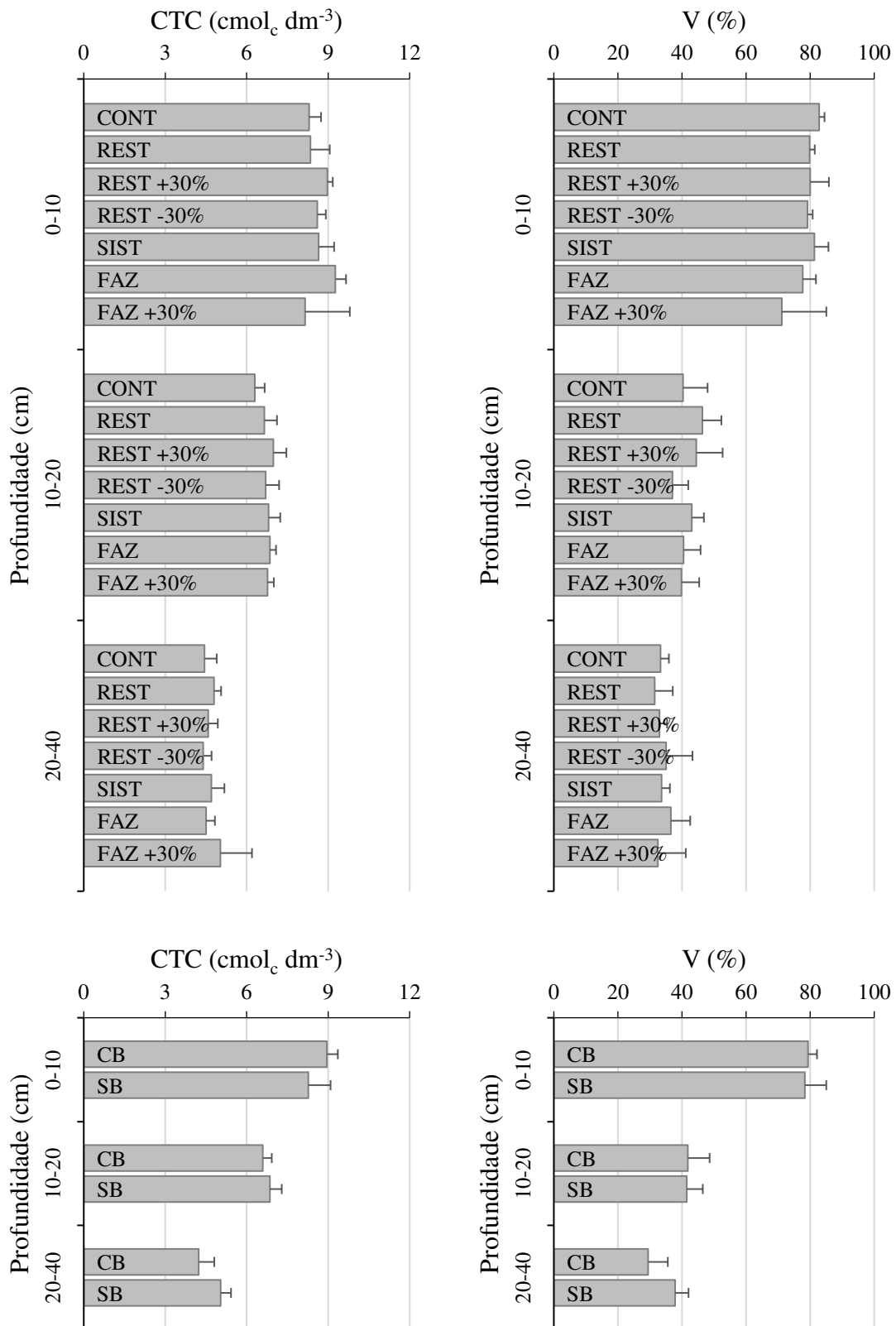


Figura 6. Valores de CTC e V no solo após três ciclos safra/segunda safra (outubro de 2021), sob diferentes opções de adubação NPK, em sistemas com (CB) ou sem (SB) introdução de braquiária como planta de cobertura. Unai – MG, 2022.