

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS

JESSICA ANGELA BET

**Diagnose do estado nutricional de nitrogênio, potássio e cálcio em *Urochloa brizantha* cv.
Marandu utilizando-se técnicas de *machine learning***

Pirassununga

2021

JESSICA ANGELA BET

**Diagnose do estado nutricional de nitrogênio, potássio e cálcio em *Urochloa brizantha* cv.
Marandu utilizando-se técnicas de *machine learning***

(Versão Corrigida)

Tese apresentada à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências do programa de pós-graduação em Zootecnia.

Área de Concentração: Qualidade e Produtividade Animal

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique de Cerqueira Luz

Pirassununga

2021

Ficha catalográfica elaborada pelo
Serviço de Biblioteca e Informação, FZEA/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B58d

BET, JESSICA ANGELA

Diagnose do estado nutricional de nitrogênio,
potássio e cálcio em Urochloa brizantha cv. Marandu
utilizando-se técnicas de machine learning /
JESSICA ANGELA BET ; orientador PEDRO HENRIQUE DE

CERQUEIRA LUZ. -- Pirassununga, 2021.

224 f.

1. Nutrição de plantas. 2. Aprendizado de
máquina. 3. Índices espectrais. 4. Adubação de
pastagens. I. DE CERQUEIRA LUZ, PEDRO HENRIQUE,
orient. II. Título.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Maria e Antônio, por nunca terem medido esforços para me proporcionar um ensino de qualidade

AGRADECIMENTOS

À Deus pela oportunidade de crescimento e por permitir que todas as conquistas de minha vida se concretizassem. Aos meus pais, Maria e Antônio, e aos meus familiares, por todo amor e incentivo, sem eles este trabalho e muitos dos meus sonhos não se realizariam. Ao Prof^o Dr. Pedro Henrique de Cerqueira Luz, orientador e amigo, pelo conhecimento compartilhado, experiências divididas, pelos importantes momentos de aprendizagem proporcionados e por ter me incentivado a chegar até aqui. Ao Prof Dr. Valdo Rodrigues Herling por todos os ensinamentos, atenção, amizade e conselhos. Ao Prof^o Dr. Adriano Tech e Prof. Dr. Lilian Pereira pela atenção, ensinamentos, disponibilidade em ajudar e suporte na realização das análises das imagens. Ao Prof. Dr. Rafael Otto, Prof Dr. Godofredo C. Vitti, Prof Dr. Carlos Nascimento, Silvia Carvalho, Sophia Quaglio, Cristiane Prezotto e a todos os membros do GAPE-ESALQ pela oportunidade, momentos vividos, convívio e aprendizado. As amigas Gabriela Strozzi, Paula Morais e Isabella Strozzi que estiveram sempre ao meu lado e de muitas formas me incentivaram. A Dra. Liliane Romualdo e Dra. Fernanda de Fátima da Silva que foram as pioneiras nos estudos de análises de imagens nas Agrárias/FZEA e nos possibilitaram seguir seus passos. Ao Dr. Thiago Pereira Motta pela condução da pesquisa em parceria e amizade. A todos os amigos das Agrárias Cesar, Marisa, Murilo, Raquel, Lilian, Carol, Maria Carolina e Paulo pela dedicação de cada um, troca de experiências e oportunidades em que trabalhamos e aprendemos juntos. Aos funcionários das Agrárias, Paulo Tonetti e Marcos Ferraz, pelos ensinamentos transmitidos e amizade. À Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos pela oportunidade de realização do mestrado e do doutorado e todo suporte disponibilizado durante as disciplinas e experimentos realizados. Ao Prof Reges Heinrichs pela disponibilidade em participar da banca e contribuições. Aos Professores da FZEA pela oportunidade de convivência e de aprendizagem nas disciplinas ministradas. À Erica, Maria Cecília e a todos os membros do Serviço de Pós-Graduação pela atenção, atendimento e auxílio nas questões referentes a PG. À Capes pela concessão da bolsa de estudos A todos que participaram direta e indiretamente nas atividades realizadas: Muito obrigada! O conhecimento absorvido pelo convívio com vocês é maior do que qualquer título!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) por meio da bolsa de doutorado concedida ao autor.

*“Para hacer las cosas bien es necesario: Primero,
el Amor; Segundo, la Técnica”*

Ant. Gaudí

RESUMO

BET, J.A. **Diagnose do estado nutricional de nitrogênio, potássio e cálcio em *Urochloa brizantha* cv. Marandu utilizando-se técnicas de machine learning.** Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2021.

As concentrações de nutrientes no tecido vegetal têm estreita relação com a produção das plantas forrageiras, que manifestam desordens nutricionais através de um padrão simétrico. Em *Urochloa brizantha* cv. Marandu diagnosticar deficiências através de análise de imagens, baseadas na manifestação de sintomas visuais, e determinar a relação do estado nutricional com as características produtivas resultará em informações práticas sobre aspectos relativos a nutrição e produção da forrageiras bem como estratégias de manejo inovadoras para uso no campo. Esta pesquisa foi desenvolvida com o objetivo de avaliar a influência dos macronutrientes nitrogênio (N), potássio (K) e cálcio (Ca) sobre a composição química, crescimento e determinação da eficiência da análise de imagens no diagnóstico do status nutricional para N, K e Ca. A *Urochloa brizantha* cv. Marandu foi cultivada em casa de vegetação sob cultivo hidropônico. Os tratamentos foram as seguintes concentrações de cada nutriente na solução nutritiva: 6%, 20%, 100% e 200%. As avaliações foram realizadas durante 3 ciclos de crescimento. Ao final de cada ciclo foram determinados os seguintes parâmetros da cultura: altura, índice de vegetação (NDVI), índice SPAD, massa seca da parte aérea e número e tipo de perfilhos (aéreos ou basais). Em cada ciclo, as folhas diagnósticas (folha +1 e folha +2) foram escaneadas, avaliadas através de imagens para os macronutrientes estudados e quimicamente para macro e micronutrientes bem como clorofila através de SPAD. Foram calculados os níveis críticos dos nutrientes. Ao final da pesquisa foram realizadas as avaliações de desenvolvimento de raízes e determinados os teores de nutrientes nas mesmas. Conclui-se que a disponibilidade de N, K e Ca na solução nutritiva afeta a absorção de nutrientes no capim marandu, sendo possível quantificar um padrão de remoção de nutrientes. É possível detectar o estado nutricional de N, Ca e K em capim-marandu usando técnicas de classificação de aprendizado de máquina a partir de imagens RGB, com diferença de desempenho entre as metodologias e métodos utilizados.

Palavras chave: Adubação de pastagens, aprendizado de máquina, índices espectrais, nutrição de plantas, RGB

ABSTRACT

BET, J.A. **Detecting nitrogen, potassium and calcium nutritional status in *Urochloa brizantha* cv. Marandu using machine learning techniques.** Faculty of Animal Science and Food Engineering, University of São Paulo, Pirassununga, 2021.

Nutrient concentrations in plant tissue are closely related to the production of forage plants, which manifest nutritional disorders through a symmetrical pattern. In *Urochloa brizantha* cv. Marandu, diagnosing deficiencies through image analysis, based on the manifestation of visual symptoms, and determining the relationship of nutritional status with productive characteristics will result in practical information on aspects related to forage nutrition and production as well as innovative management strategies for use in the field. This research was developed with the objective of evaluating the influence of the macronutrients nitrogen (N), potassium (K) and calcium (Ca) on the chemical composition, growth and determination of the efficiency of image analysis in the diagnosis of nutritional status for N, K and Ca. *Urochloa brizantha* cv. Marandu was cultivated in a greenhouse under hydroponic cultivation. The treatments were the following concentrations of each nutrient in the nutrient solution: 6%, 20%, 100% and 200%. Evaluations were carried out during 3 growth cycles. At the end of each cycle, the following crop parameters were determined: height, vegetation index (NDVI), SPAD index, shoot dry mass and number and type of tillers (aerial or basal). In each cycle, the diagnostic sheets (leaf +1 and leaf +2) were scanned, evaluated through images for the studied macronutrients and chemically for macro and micronutrients as well as chlorophyll through SPAD. Critical nutrient levels were calculated. At the end of the research, root development evaluations were carried out and nutrient content was determined. It is concluded that the availability of N, K and Ca in the nutrient solution affects nutrient uptake in marandu grass, making it possible to quantify a nutrient removal pattern. It is possible to detect the nutritional status of N, Ca and K in marandu grass using machine learning classification techniques from RGB images, with a difference in performance between the methodologies and methods used.

Keywords: Pasture fertilization, spectral indices, artificial intelligence, plant nutrition, RGB

SUMÁRIO

1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	10
1.1	HIPÓTESES.....	15
1.2	OBJETIVO.....	15
1.2.1	OBJETIVO GERAL	15
1.3	REFERÊNCIAS	16
2.	COMPOSIÇÃO E RELAÇÃO ENTRE NUTRIENTES EM <i>UROCHLOA BRIZANTHA</i> CV MARANDU SUBMETIDA A NÍVEIS DE NITROGÊNIO, POTÁSSIO E CÁLCIO.....	19
	RESUMO.....	19
	ABSTRACT.....	20
1.4	INTRODUÇÃO	21
1.5	MATERIAL E MÉTODOS	25
1.6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
1.7	CONCLUSÃO	86
1.8	REFERÊNCIAS	87
3.	DIAGNOSE DO ESTADO NUTRICIONAL DE NITROGÊNIO, POTÁSSIO E CÁLCIO EM <i>UROCHLOA BRIZANTHA</i> CV. MARANDU UTILIZANDO-SE TÉCNICAS DE MACHINE LEARNING	96
	RESUMO.....	96
1.9	INTRODUÇÃO	98
1.10	MATERIAL A MÉTODOS	100
1.11	RESULTADOS E DISCUSSÃO	111
1.12	CONCLUSÃO	166
2	ANEXOS.....	172

1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A produção pecuária brasileira se fundamenta em pastagens de gramíneas. No país a estimativa de estabelecimentos agropecuários com bovinos que contém área de pastagem é de 2.359.986, correspondendo a 92% das propriedades (IBGE, 2017). A relevância agronômica de capins do gênero *Urochloa* é incontestável no panorama da produção animal nos trópicos, sendo largamente utilizados em pastagens na América Tropical e, tem-se firmado, dentre as diversas opções de gramíneas forrageiras tropicais, para a formação de pastagens no Brasil, devido sua capacidade de adaptação às diversas condições ambientais e de manejo da pastagem (MONTEIRO et al., 1995). A *Urochloa brizantha* cv. Marandu (Syn. *Brachiaria brizantha* cv. Marandu) é uma gramínea nativa da África, adaptando-se bem em solos de média fertilidade (CRISPIM; BRANCO, 2002). Dentre algumas características morfológicas identifica-se o hábito de crescimento cespitoso, robustez, altura de até 1,5 m, lâmina foliar linear-lanceolada, eixo da inflorescência pubescente e raque de ramos estreita. Algumas das características edafoclimáticas e agronômicas da espécie são a alta resposta à aplicação de fertilizantes, alta habilidade de cobertura do solo, boa qualidade da forrageira e alta produção de raízes e de sementes (VALLE et al., 2010).

Para que seu potencial genético produtivo seja alcançado, são necessárias condições adequadas do meio e do manejo. Os nutrientes minerais possuem funções vitais e específicas no metabolismo das plantas, logo, para externar seu potencial produtivo, as plantas dependem de adequada nutrição mineral devendo-se, portanto, fornecer os nutrientes em quantidades adequadas e proporções equilibradas para atender as necessidades metabólicas e promover o melhor desenvolvimento. É fundamental compreender a necessidade dos nutrientes requeridos pelas plantas forrageiras, por conseguinte, sua capacidade de extraí-los, para apropriado fornecimento (LUZ et al., 2004; MALAVOLTA, 2006). Nas regiões tropicais, a baixa disponibilidade de nutrientes é, seguramente, um dos fatores que mais interferem na produtividade e qualidade da forrageira. O fornecimento de nutrientes em quantidades e proporções adequadas adquire importância substancial no processo produtivo de pastagens, de modo que estas possam manter altas produtividades e constituir alimento de qualidade (FAGUNDES et al., 2006; PRIMAVERESI et al., 2006).

Grande parte dos solos nos quais têm-se pastagens no Brasil são de baixa fertilidade, não fornecendo de maneira equilibrada os nutrientes minerais essenciais ao desenvolvimento da planta forrageira. As interações nutricionais interferem na composição mineral da planta,

podendo um elemento estimular ou inibir a absorção de outros elementos (MENGEL; KIRKBY, 2001). Suprir os nutrientes é primordial na nutrição destas plantas, considerando-se que a disponibilidade destes intervém na qualidade da pastagem, por conseguinte, na produção e na recuperação da forrageira (COSTA et al., 2009). Após a água, o nitrogênio (N) é considerado o fator mais importante na produção de biomassa nos ecossistemas naturais e nos agroecossistemas, é constituinte de vários compostos, destacando-se os aminoácidos, ácidos nucleicos e clorofila, assim, as principais reações bioquímicas nas plantas envolvem a presença do elemento. Atua ainda em diversos processos metabólicos, fazendo parte da constituição de hormônios e interferindo diretamente no processo fotossintético (CANTARELLA, 2007; LEMAIRE; GASTAL, 1997; TAIZ et al., 2017) Comprovadamente, é o elemento mineral mais importante para a produção da pastagem. Segundo PARIZ et al., 2011 a adubação nitrogenada eleva a produtividade de matéria seca e melhora a composição bromatológica do capim Marandu, promovendo aumento do índice de clorofila foliar, dos teores de proteína bruta e nutrientes digestíveis totais, além de reduzir os teores de fibra em detergente neutro e ácido.

O suprimento de N interfere em todo o ciclo da forragem. A adubação nitrogenada influencia positivamente à altura das plantas, aumenta a produção de forragem e tem efeito positivo sobre as características estruturais e produtivas, e, conseqüentemente, sobre a recuperação da pastagem de capim-marandu. (CARDOSO et al., 2015; CARVALHO et al., 2017; SILVA et al., 2013). Segundo ALEXANDRINO; VAZ; DOS SANTOS, 2010 a adubação nitrogenada contribui na velocidade do estabelecimento do capim marandu, exercendo efeito positivo no número de perfilhos e de folhas vivas, nas taxas de alongamento e aparecimento foliar, bem como no comprimento final das lâminas foliares. A provisão de N altera positivamente as proporções de Ca e de Mg e negativamente a proporção de potássio (K) na parte aérea (BATISTA; MONTEIRO, 2010). Dentre os três macronutrientes primários, o K ocupa o segundo lugar em nível de exigência total pelas plantas, logo após o N. Em geral, as gramíneas forrageiras são exigentes em K. Na maioria dos sistemas de produção de forragem, a exigência pela planta está diretamente relacionada ao nível de produção, a qual é determinada primariamente pelo suprimento de N no sistema. Assim, a resposta da cultura à adubação potássica deve ser relacionada com a produção, a qual é influenciada pelas doses de N.

A extração de K é grande em capim-marandu com produções elevadas de forragem (PRIMAVESI et al., 2006). O elemento, presente nas plantas como o cátion K^+ , é de grande importância para a manutenção e recuperação da produtividade da pastagem, tendo como ação principal a participação no metabolismo vegetal, principalmente na translocação de

carboidratos, fotossíntese, ativação enzimática, síntese de proteína e manutenção da temperatura da planta. É requerido como cofator de mais de 40 enzimas. (TAIZ et al., 2017) Segundo COLDEBELLO et al., 2013 a adubação com K proporciona maior produção de matéria seca em capim-marandu, independente de dose e fonte. Trabalhando com K, em solução nutritiva MATTOS; MONTEIRO, 1998 também constataram aumento no rendimento de matéria seca, além de alterações no perfilhamento, e aumento na concentração do elemento em folhas e nos colmos mais bainhas em função do aumento da dose. MEGDA; MONTEIRO, 2010 verificaram que o K, bem como o N, influencia as características morfogênicas do capim, que são determinantes para a produção de massa seca da gramínea.

São encontradas poucas referências a respeito de cálcio em pastagens, estando sempre o fornecimento deste nutriente correlacionado a correção da acidez do solo através de calagem. Entretanto, estudos demonstram que para o capim-braquiária, o suprimento com cálcio e magnésio parece ser mais importante do que a correção de pH em sistema intensivo de produção (PRIMAVESI et al., 2004). LOPES, 1975 também sugere que o nível crítico de saturação a calagem seja mais em razão das necessidades das plantas em Ca e Mg como nutrientes, para B. decumbens. O cálcio apresenta grande importância no desenvolvimento das raízes, na formação da estrutura da planta e, também, no metabolismo do nitrogênio (WERNER, 1994). Tem efeito no crescimento e desenvolvimento da planta, apresentando baixa concentração no citosol, quando comparada com a do vacúolo e de outras organelas (MALAVOLTA, VITTI, OLIVEIRA, 1997).

Estudos relacionados a composição mineral de plantas forrageiras tem grande importância para a interpretação de análise foliar, objetivando-se orientar os níveis de adubação e possíveis interações na absorção, translocação ou metabolismo desses nutrientes nas plantas (CORSI; SILVA, 1994). Referências acerca do desenvolvimento da parte aérea e raízes, da concentração de nutrientes e são primordiais para o desenvolvimento de estratégias para garantir nutrição adequada a forrageira e ao animal em pastejo, concomitantemente. Sem dúvida, o nível de fertilidade do solo tem papel importante na produtividade das forrageiras. Normalmente, ao longo do ciclo há estreita relação entre o crescimento e concentração de nutrientes na planta. Tal fato ocorre por haver relação positiva e significativa entre as taxas de crescimento relativo e de absorção relativa de nutrientes. Segundo HODGSON, 1990 no ambiente pastoril, a altura do pasto é uma das medidas que fornecem melhor estimativa da produção de forragem e desempenho animal em pastagem. O crescimento pode ser expresso em termos lineares, em que se mede o aumento em altura, ou

ponderal, quando se mede o acúmulo de matéria seca, representando ganhos reais de substância orgânica (GOMIDE, 1994). O acúmulo líquido de forragem engloba o crescimento de toda a parte verde da planta, desconsiderando-se o acúmulo de material senescente (HODGSON, 1990) O reconhecimento visual de uma deficiência nutricional é tido um recurso acessível e substancial na nutrição de plantas (BERGMANN, 1992). A premissa da diagnose visual como método de avaliação do estado nutricional baseia-se no princípio de que a falta ou excesso de um dado elemento provoca sempre a mesma manifestação visível de anormalidade qualquer que seja a espécie considerada, visto que as funções exercidas são as mesmas, apresentando papéis-chave na vida da planta (MALAVOLTA, 1980) (*Figura 1*)

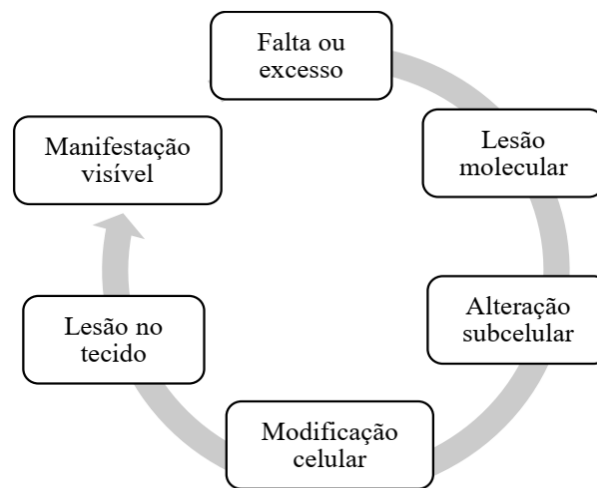


Figura 1. Sequência de eventos que conduzem a anormalidade visível. Adaptado de (MALAVOLTA, 1980).

O motivo pelo qual analisam-se as folhas quimicamente para fins de diagnóstico são conhecidos: elas são os órgãos que como regra geral refletem melhor o estado nutricional, isto é, respondem mais as variações no suprimento dos elementos (MALAVOLTA, VITTI, OLIVEIRA, 1997). A análise da absorção, transmissão e reflexão de radiação pela vegetação que compõem o comportamento espectral da vegetação dependerá dos fatores químicos (pigmentos, fotossíntese e água) e estrutura (tecidos) (PONZONI, SHIMABUKURO; 2007).

Acredita-se que a avaliação do estado nutricional através da análise de imagens irá auxiliar na avaliação do estado nutricional da *Urochloa brizantha* cv Marandu, possibilitando identificar a necessidade de aplicação dos nutrientes e a dose a ser aplicada, fornecendo informações fundamentadas utilizando uma ferramenta não explorada no campo de nutrição de plantas forrageiras. A análise de imagens para identificação de deficiências nutricionais em folhas diagnóstico vai ao encontro com a necessidade de se estimar instantaneamente, no

próprio campo, de maneira não destrutiva, o estado nutricional das plantas permitindo a avaliação rápida das plantas em área maior do que a realisticamente possível com a determinação em laboratório.

MOTTA, 2016 em estudo com capim-marandu, em solução nutritiva, verificou possibilidade de reconhecimento do estado nutricional para fósforo, enxofre e magnésio, trabalhando com índices espectrais obtidos em imagens coloridas de folhas diagnóstico digitalizadas por meio de um scanner. Em estudo com nitrogênio em braquiária para avaliação do estado nutricional SILVA JUNIOR et al., 2013 utilizaram bandas do visível e do infravermelho para obtenção de índices de vegetação. Segundo os autores, os índices formados com a banda verde foram os mais eficientes na identificação do estado nutricional da cultura. O teor foliar de N, matéria seca e índice SPAD se correlacionaram de melhor forma com o índice de vegetação da diferença de verde normalizado (GNDVI). ROMUALDO, 2013 verificou que a omissão dos nutrientes N e K proporcionou deficiências nutricionais características nas folhas de milho cultivados em casa de vegetação o que permitiu a utilização de um sistema de visão artificial para diagnose de estado nutricional. Silva, 2015 em estudo com híbridos de milho constatou que os sintomas de deficiência ou de excesso de N ou K podem ser identificados através de metodologias de análises de imagens, e que os melhores métodos de extração de características baseados em índices espectrais apresentaram classificações consideradas boas ou muito boas.

BAESSO et al., 2007 utilizaram índices espectrais do visível como descritores do estado nutricional do feijoeiro para o nutriente nitrogênio e verificaram que a utilização destes índices, quando associados, nas referidas bandas, possibilitaram a identificação do estado nutricional para este elemento, alcançando índice Kappa de até 0,96, sendo considerado como excelente. SILVA, 2011 conclui que a omissão de cálcio na solução nutritiva promove sintomas típicos de deficiência deste nutriente em plantas de milho e que o sistema de visão artificial identifica as imagens das folhas de plantas de milho no estágio V4 submetidas a omissão completa de cálcio e a dose completa com 100% de acerto. SILVA, 2015 trabalhando com milho em condições de campo e casa de vegetação verificou que os sintomas de deficiência ou de excesso de N ou K podem ser identificados pelas metodologias de análise de imagens digitais através da análise de padrões de textura ou índices espectrais. Os métodos de extração de características baseados em textura de imagem apresentaram melhor desempenho de classificação do que os métodos baseados em índices espectrais. Os melhores métodos de

extração de características baseados em índices espectrais apresentaram classificações consideradas boas ou muito boas.

Visando gerar novas tecnologias para o manejo nutricional das pastagens, o estudo da análise de imagens para identificação de deficiências nutricionais em forrageiras poderá ser uma ferramenta de manejo que vai ao encontro com a necessidade de se estimar instantaneamente, no próprio campo, de maneira não destrutiva, o estado nutricional das plantas permitindo a rápida avaliação das mesmas em área maior do que a realisticamente possível com a determinação em laboratório.

1.1 HIPÓTESES

A disponibilidade dos nutrientes N, K e Ca altera as características químicas da forragem sendo que a deficiência ou quantidades excessivas de nutrientes podem interferir na absorção de outros elementos.

É possível avaliar o estado nutricional da *Urochloa brizantha* cv Marandu para nitrogênio, potássio e cálcio através da análise de imagens de folhas diagnóstico.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a influência dos macronutrientes nitrogênio, potássio e cálcio sobre parâmetros produtivos, composição química, e a eficiência da análise de imagens para identificação do estado nutricional para estes elementos.

1.2.2 Objetivos específicos

Verificar a relação entre a disponibilidade de N, K e Ca na solução nutritiva e a absorção de nutrientes.

Avaliar a eficácia da utilização da análise de imagens na identificação do estado nutricional da forragem produzida.

1.3 REFERÊNCIAS

- ALEXANDRINO, E.; VAZ, R. G. M. V.; DOS SANTOS, A. C. Características da brachiaria brizantha CV. marandu durante o seu estabelecimento submetida a diferentes doses de nitrogênio. **Bioscience Journal**, v. 26, n. 6, p. 886–893, 2010.
- BAESSO, M. M. et al. Determinação do “status” nutricional de nitrogênio no feijoeiro utilizando imagens digitais coloridas. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 2, p. 520–528, 2007.
- BATISTA, K.; MONTEIRO, F. A. Variações nos teores de potássio, cálcio e magnésio em capim-marandu adubado com doses de nitrogênio e de enxofre. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 151–161, 2010.
- BERGMANN, W. (ED.): Nutritional disorders of plants. **Gustav fischer verlag**, 1992
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds.). . **Fertilidade do solo**. 1. ed. [s.l: s.n.]. p. 1017. 2007
- CARDOSO, J. M. S. et al. **Fontes e doses de nitrogênio na produtividade do capim-Marandu**. v. 9, n. 8, p. 348–358, 2015.
- CARVALHO, R. M. et al. Acúmulo de forragem e estrutura do dossel de capim-marandu diferido e adubado com nitrogenio. **Boletim da Indústria Animal**, v. 74, n. 1, p. 1–8, 2017.
- COLDEBELLO, J. D. et al. **Utilização de fonolito como fonte de potássio em área de pastagem**. II Congresso Brasileiro de Rochagem. **Anais...Poços de Caldas**: 2013
- CORSI, M.; SILVA, R.T de L. Fatores que afetam a composição mineral de plantas forrageiras. In: PASTAGENS: FUNDAMENTOS DA EXPLORAÇÃO RACIONAL. 2a ed. Piracicaba, FEALQ/ESALQ, p.65-83, 1994.
- COSTA, K. A. DE P. et al. Doses E Fontes De Nitrogênio Na Nutrição Mineral Do. **Ciência Animal Brasileira**, v. 10, n. 1, p. 115–123, 2009.
- CRISPIM, S. M. A.; BRANCO, O. D. **Aspectos Gerais das Braquiárias e suas Características na Sub- Região da Nhecolândia, Pantanal, MS**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.cpap.embrapa.br>. Acesso em: 16 jan. 2020.
- FAGUNDES, J. L. et al. Avaliação das características estruturais do capim-braquiária em pastagens adubadas com nitrogênio nas quatro estações do ano. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 35, n. 1, p. 30–37, 2006.

HODGSON, J. **Grazing management: Science into practice**. [s.l.] Longman Scientific & Technical, 1990.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agropecuário**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 15 jan. 2019.

LEMAIRE, G.; GASTAL, F. N Uptake and Distribution in Plant Canopies. In: LEMAIER, G. (Ed.). . **Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops**. [s.l.] Springer, 1997. p. 3–44.

LOPES, A. S. **A survey of the fertility status of soils under “Cerrado” vegetation in Brasil**. [s.l.] North Carolina State University, 1975.

LUZ, P. H. C. et al. **Uso da calagem na recuperação e na manutenção da produtividade das pastagens**. (C. G. S. Pedreira, J. C. de Moura, V. P. de Faria, Eds.)21º Simpósio sobre Manejo de Pastagem. **Anais...**Piracicaba: FEALQ, 2004

MALAVOLTA, E. **Elementos da nutrição mineral de plantas**. 1. ed. Piracicaba: Agroômica Ceres, 1980.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda, 2006.

MATTOS, W. T. DE; MONTEIRO, F. A. Respostas de braquiária brizantha a doses de potássio. **Scientia Agricola**, v. 55, n. 3, p. 428–437, 1998.

MEGDA, M. M.; MONTEIRO, F. A. **Revista Brasileira de Zootecnia** Nitrogen and potassium supply and the morphogenic and productive characteristics of marandu palisadegrass. 2010.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: **Potafós**, 1989. 201p

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of Plant Nutrition** (K. Mengel et al., Eds.)NetherlandsSpringer, , 2001.

MONTEIRO, F. A. et al. Cultivo de Brachiaria brizantha Stapf. cv. Marandu em solução nutritiva com omissões de macronutrientes. **Scientia Agricola**, v. 52, n. 1, p. 135–141, 1995.

MOTTA, T. P. **Índices espectrais de imagens coloridas na avaliação do estado nutricional de fósforo, enxofre e magnésio no capim-marandu**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2016.

PARIZ, C. M. et al. Produção, composição bromatológica e índice de clorofila de braquiárias

após o consórcio com milho. **Arch. Zootec**, v. 60, n. 232, p. 1041–1052, 2011.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. Sensoriamento remoto no estudo da vegetação. São José dos Campos: **INPE**, 2007. 127 p.

PRIMAVESI, A. C. et al. Nutrientes na fitomassa de capim–marandu em função de fontes e doses de nitrogênio. **Ciência Agrotecnológica**, v. 30, p. 562–568, 2006.

PRIMAVESI, O. et al. Calagem em pastagem de *Brachiaria decumbens* recuperada com adubação nitrogenada em cobertura. **Circular Técnica EMBRAPA**, v. 37, n. 37, p. 1–32, 2004.

ROMUALDO, L. M. **Utilização da visão artificial para diagnóstico nutricional de nitrogênio, fósforo, potássio e manganês em milho**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2013.

SILVA, D. R. G. et al. Doses e fontes de nitrogênio na recuperação das características estruturais e produtivas do capim-marandu. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 1, p. 184–191, 2013.

SILVA, F. DE F. **Sistema de visão artificial para a identificação da nutrição de milho submetido a níveis de cálcio, magnésio e enxofre**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2011.

SILVA, F. DE F. **Reconhecimento de padrões de nutrição para nitrogênio e potássio em híbridos de milho por análise de imagens digitais**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2015.

SILVA JUNIOR, M. C. et al. Using an aerial system of remote sensing to detect different nutritional status *Brachiaria decumbens*. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 5, p. 1049–1062, 2013.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. v. 6 ed.

VALLE, C. B. et al. Gênero *Brachiaria*. In: FONSECA, D. M. DA; MARTUSCELLO, J. A. (Eds.). **Plantas Forrageiras**. 1. ed. Viçosa: UFV, 2010. v. 1p. 537.

WERNER, J. . Adubação de pastagens de *Brachiaria* spp. In: **Simpósio sobre manejo de pastagens**. Anais ed. Piracicaba: [s.n.]. p. 209–223.

2. COMPOSIÇÃO E RELAÇÃO ENTRE NUTRIENTES EM *UROCHLOA BRIZANTHA* CV MARANDU SUBMETIDA A NÍVEIS DE NITROGÊNIO, POTÁSSIO E CÁLCIO

RESUMO

A produtividade das pastagens é frequentemente resultado do manejo e fertilização do pasto, independentemente do status inicial de fertilidade do solo. A adubação e as consequentes interações iônicas refletem na composição mineral das plantas e a disponibilidade de nutrientes no meio exerce grande influência na produção das gramíneas visto que o equilíbrio entre os íons no sistema solo-planta é um fator limitante. Ainda são necessários estudos para entender a complexidade da relação entre os minerais no sistema solo-planta identificar informações no tocante a extração e o acúmulo de nutrientes no capim Marandu. Esta pesquisa objetivou avaliar a quantidade e a proporção de nutrientes removidos pelo capim marandu. Para cada nutriente estudado (N, K e Ca), foram utilizados 4 doses de nutrientes em sistema de hidroponia: D1= 6% da dose completa do nutriente; D2= 20% da dose completa; D3= 100% (dose completa) e D4= 200% da dose completa (dose excedente), com 3 (quatro) repetições. As avaliações foram realizadas durante 3 ciclos de crescimento. Para a definição dos teores dos nutrientes presentes no tecido vegetal as amostras das lâminas foliares +1 e +2 passaram por decomposição via úmida com ácido nítrico e ácido perclórico para determinação dos elementos minerais. Após o final dos 3 ciclos de crescimento, foram realizadas as determinações dos nutrientes nas raízes das plantas. Conclue-se que a disponibilidade de N, K e Ca na solução nutritiva afeta a absorção de nutrientes no capim marandu, sendo possível quantificar um padrão de remoção de nutrientes. A proporção de macro e micronutrientes na parte aérea e nas raízes é afetada em função da fertilidade na qual as plantas são cultivadas, com alterações entre as relações entre os elementos.

Palavras chave: adubação, composição mineral de plantas, nível crítico,

COMPOSITION AND RELATIONSHIP BETWEEN NUTRIENTS IN *UROCHLOA BRIZANTHA* CV MARANDU CULTIVATED IN NITROGEN, POTASSIUM AND CALCIUM LEVELS

ABSTRACT

Pasture productivity is often a result of pasture management and fertilization, regardless of the initial soil fertility status. Fertilization and the consequent ionic interactions reflect on the mineral composition of plants and the availability of nutrients in the medium exerts a great influence on the production of grasses, since the balance between ions in the soil-plant system is a limiting factor. Studies are still needed to understand the complexity of the relationship between minerals in the soil-plant system and identify information regarding the extraction and accumulation of nutrients in Marandu grass. This research aimed to evaluate the amount and proportion of nutrients removed by marandu grass. For each studied nutrient (N, K and Ca), 4 nutrient doses were used in a hydroponics system: D1= 6% of the complete nutrient dose; D2= 20% of the full dose; D3= 100% (full dose) and D4= 200% of the full dose (excess dose), with 3 (four) repetitions. Evaluations were carried out during 3 growth cycles. To define the levels of nutrients, present in the plant tissue, samples from leaf blades +1 and +2 underwent wet decomposition with nitric acid and perchloric acid to determine the mineral elements. After the end of the 3 growth cycles, determinations of nutrients in the roots of the plants were carried out. It is concluded that the availability of N, K and Ca in the nutrient solution affects nutrient uptake in marandu grass, making it possible to quantify a nutrient removal pattern. The proportion of macro and micronutrients in shoots and roots is affected by the fertility in which plants are cultivated, with alterations between the relationships between the elements.

Keywords: critical level, fertilizing, plant mineral composition

1.4 INTRODUÇÃO

O potencial de produtivo das espécies são determinados geneticamente, todavia, para que este potencial seja expressado, condições adequadas do meio e do manejo devem ser observadas. O equilíbrio entre os íons no sistema solo-planta é um fator do meio limitante à produção: para que as espécies se desenvolvam e produzam os elementos minerais essenciais devem se encontrar em concentrações adequadas. As interações entre os elementos minerais afetam a composição elementar das plantas, refletindo nos mecanismos de assimilação, transporte e redistribuição bem como no metabolismo das espécies, podendo produzir desordens nutricionais visto que deficiências ou quantidades excessivas de um elemento podem induzir deficiências ou acúmulos excessivos de outro elemento (TAIZ et al., 2017).

A produtividade das pastagens é frequentemente uma função do manejo e fertilização do pasto, independentemente do status inicial de fertilidade do solo (TEITZEL; WILSON, 1991). Trabalhos com a finalidade de se analisar a relação do fornecimento de nutrientes sobre teor de outros com o propósito de determinar o manejo nutricional adequado para as forrageiras têm sido realizados (MEGDA; MONTEIRO, 2015; PINHO et al., 2009; ROWE; FAIRBROTHER, 2003; SILVA et al., 2011; TELES et al., 2011).

O princípio das pesquisas com plantas forrageiras e pastagens, em países com sistemas de criação de animais, data do início dos anos 1900 (DA SILVA; SBRISIA; PEREIRA, 2015) desde então, muitos trabalhos demonstrando a importância do suprimento mineral com nitrogênio são constantemente realizados (ABREU; MONTEIRO, 1999; BÉLANGER; GASTAL, 2000; COSTA et al., 2019, 2009; GASTAL; LEMAIRE, 2002; LORETO et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2014; SILVA et al., 2013) ainda assim, por ser o nutriente cuja função é estimular o crescimento vegetativo das plantas, as principais pesquisas envolvendo este elemento em forrageiras dizem respeito a aspectos morfológicos e fisiológicos (ALVES et al., 2019; BRAMBILLA et al., 2012; DUPAS et al., 2016; PAIVA et al., 2015; PEREIRA et al., 2015).

O nitrogênio é substancial para crescimento e desenvolvimento das plantas forrageiras, controlando praticamente todos os processos biológicos. No sistema de produção pecuário é fundamental para garantir a manutenção das pastagens produtivas, tratando-se de um dos elementos que mais impacta na produção das pastagens. A fertilização com nitrogênio pode melhorar muito a produtividade das plantas (DURAN et al., 2016). Por via de regra, as espécies forrageiras expressam elevado potencial de produção em resposta a adubação com nitrogênio, porém a máxima eficiência da fertilização nitrogenada depende do equilíbrio entre os

nutrientes. Segundo (LEE et al., 2017) a adubação nitrogenada promove maior assimilação de nutrientes.

O entendimento das relações iônicas nesta planta forrageira em diferentes condições de disponibilidade de nitrogênio, o nutriente mais utilizado nas pastagens, é importante pois a alta produtividade e persistência das espécies forrageiras depende, além de outros fatores, da proporção entre os íons no tecido vegetal. A complexidade da relação entre os minerais no sistema solo-planta fez com que nos últimos anos fossem produzidas pesquisas que contribuíssem com diferentes aspectos no que se refere a fertilização do capim-marandu. Ensaios conduzidos com o cultivo da forrageira em solução nutritiva permitiram identificar informações no tocante a extração e o acúmulo de nutrientes. (MONTEIRO et al., 1995) em estudo envolvendo deficiências dos macronutrientes em solução nutritiva verificaram que omissões de nitrogênio e fósforo limitaram o desenvolvimento das plantas, refletindo na redução do número de perfilhos, altura das plantas e conseqüentemente, na produção de matéria seca, tanto na parte aérea como nas raízes. Em condições de deficiência de nitrogênio as plantas alocaram maior parte da produção de biomassa para o sistema radicular.

O potássio é o cátion mais abundante nas plantas, sendo um forte competidor com outros cátions por causa da alta eficiência do sistema de absorção das plantas (FAQUIN, 2005). Há evidências de que o potássio funcione como co-fator para uma variedade de enzimas envolvidas em processos metabólicos e, embora isso possa explicar em parte seus níveis geralmente altos nas plantas, também é verdade que este é um elemento que é frequentemente absorvido em quantidades de luxo. No cenário atual de desenvolvimento e crescimento da população mundial é essencial aumentar a eficiência do uso dos nutrientes nos sistemas de produção. Considerando-se que a maior parte das pastagens em território nacional é formada por gramíneas do gênero braquiária e sabendo-se a que o potássio interage com quase todos os macros e micronutrientes, melhorias futuras no rendimento e na qualidade de forrageiras requerem uma melhor compreensão e gerenciamento dessas interações na concepção de sistemas de fertilização eficientes.

Um experimento conduzido em casa-de-vegetação utilizando-se solução nutritiva demonstrou que o incremento nas doses de potássio na solução provocou um aumento no rendimento de matéria seca da parte aérea da planta e das raízes e o perfilhamento das plantas foi alterado pelo suprimento de potássio na solução. Os resultados obtidos permitiram aos autores concluir que há uma maior exigência nesse elemento pelo capim marandu, em relação a outras culturas (MATTOS; MONTEIRO, 1998).

Via de regra, a aplicação de um nutriente promove o crescimento da planta e aumenta o teor deste e, em caso de sinergismo ou antagonismo, altera o teor de outros nutrientes. Pesquisas demonstram que a adição de potássio aumenta as concentrações de K na planta e diminui as concentrações de Ca e Mg em termos de quantidades equivalentes. Em artigo que apresenta os resultados de um trabalho avaliando o efeito de níveis de adubação potássica sobre o rendimento e composição das gramíneas braquiária, napier, guiné e pangola demonstra-se que o teor dos nutrientes Ca, Mg e P e de proteína das gramíneas diminuiu com o aumento das taxas de K, provavelmente em grande parte devido ao efeito de diluição de rendimentos na presença de uma quantidade limitada mais ou menos constante de esses nutrientes no solo. A conhecida interferência dos íons K na absorção de íons Mg foram provavelmente responsáveis por a diminuição geralmente acentuada no conteúdo deste último (VICENTE-CHANDLER et al., 1962).

A disponibilidade e a proporção entre potássio e o nitrogênio no solo são correlacionadas ao crescimento e desenvolvimento das culturas. BATISTA; MONTEIRO, 2010 com o objetivo de analisar as alterações nos teores de potássio, cálcio e magnésio em Marandu em função de doses de nitrogênio e enxofre conduziram um experimento no qual verificaram que a adubação nitrogenada interferiu nas proporções de K, Ca e Mg na parte aérea e que aplicações conjuntas de nitrogênio e enxofre influenciaram negativamente o teor de K nas folhas diagnósticas, concluem também que a aplicação de N e de S no solo no momento da implantação do capim-marandu alterou o balanço nutricional em Ca, Mg e K. A relação potássio x nitrogênio foi estudada por Primavesi et al., 2006 que observaram que os teores de K na matéria seca das forrageiras variam com a disponibilidade do nutriente no solo e que os teores de K aumentaram em função das doses de N. Neste trabalho houve extração maior de K em relação ao N pela forrageira, mesmo em condições sem adubação nitrogenada porém com adubação com K, indicando que o capim-marandu extrai muito K do solo. Concluem que a extração de K é grande no capim com produções elevadas de forragem.

Trabalhos avaliando a relação de potássio com outros nutrientes e aspectos produtivos de parte aérea e de raízes também foram realizados. Em avaliação da relação entre a adubação com K e N COSTA et al., 2008 verificaram efeito linear de produção de matéria seca do capim-xaraés em função das doses de N e K. As maiores doses de adubação nitrogenada e potássica promoveram incremento de 8,6% e 19,2% respectivamente, na produção de matéria seca. Em condições de baixas doses de K, mesmo com o aumento das doses de N, a produção

de MS foi pouco alterada, no entanto, à medida que se elevam as doses de K associada às doses de N, a produção foi incrementada.

O manejo do cálcio em pastagens geralmente é feito através da correção da acidez do solo via calagem. É relatado o efeito do calcário em gramíneas, principalmente como fonte de cálcio e magnésio, melhorando a qualidade da pastagem do ponto de vista nutricional e não somente como corretivo da acidez (ARRUDA, 1982; KLIEMANN et al., 2003; PEREIRA, 1986). Deve-se salientar que a resposta de forrageiras do gênero braquiária à aplicação de calcário depende da saturação por bases inicial do solo e a movimentação de Ca e Mg provenientes da calagem, enriquecendo o perfil do solo, é um fenômeno conhecido, mas sua intensidade é de difícil previsão pois dependente da textura do solo, quantidade de água que se move através do perfil, da dose e granulometria do calcário (PRIMAVESI et al., 2004) portanto é difícil estimar o teor adequado requerido de cálcio para o capim marandu somente em estudos nos quais não se trabalha o nutriente de forma isolada, faz-se necessário conhecer o comportamento da espécie em distintos níveis de disponibilidade de cálcio com a finalidade de estimar seu potencial de utilização em diferentes condições de solo e utilização de fertilizantes.

As necessidades de Ca associadas com 80% da produção máxima para *Brachiaria brizantha* estabelecida experimentalmente, observando-se como requerimentos críticos de solo o valor de 100 kg Ca ha⁻¹ e como requerimentos críticos internos, em g.kg⁻¹ foram obtidos 3,7 e 3,2 analisando-se a época das chuvas e época das secas, respectivamente (CIAT, 1982).

KLIEMANN et al., 2003 verificou as relações entre a produção de massa verde de *B. brizantha* e os teores de nutrientes nos solos permitindo estabelecer os seguintes níveis críticos: 45 mmol_c dm⁻³ de solo para cálcio + magnésio trocáveis. A partir dos resultados expostos, considerando-se a média da relação de Ca:Mg durante o experimento como 1:1, portanto 22,5 mmol_c dm³ Ca e 22,5 mmol_c dm³ de Mg, o nível crítico destes nutrientes no solo seriam de 900 Kg/ha.

Em trabalhos utilizando calcário como fonte de cálcio SIQUEIRA et al., 1980 e PEREIRA, 1986 observaram aumentos na produção de parte aérea de gramíneas. SIQUEIRA et al., 1980 em estudo com *Brachiaria decumbens*, *Brachiaria humidicola* e *Melinis minutiflora* implantadas em solo com alta saturação inicial de alumínio (84%) ao trabalharem com doses de 0, 320, 520 e 1600 Kg de Ca constataram aumento significativo no peso da parte aérea das gramíneas com a utilização do cálcio e concluem com base em experimentos subsequentes que o cálcio e o magnésio são mais limitantes ao crescimento destas gramíneas do que a correção da acidez do solo. Em trabalho comparativo de produção de matéria seca de seis gramíneas em latossolo com aplicação de 0, 200 e 400 kg de Ca por

hectare PEREIRA, 1986 verificou acréscimo de 38% de produção de matéria seca por vaso com a utilização de 400 kg Ca em relação ao controle, sugerindo que baixas doses de calcário são suficientes para que as braquiárias atinjam máximo rendimento.

A pesquisa aqui reportada teve como objetivo avaliar os efeitos da variação de doses de fornecimento de nitrogênio, potássio e cálcio sobre a capacidade de extração e acúmulo de nutrientes, produção de matéria seca da parte aérea e de raízes em *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, cultivada em solução nutritiva.

1.5 MATERIAL E MÉTODOS

1.5.1 Local e metodologia

O estudo foi conduzido em casa de vegetação na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP), Campus de Pirassununga-SP no setor de Ciências Agrárias sob localização 21 57'S e 47 27'N, e 600 metros de altitude. A semeadura da *Urochloa brizantha* cv Marandu foi realizada em bandejas plásticas, utilizando-se como substrato vermiculita expandida farelada, que se manteve irrigada com água deionizada (**Anexo 66**)

Duas semanas após a germinação, de acordo com a uniformidade de desenvolvimento, as plântulas foram transplantadas para os vasos contendo a solução nutritiva diluída a 50% da concentração com o propósito de ambientação das raízes ao meio, evitando a ocorrência de estresse salino. Cada unidade experimental correspondeu a um vaso de polietileno com capacidade para 3,5 L, os quais foram pintados externamente para evitar a entrada de luz e conseqüentemente a proliferação de algas e musgos. Cada vaso continha uma tampa perfurada na qual foram fixadas três plantas envoltas na altura do colo por uma espuma, proporcionando que raízes permanecessem imersas na solução nutritiva.

Para o cultivo em hidroponia as plantas receberam solução nutritiva balanceada para o nível de nutrição a ser avaliado e todos os demais nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas, segundo a solução nutritiva de Hoagland e Arnon (HOAGLAND; ARNON, 1938). Baseando-se nas exigências nutricionais do capim Marandu, foram estudados quatro níveis de concentração do nutriente na solução nutritiva: nível I: 6% da exigência nutricional, nível II: 20% da exigência nutricional, nível III: concentração requerida pela cultura (100%), nível IV: dobro da concentração requerida (200%).

As soluções nutritivas foram aeradas com oxigênio em intervalos de 30 segundos, por um período de 10 segundos. Diariamente o nível da solução no vaso era corrigido com água deionizada, bem como o valor do pH, mantendo-o entre 5,0 e 6,0, através da utilização de HCl

0,1N e NaOH 1N, se porventura se fizesse necessário. A condutividade elétrica da solução foi mensurada após preparo, para certificação que seu valor estivesse menor ou igual a 1,5 mS.cm⁻¹, conforme recomendação de (FURLANI et al., 1999).

Os dados de temperatura foram registrados, durante todos os ciclos de desenvolvimento das plantas, por uma estação meteorológica automática localizada no interior da casa-de-vegetação. Sabe-se que a temperatura ideal para o crescimento da *Brachiaria brizantha* é compreendida entre 30-35°C, e a temperatura mínima é de 15°C (SKERMAN E RIVEROS, 1990). Durante o período experimental, compreendido entre novembro e março, a temperatura média foi de 30,4°C, estando dentro da faixa adequada para o desenvolvimento das plantas, entretanto em 119 dias, ou seja, em 99% do período experimental, a temperatura alcançou valores máximos acima de 35°C. Temperaturas mínimas abaixo de 15°C foram registradas somente em um dia durante todo o período (**Anexo 67**).

As composições das soluções nutritivas serão detalhadas a seguir.

1.5.2 Soluções nutritivas

1.5.2.1 Experimento nitrogênio

Os níveis de fornecimento de nitrogênio foram obtidos por meio da variação da concentração do fertilizante nitrato de amônio (NH₄NO₃) na solução nutritiva (**Tabela 1**).

Tabela 1. Composição química da solução nutritiva utilizada no experimento de nitrogênio.

Sal	Concentração na solução estoque g.L ⁻¹ H ₂ O	Nível de fornecimento de nitrogênio			
		6%	20%	100%	200%
		mL.L ⁻¹ de solução final			
KH ₂ PO ₄	136,09	1,01	1,01	1,01	1,01
MgSO ₄ .7H ₂ O	246,47	2,042	2,042	2,042	2,042
KCl	74,55	5,05	5,05	5,05	5,05
CaCl ₂ .2H ₂ O	147,01	5,05	5,05	5,05	5,05
NH₄NO₃	80,04	0,45	1,58	7,89	15,782
Solução de micros**		5	5	5	5
Solução de Fe EDDHMA**	23,12	5	5	5	5

O sinal “-“ indica a omissão do respectivo fertilizante na composição da solução nutritiva.
 (*) Em 1L: 2,86 g H₃BO₃; 1,81 g MnCl₂.4H₂O; 0,10 g ZnCl₂; 0,04 g CuCl₂; 0,02 H₂MoO₄.H₂O.
 (**) 24,9 g FeSO₄.7H₂O ou 24,25 g de FeCl₂.6H₂O; 33,2 g EDTA-Na; 89 mL NaOH 1N completo em 800 mL H₂O.

O comparativo da concentração dos macros e micronutrientes nas soluções nutritivas experimentais, em função dos níveis de fornecimento de nitrogênio, em relação a solução

proposta por Hoagland & Arnon (1938) demonstram que as variações de N, em mg L⁻¹ de solução, variaram entre 12 e 420 mg L⁻¹ (Tabela 2 e 3).

Tabela 2. Comparativo da concentração dos macronutrientes (mg L⁻¹) na solução nutritiva experimental com a solução proposta por Hoagland & Arnon (1938).

Nutriente	Hoagland & Arnon (1938)	Nível de fornecimento de nitrogênio			
		6%	20%	100%	200%
		mg L ⁻¹			
Nitrogênio	210,0	12,0	42,0	210,0	420,0
Fósforo	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0
Potássio	234,6	234,6	234,6	234,6	234,6
Cálcio	200,4	200,4	200,4	200,4	200,4
Magnésio	48,6	48,6	48,6	48,6	48,6
Enxofre	64,2	64,2	64,2	64,2	64,2

Tabela 3. Comparativo da concentração dos micronutrientes (mg L⁻¹) na solução nutritiva experimental com a solução proposta por Hoagland & Arnon (1938).

Nutriente	Hoagland & Arnon (1938)	Solução experimental	Nutriente	Hoagland & Arnon (1938)	Solução experimental
Boro	0,500	0,500	Manganês	0,502	0,502
Cobre	0,020	0,020	Molibdênio	0,011	0,011
Ferro	5,022	5,021	Zinco	0,050	0,050

1.5.2.2 Experimento potássio

Os níveis de fornecimento de potássio foram obtidos por meio da variação da concentração do sal cloreto de potássio (KCl) na solução nutritiva (Tabela 4).

Tabela 4- Composição química da solução nutritiva utilizada no experimento de potássio

Sal	Concentração na solução estoque	Nível de fornecimento de potássio			
		6%	20%	100%	200%
		mL.L ⁻¹ de solução final			
Ca (NO ₃) ₂ .5H ₂ O	254,16	5,05	5,05	5,05	5,05
MgSO ₄ .7H ₂ O	246,47	2,042	2,042	2,042	2,042
KCl	74,55	0,364	1,212	6,06	12,12
(NH ₄) ₃ PO ₄	115,03	1,02	1,02	1,02	1,02
NH ₄ NO ₃	80,04	4,732	4,732	4,732	4,732
Solução de micros**		5	5	5	5
Solução de Fe EDDHMA**	23,12	5	5	5	5

O sinal “-” indica a omissão do respectivo fertilizante na composição da solução nutritiva. (*) Em 1L: 2,86 g H₃BO₃; 1,81 g MnCl₂.4H₂O; 0,10 g ZnCl₂; 0,04 g CuCl₂; 0,02 H₂MoO₄.H₂O. (**) 24,9 g FeSO₄.7H₂O ou 24,25 g de FeCl₂.6H₂O; 33,2 g EDTA-Na; 89 mL NaOH 1N completo em 800 mL H₂O.

O comparativo da concentração dos macros e micronutrientes nas soluções nutritivas experimentais, em função dos níveis de fornecimento de potássio, em relação a solução

proposta por Hoagland & Arnon (1938) demonstram que a variação de K, em mg L^{-1} de solução, variaram entre 14,1 e 469 mg L^{-1} (Tabela 5 e 6).

Tabela 5- Comparativo da concentração dos macronutrientes (mg L^{-1}) na solução nutritiva experimental com a solução proposta por Hoagland & Arnon (1938)

Nutriente	Hoagland & Arnon (1938)	Nível de fornecimento de potássio			
		6%	20%	100%	200%
mg L^{-1}					
Nitrogênio	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0
Fósforo	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0
Potássio	234,6	14,1	46,9	234,6	469,1
Cálcio	200,4	200,4	200,4	200,4	200,4
Magnésio	48,6	48,6	48,6	48,6	48,6
Enxofre	64,2	64,2	64,2	64,2	64,2

Tabela 6- Comparativo da concentração dos micronutrientes (mg L^{-1}) na solução nutritiva experimental com a solução proposta por Hoagland & Arnon (1938)

Nutriente	Hoagland & Arnon (1938)	Solução experimental	Nutriente	Hoagland & Arnon (1938)	Solução experimental
Boro	0,500	0,500	Manganês	0,502	0,502
Cobre	0,020	0,020	Molibdênio	0,011	0,011
Ferro	5,022	5,021	Zinco	0,050	0,050

1.5.2.3 Experimento Cálcio

Os níveis de fornecimento de cálcio foram obtidos por meio da variação da concentração do sal cloreto de cálcio ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) na solução nutritiva (**Tabela 7**).

Tabela 7- Composição química da solução nutritiva utilizada no experimento de Cálcio

Sal	Concentração na solução estoque $\text{g.L}^{-1} \text{H}_2\text{O}$	Nível de fornecimento de cálcio			
		6%	20%	100%	200%
mL.L^{-1} de solução final					
KH_2PO_4	136,09	1,01	1,01	1,01	1,01
KNO_3	101,11	5,05	5,05	5,05	5,05
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	74,55	2,04	2,04	2,04	2,04
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	115,03	0,307	1,01	5,05	10,10
NH_4NO_3	80,04	5,26	5,26	5,26	5,26
Solução de micros**		5	5	5	5
Solução de Fe EDDHMA**	23,12	5	5	5	5

O sinal “-” indica a omissão do respectivo fertilizante na composição da solução nutritiva. (*) Em 1L: 2,86 g H_3BO_3 ; 1,81 g $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; 0,10 g ZnCl_2 ; 0,04 g CuCl_2 ; 0,02 $\text{H}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$. (**) 24,9 g $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ou 24,25 g de $\text{FeCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; 33,2 g EDTA-Na; 89 mL NaOH 1N completo em 800 mL H_2O .

O comparativo da concentração dos macros e micronutrientes nas soluções nutritivas experimentais, em função dos níveis de fornecimento de potássio, em relação a solução

proposta por Hoagland & Arnon (1938) demonstram que as variações de Ca, em mg L^{-1} de solução, variaram entre 12,0 e 400,8 mg L^{-1} (Tabela 8 e 9).

Tabela 8- Comparativo da concentração dos macronutrientes (mg L^{-1}) na solução nutritiva experimental com a solução proposta por Hoagland & Arnon (1938)

Nutriente	Hoagland & Arnon (1938)	Nível de fornecimento de cálcio			
		6%	20%	100%	200%
mg L^{-1}					
Nitrogênio	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0
Fósforo	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0
Potássio	234,6	234,6	234,6	234,6	234,6
Cálcio	200,4	12,0	40,08	200,4	400,8
Magnésio	48,6	48,6	48,6	48,6	48,6
Enxofre	64,2	64,2	64,2	64,2	64,2

Tabela 9- Comparativo da concentração dos micronutrientes (mg L^{-1}) na solução nutritiva experimental com a solução proposta por Hoagland & Arnon (1938)

Nutriente	Hoagland & Arnon (1938)	Solução experimental	Nutriente	Hoagland & Arnon (1938)	Solução experimental
	mg L^{-1}			mg L^{-1}	
Boro	0,500	0,500	Manganês	0,502	0,502
Cobre	0,020	0,020	Molibdênio	0,011	0,011
Ferro	5,022	5,021	Zinco	0,050	0,050

1.5.3 Determinação dos teores de nutrientes no tecido vegetal

As lâminas foliares F_1 e F_2 , correspondentes as lâminas +1 e +2 foram amostradas, secas em estufa a 65°C e moídas em moinho de facas tipo Willey. Para a definição dos teores dos nutrientes presentes no tecido vegetal as amostras passaram por decomposição via úmida com ácido nítrico e ácido perclórico para determinação dos elementos P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn, Zn. A concentração de P foi determinada por método colorimétrico d amarelo de vanadato, K por meio de espectrometria de emissão atômica, S por meio de turbidimetria, os elementos Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn foram determinados por espectrometria de absorção atômica. O B foi analisado por espectrometria de absorção molecular via azometina h. Monteiro et al. (1995), Monteiro (2005), Manarin e Monteiro (2002), Mattos et al. (2002), entre outros autores, relatam que as lâminas foliares das duas folhas recém-expandidas, as quais são designadas como +1 e +2 (neste trabalho identificadas como F_1 e F_2) refletem adequadamente o estado nutricional dos capins tropicais. Isto posto, utilizou-se dessas lâminas foliares na avaliação nutricional do capim-Marandu nesta pesquisa.

1.5.4 Análise estatística

A análise de variância foi realizada separadamente para cada ciclo de crescimento, e separadamente para a categoria de folhas (F1 e F2) usando o procedimento MIXED no software SAS®, versão 9.3 para Windows®. Os níveis de concentração de nutrientes na solução nutritiva, os ciclos de crescimento e suas interações foram considerados efeitos fixos. O ciclo de crescimento foi considerado uma medida repetida, e a matriz de covariância utilizada para a análise dos componentes de variância. Para todas as variáveis, a correção para os graus de liberdade foi aplicada de acordo com o método de Kenward e Roger (1997) (DDFM = KR). Ao detectar efeito significativo de dose, ciclo de crescimento ou interação dose x ciclo de crescimento significativa, ($p < 0,05$) foi feito teste de Tukey utilizando-se o software SAS®, versão 9.3 para Windows®. Foi realizada também a análise de correlação, aplicando o teste de person a 5% de probabilidade de erro entre o nitrogênio e os demais nutrientes no tecido buscando se verificar as interações clássicas entre os nutrientes e identificar possíveis relações de sinergismo ou inibição entre os elementos.

1.6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.6.1 Nitrogênio

Em condições de fornecimento deficiente de nitrogênio o capim-marandu apresentou a seguinte ordem de acúmulo no limbo foliar $K > N > Ca > Mg > P > S > Fe > Mn > Zn > B > Cu$ e em condições de adequado ou excessivo fornecimento de nitrogênio, o acúmulo dos nutrientes seguiu a seguinte ordem $N > K > Ca > Mg > P > S > Fe > Mn > Zn > B > Cu$. Identifica-se que houve alteração para a ordem de extração total de N e K. Resultados que se repetiram independentemente da folha analisada, em função disto os resultados apresentados são relativos as médias das folhas 1 e 2 (**Tabelas 10 e 11**). Salienta-se que os resultados da análise química do material vegetal estão expressos com base na matéria seca.

Tabela 10. Teores médios de macronutrientes no limbo foliar em função do fornecimento de nitrogênio na solução nutritiva

Dose de N (%)	Nutriente					
	N	P	K g kg ⁻¹	Ca	Mg	S
6	9,1 ± 0,23	2,3 ± 0,10	24,4 ± 0,48	5,0 ± 0,18	2,6 ± 0,14	1,5 ± 0,12
20	11,4 ± 0,34	2,4 ± 0,11	22,9 ± 0,78	5,6 ± 0,16	2,5 ± 0,16	1,2 ± 0,07
100	18,4 ± 0,81	1,8 ± 0,15	15,9 ± 0,69	5,4 ± 0,25	2,5 ± 0,21	1,1 ± 0,08
200	27,0 ± 1,49	2,2 ± 0,19	18,1 ± 1,49	4,9 ± 0,26	2,2 ± 0,11	1,2 ± 0,09

Tabela 11. Teores médios de micronutrientes no limbo foliar em função do fornecimento de nitrogênio na solução nutritiva

Dose de N (%)	Nutriente				
	B	Cu	Fe	Mn	Zn
6	15,7 ± 0,98	10,2 ± 0,71	107,7 ± 9,20	165,1 ± 9,48	26,6 ± 0,93
20	17,7 ± 1,05	10,5 ± 0,46	156,0 ± 12,08	156,7 ± 10,19	23,3 ± 1,36
100	18,5 ± 1,69	10,0 ± 0,51	165,7 ± 10,04	117,06 ± 10,15	22,5 ± 1,18
200	18,8 ± 1,25	10,0 ± 0,48	228,4 ± 10,9	107,6 ± 8,40	23,7 ± 1,25

Sabe-se que as gramíneas demandam elevada quantidade de macronutrientes principalmente N e K. Tratando-se da relação de proporção que associa as quantidades de nitrogênio e potássio muitos resultados são observados na literatura (XU et al., 2002), MARSCHNER, 1995, RUAN et al., 1998; 1999), os quais demonstram que a disponibilidade do N e do K e a adequada proporção entre eles no solo são fatores importantes nos processos de crescimento e desenvolvimento das plantas. Nesta pesquisa, a provisão de N alterou negativamente a proporção de potássio (K) na parte aérea, resultado que corroboram com os verificados por BATISTA e MONTEIRO (2010).

Nas médias observadas neste estudo a absorção de todos os nutrientes ficaram dentro das faixas esperadas para a cultura que são encontradas na literatura, ou seja, segundo estes resultados plantas submetidas a deficiência de N não apresentaram deficiência ou excesso de absorção de outros nutrientes, todavia deve-se considerar que as faixas consideradas ótimas são amplas e com variações permitidas para os macronutrientes de até 212% (WERNER et al., 1997). Apesar dos teores estarem dentro das faixas, a composição da parte aérea das plantas, em condição de diferentes níveis de fornecimento de N foram diferentes. Na menor disponibilidade de N (6% da dose) a composição das plantas foi de 20% N, 5% P, 54% K, 11% Ca, 6% Mg e 4% S em compensação, em condições de adequado fornecimento de N (100% da dose) a composição das plantas foi de 41% N, 4% P, 35% K, 12% Ca, 5% Mg e 3% S. Nota-se que houve alteração para a proporção total principalmente dos nutrientes N e K. Estudos demonstram que a adubação nitrogenada aumenta as concentrações de K, Ca, Mg, Na, Zn e Mn na parte aérea das plantas (HAMILTON et al., 1998 ; FANG et al., 2012 ; TIAN et al., 2016). Todavia, outros estudos descobriram que as concentrações de Ca, Na, Zn e Mn na parte aérea diminuíram em um gradiente de N (HAMILTON et al., 1998; BRENNAN, 2005; SINKHORN, 2007; FANG et al., 2012)

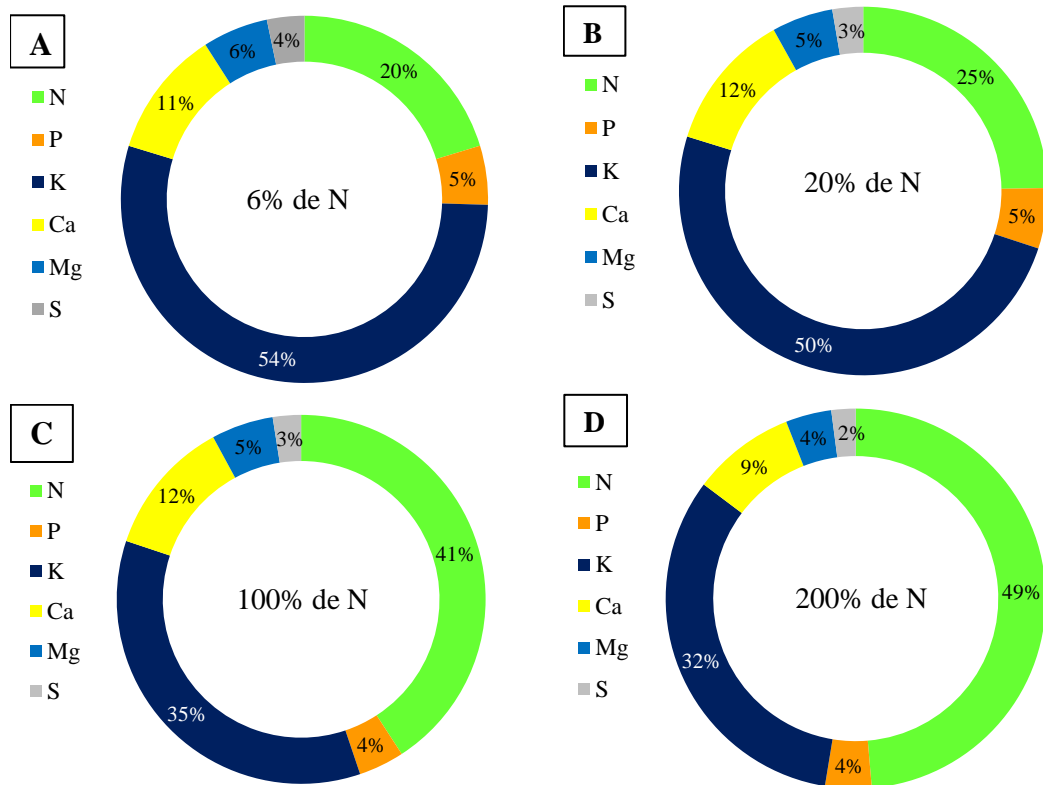


Figura 2. Composição (%) dos macronutrientes no tecido foliar em função do fornecimento de nitrogênio na solução nutritiva (A) 6% (B) 20%, (C) 100% e (D) 200%.

Tendo em vista os teores de micronutrientes na dose de 6% da N a composição das plantas foi de 48% Mn, 37% Fe, 8% Zn, 4% B e 3% Cu por outro lado, em condições de adequado fornecimento de N (100% da dose) a composição das plantas foi de 34% Mn, 50% Fe, 8% Zn, 5% B e 3% Cu. Nota-se que houve alteração para a proporção total principalmente dos nutrientes Mn e Fe. Nas plantas, o ferro está envolvido na síntese da clorofila e é essencial para a manutenção da estrutura e função do cloroplasto (ROUTH e SAHOO, 2015).

A assimilação de NH_4^+ em aminoácidos ocorre através da ação conjunta da glutamina sintetase e glutamato sintase. Glutamato sintase catalisa a transferência de um grupo amida da glutamina para o alfa-cetoglutarato para produzir duas moléculas de glutamato. Esta reação é considerada a principal via de assimilação de nitrogênio em plantas (TEMPLE et al., 1998). Quando a atividade diminuiu, a formação de aminoácidos também diminuiu, o que levou à falta de assimilação de nitrogênio em plantas o que explica o aumento dos teores de Fe nas plantas em função do aumento da disponibilidade de N na solução, estes aumentos ocorreram tanto na parte aérea como nas raízes das plantas.

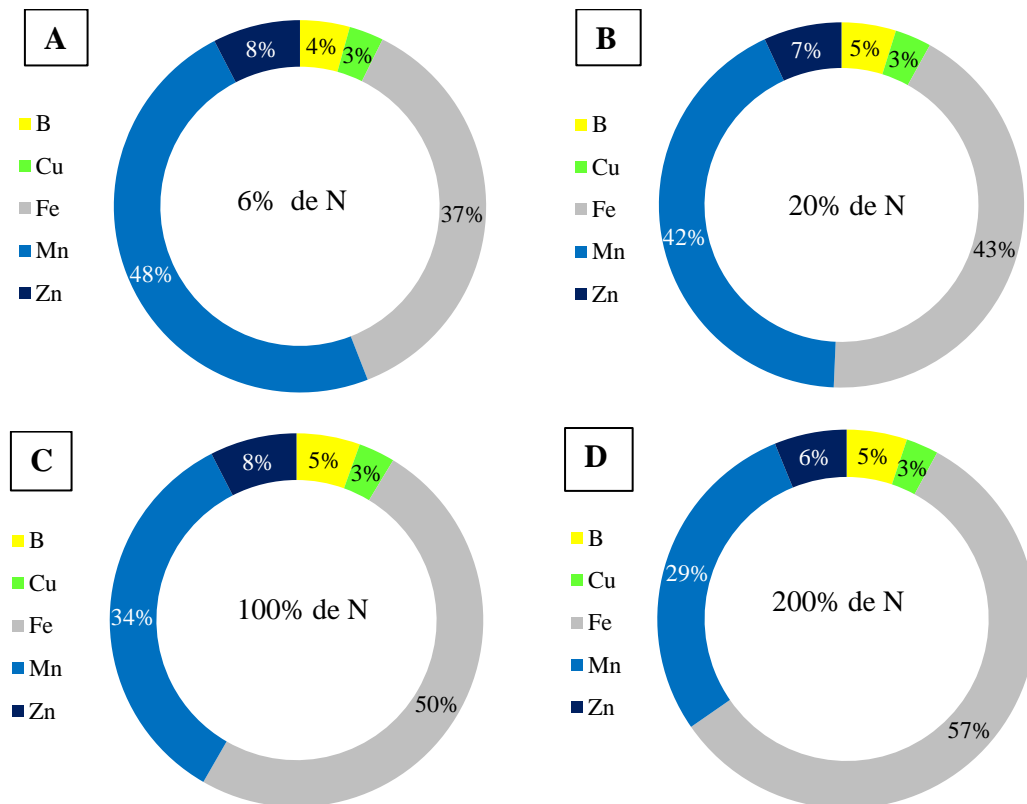


Figura 3. Composição (%) dos micronutrientes no tecido foliar em função do fornecimento de nitrogênio na solução nutritiva (A) 6% (B) 20%, (C) 100% e (D) 200%

Analisando-se as raízes, em condições de deficiência de nitrogênio o capim-marandu apresentou a seguinte ordem de acúmulo de nutrientes $K > N > S > Mg > Ca > P > Mn > Fe > Cu > B$. Em condições de adequado ou excessivo fornecimento de nitrogênio, a ordem de acúmulo foi de $N > S > K > Ca > Mg > P > Fe > Mn > Cu > Zn > B$ (Tabelas 12 e 13). Em condição de deficiência severa de N (6% da dose) a composição das raízes das plantas foi de 16% N, 5% P, 57% K, 6%Ca, 7% Mg e 9% S, em condições de adequado fornecimento de N (100% da dose) a composição das plantas foi de 43% N, 5% P, 16% K, 11% Ca, 11% Mg e 14% S. Consta-se também, como verificado na parte aérea, alteração para a proporção total dos nutrientes N e K.

Tabela 12. Teores médios de macronutrientes nas raízes em função do fornecimento de nitrogênio na solução nutritiva

Dose de N (%)	Nutriente					
	N	P	K	Ca	Mg	S
6	$3,8 \pm 0,06$	$1,2 \pm 0,06$	$13,6 \pm 1,22$	$1,6 \pm 0,08$	$1,8 \pm 0,03$	$2,1 \pm 0,01$
20	$4,5 \pm 0,02$	$0,8 \pm 0,04$	$7,7 \pm 0,83$	$1,7 \pm 0,07$	$1,7 \pm 0,08$	$2,2 \pm 0,01$
100	$6,8 \pm 0,36$	$0,8 \pm 0,01$	$2,5 \pm 0,40$	$1,9 \pm 0,08$	$1,8 \pm 0,04$	$2,4 \pm 0,07$
200	$10,5 \pm 0,63$	$0,9 \pm 0,10$	$1,9 \pm 0,23$	$2,2 \pm 0,05$	$1,6 \pm 0,15$	$2,6 \pm 0,06$

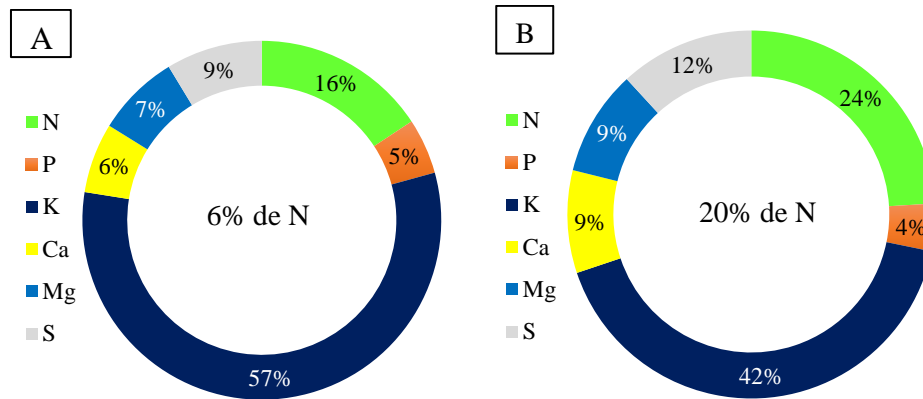


Figura 4. Composição (%) dos macronutrientes nas raízes em função do fornecimento de nitrogênio na solução nutritiva (A) 6% e (B) 20%.

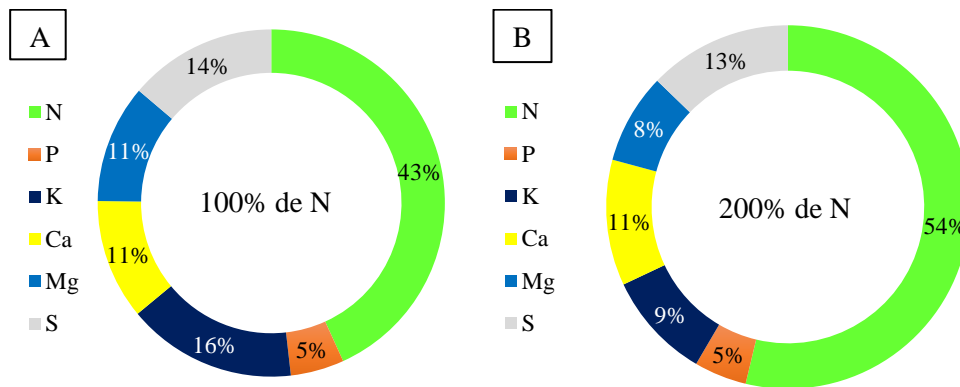


Figura 5. Composição (%) dos macronutrientes nas raízes em função do fornecimento de nitrogênio na solução nutritiva (A) 100% e (B) 200%.

Para os micronutrientes nas raízes, na dose de 6% da N a composição das plantas foi de 60% Mn, 36% Fe, 2% Zn, 0,4% B e 1% Cu já em condições de adequado fornecimento de N (100% da dose) a composição das plantas foi de 43% Mn, 51% Fe, 2% Zn, 0,3% B e 4% Cu. (Tabela 13, Figura 6).

Tabela 13. Teores médios de micronutrientes nas raízes em função do fornecimento de nitrogênio na solução nutritiva

Dose de N %	B	Cu	Nutriente Fe mg kg ⁻¹	Mn	Zn
6	4,3 ± 0,53	14,3 ± 1,58	531,8 ± 14,9	562,1 ± 6,7	32,1 ± 2,71
20	3,7 ± 0,15	59,8 ± 2,87	407,9 ± 11,7	884,3 ± 14,4	35,5 ± 2,34
100	7,3 ± 0,50	29,8 ± 9,5	844,2 ± 28,1	720,7 ± 31,8	38,9 ± 1,99
200	13,6 ± 1,12	63,1 ± 9,3	853,4 ± 40,5	372,3 ± 41,7	33,1 ± 2,09

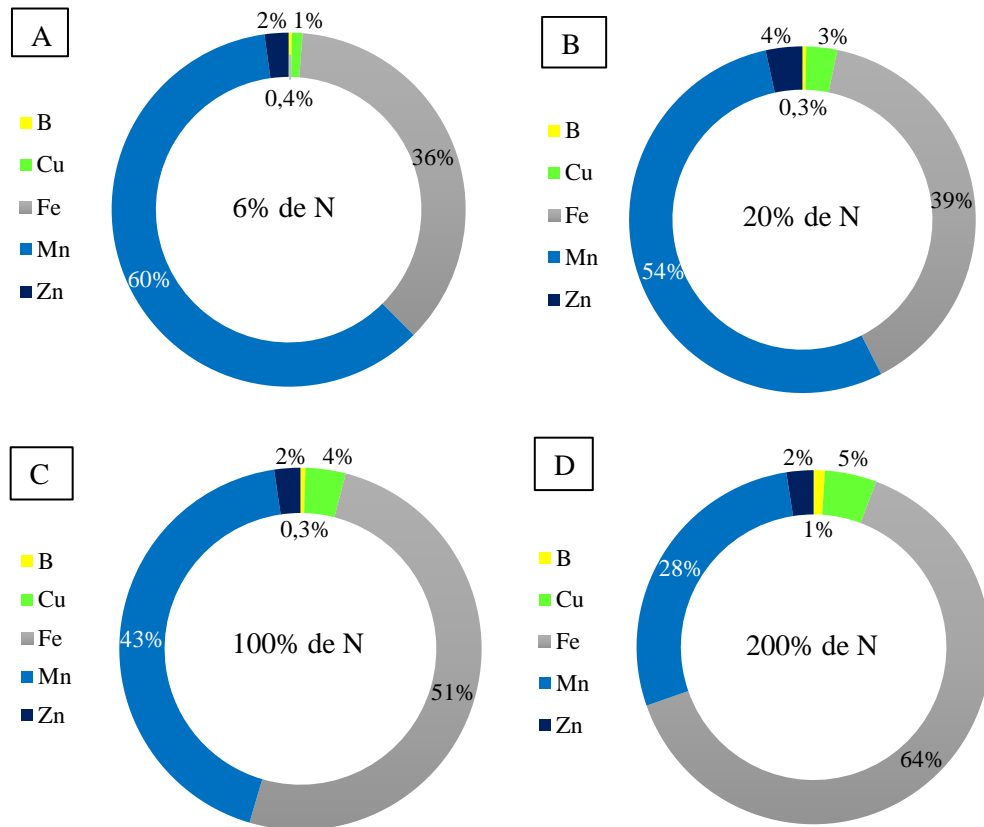


Figura 6. Composição (%) dos micronutrientes nas raízes em função do fornecimento de nitrogênio na solução nutritiva (A) 6% (B) 20%, (C) 100% e (D) 200%

As interações nutricionais interferem na composição mineral da planta, podendo um elemento estimular ou inibir a absorção de outros elementos (MENGEL; KIRKBY, 2001). Nota-se que existem algumas particularidades em relação ao requerimento de macro e micronutrientes para formação das folhas e raízes, principalmente em relação aos teores de nutrientes nas raízes em função da disponibilidade de nitrogênio na solução.

Analisando-se estatisticamente os nutrientes na parte aérea do capim-marandu verifica-se que para os teores de nitrogênio, fósforo e magnésio houve interação entre a dose de N e os ciclos de crescimento do capim em ambas as folhas estudadas ($p < 0.01$) para o S somente para a folha 1 ($p < .0001$) e para o K e Ca somente para a folha 2 ($p < 0.01$). Os teores de K na folha 1 variaram em função das doses de N e ciclo de crescimento ($p < .0001$) e os teores de Ca somente em função do ciclo de crescimento ($p < 0.01$) (**Tabela 14**).

Tabela 14. Resultados da análise de variância para os macronutrientes P, K, Ca, Mg e S nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) e F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu submetido a doses de adubação nitrogenada.

Fonte de variação	Nutriente					
	N	P	K	Ca	Mg	S
	F₁					
Dose de N (D)	<.0001**	0,0015**	<.0001**	0,1475 ^{ns}	0,0717 [†]	<.0001**
Ciclo de crescimento (C)	<.0001**	<.0001**	<.0001**	0,0001**	<.0001**	0,0263*
Interação D*C	<.0001**	0,0016**	0,1319 ^{ns}	0,2229 ^{ns}	0,0003**	<.0001**
	F₂					
Dose de N (D)	<.0001**	0,0012**	<.0001**	<.0001**	0,0573 [†]	0,6079 ^{ns}
Ciclo de crescimento (C)	<.0001**	<.0001**	<.0001**	<.0001**	<.0001**	0,1672 ^{ns}
Interação D*C	<.0001**	0,0001**	0,0016**	0,0052**	0,0044**	0,3188 ^{ns}

Nível de significância: *p<.05, **p<.01, †p<.10, ^{ns}não significativo.

Os teores de micronutrientes na folha 1 variaram em função do ciclo de crescimento para B, Cu, Mn e Zn ($p < 0,01$). O teor de N na solução nutritiva influenciou os teores de B ($p < 0,05$) e Mn ($p < 0,01$) nesta folha. Para o Fe houve interação entre a dose de nitrogênio e o ciclo de crescimento estudado. Os micronutrientes B, Cu, Fe e Zn na folha 2 variaram em função do ciclo de crescimento ($p < 0,05$) e o Fe em função da disponibilidade de N na solução ($p < .0001$). Os teores de manganês variaram em função da interação do nitrogênio na solução e o ciclo de crescimento (**Tabela 15**).

Tabela 15. Resultados da análise de variância para os micronutrientes B, Cu, Fe, Mn e Zn nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) e F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu submetido a doses de adubação nitrogenada

Fonte de variação	Nutriente				
	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	F₁				
Dose de N (D)	0,0143*	0,2163 ^{ns}	0,0795 [†]	0,0003**	0,2013 ^{ns}
Ciclo de corte (C)	< 0,0001**	0,0019**	0,0167*	< 0,0001**	0,0063**
Interação D*C	0,1300 ^{ns}	0,5364 ^{ns}	0,0222*	0,4878 ^{ns}	0,3725 ^{ns}
	F₂				
Dose de N (D)	0,3261 ^{ns}	0,9557 ^{ns}	< 0,0001**	<.0001**	0,1205*
Ciclo de corte (C)	0,0263*	0,0150*	0,0001**	<.0001**	<.0001**
Interação D*C	0,1314 ^{ns}	0,2117 ^{ns}	0,6298 ^{ns}	< 0,0001**	0,1034

Nível de significância: *p<.05, **p<.01, †p<.10, ^{ns}não significativo.

Houve correlação entre o fornecimento de nitrogênio e os teores de potássio e enxofre em ambas as folhas estudadas bem como com o teor de Fe na F₂. As correlações entre N: K e

N: S foram negativas evidenciando que o aumento da disponibilidade de N promoveu redução na concentração destes nutrientes na parte aérea do capim. Para o Fe a correlação foi positiva, portanto o aumento no teor de Fe foi resultante do aumento do fornecimento de N Houve correlação negativa moderada entre disponibilidade de N na solução e o teor de S em ambas as folhas sendo na F1 de -0,37 ($p < 0,05$) e na F2 de -0,28 ($p < 0,10$) (**Tabela 16**).

Tabela 16. Correlação entre o nitrogênio e os teores de minerais nas folhas em capim marandu

Folha	Nutriente									
	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Coeficiente de correlação										
F1	0,16 ^{ns}	-0,30 †	0,06 ^{ns}	0,15 ^{ns}	-0,37*	0,01 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,05 ^{ns}	-0,26 ^{ns}	0,06 ^{ns}
F2	0,14 ^{ns}	-0,29 †	-0,27 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	-0,28 †	0,13 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	0,59**	-0,26 ^{ns}	0,08 ^{ns}

Nível de significância: * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, † $p < 0,10$, ^{ns}não significativo.

O aumento de nitrogênio na solução nutritiva resultou em aumento nos teores de N na parte aérea das plantas em ambas as folhas analisadas (**Tabelas 17 e 18**). Para a F₁ no primeiro, segundo e terceiro ciclos plantas em condições deficiência de N (Dose 6 e 20%) acumularam teores de N na parte aérea estatisticamente iguais (**Tabela 17**). Diversos autores relatam a respeito do fornecimento do nitrogênio para a pastagem, com reflexos sobre diversos componentes da planta bem como dos teores de N foliares, resultados que corroboram com os observados em ambas as folhas avaliadas. O nitrogênio é o principal nutriente para manutenção da produtividade das gramíneas forrageiras, sendo essencial na formação das proteínas, cloroplastos e outros compostos que participam ativamente na síntese dos compostos orgânicos constituintes da estrutura vegetal; portanto, responsável por características ligadas ao porte da planta, tais como o tamanho das folhas, tamanho do colmo, formação e desenvolvimento dos perfilhos (WERNER, 1986) resultados que corroboram com os verificados neste projeto (**Anexo 63**).

Tabela 17. Teores de N nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação nitrogenada e ciclos de corte.

Dose de N (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
Nitrogênio (g kg ⁻¹)			
6	8,6 ± 0,12 ^{Ba}	9,8 ± 0,43 ^{Ba}	8,7 ± 0,21 ^{Ba}
20	9,5 ± 0,32 ^{Bab}	12,3 ± 0,15 ^{Ba}	12,30 ± 0,22 ^{Ba}
100	15,0 ± 0,23 ^{Ab}	17,1 ± 0,10 ^{Ab}	23,6 ± 0,30 ^{Aa}
200	19,3 ± 0,15 ^{Ab}	29,1 ± 0,23 ^{Aa}	29,6 ± 0,15 ^{Aa}

Analisando-se a F₂ verifica-se que no primeiro e segundo ciclos pode-se identificar 3 grupos de teores: plantas cultivadas em deficiência de N (Dose 6 e 20%), plantas cultivadas em

condição de adequado fornecimento de N (Dose 100%) e plantas submetidas a excesso de N (Dose 200%)

Tabela 18. Teores de N nas lâminas foliares F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação nitrogenada e ciclos de corte.

Dose de N (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
	Nitrogênio (g kg ⁻¹)		
6	8,1 ± 0,13 ^{Ca}	10,0 ± 0,51 ^{Ca}	9,3 ± 0,18 ^{Da}
20	9,5 ± 0,23 ^{Ca}	12,5 ± 0,16 ^{Ca}	12,4 ± 0,17 ^{Ca}
100	16,6 ± 0,33 ^{Bb}	16,4 ± 0,14 ^{Bb}	21,8 ± 0,26 ^{Ba}
200	20,0 ± 0,45 ^{Ab}	31,0 ± 0,38 ^{Aa}	30,0 ± 0,29 ^{Aa}

No primeiro ciclo de crescimento plantas deficientes em N apresentaram maiores teores de P no tecido vegetal. No segundo ciclo, o capim com a dose recomendada de nitrogênio apresentou teor estatisticamente inferior as demais doses de N fornecidas. A menor concentração de P nas plantas nutridas com N pode ser decorrente do efeito de diluição. No ciclo de crescimento 3 não houve variação nos teores de P em função das doses de N. Os teores de P no geral foram inferiores no primeiro ciclo e aumentaram em função das rebrotações da pastagem (**Tabela 19**).

Tabela 19. Teores de P nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação nitrogenada e ciclos de corte.

Dose de N (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
	Fósforo (g kg ⁻¹)		
6	2,0 ± 0,10 ^{Aa}	2,3 ± 0,34 ^{Aa}	2,5 ± 0,18 ^{Aa}
20	2,1 ± 0,25 ^{Ab}	2,6 ± 0,12 ^{Aa}	2,8 ± 0,17 ^{Aa}
100	1,4 ± 0,18 ^{Bb}	1,4 ± 0,08 ^{Bb}	2,6 ± 0,24 ^{Aa}
200	1,1 ± 0,12 ^{Bb}	2,8 ± 0,18 ^{Aa}	2,6 ± 0,12 ^{Aa}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3)

Os teores de P na folha 2 foram semelhantes aos verificados na folha 1. No primeiro ciclo de avaliação, o teor de P foi inversamente proporcional ao nível de fornecimento de nitrogênio no meio, ocorrendo decréscimo no teor foliar de fósforo em função do aumento do teor de N na solução (**Tabela 20**). A média do teor de fósforo em ambas as folhas foi de 2,2 g kg⁻¹. Todos os teores de P determinados estavam dentro da faixa de teor adequada de P na parte aérea de capim-marandu que é de 0,8 a 3 g kg⁻¹ e acima do nível crítico que é de 1,2 g kg⁻¹ (WERNER et al., 1997, MONTEIRO, 2010).

Estes resultados de redução nos teores de fósforo em função do aumento do fornecimento de N corroboram com verificados por SILVA, 2015 que trabalhando com híbridos de milho em solução nutritiva constatou que a concentração de P na parte aérea foi inferior nas plantas cultivadas com as maiores doses de N. Não houve correlação entre N e P em nenhum dos ciclos estudados.

Tabela 20. Teores de P nas lâminas foliares F₂ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação nitrogenada e ciclos de corte.

Dose de N (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
		Fósforo (g kg ⁻¹)	
6	2,3 ± 0,06 ^{Aa}	2,3 ± 0,20 ^{Aa}	2,8 ± 0,23 ^{Aa}
20	1,8 ± 0,12 ^{Bb}	2,9 ± 0,17 ^{Aa}	2,6 ± 0,12 ^{Aa}
100	1,5 ± 0,33 ^{Bb}	1,4 ± 0,07 ^{Bb}	2,6 ± 0,23 ^{Aa}
200	1,2 ± 0,08 ^{Cb}	2,6 ± 0,20 ^{Aa}	2,8 ± 0,06 ^{Aa}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

No geral, plantas com N disponível na solução no nível de suficiência (100%) apresentaram menores teores de potássio no tecido foliar em relação aos demais níveis em todos os ciclos de crescimento. Para F₁ os maiores teores de potássio foram verificados em condição de deficiência de nitrogênio severa (6% N disponível na solução) sendo de 7 g kg⁻¹ inferior quando comparado as plantas em condição de suficiência de nitrogênio (100 % N) (**Tabela 21**). O maior acúmulo de K verificado nas doses mais baixas de N, pode ser resultante do menor crescimento vegetativo que acarretou em acúmulo de K nos tecidos. Martim et al (1997) em pesquisa com os capins Coastcross I e Tifton 85 com objetivo de avaliar a interação entre N e K constataram que houve interação significativa entre estes nutrientes, sendo esta resposta evidente no terceiro ciclo de crescimento das plantas.

Tabela 21. Teor de K nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu em função da adubação nitrogenada.

Dose de Nitrogênio (%)	K g kg ⁻¹
6	23,6 ± 0,67 ^A
20	22,9 ± 0,94 ^A
100	16,6 ± 1,05 ^B
200	18,1 ± 1,03 ^B

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=9).

Houve aumento dos teores de potássio nas lâminas foliares F₁ em função dos ciclos de crescimento, com médias de 16,9 g kg⁻¹, 20,4 g kg⁻¹ e 21,6 g kg⁻¹ no primeiro, segundo e terceiro ciclo, respectivamente (**Tabela 22**).

Tabela 22. Teor de K nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu nos ciclos de crescimento.

Ciclo de Crescimento	K
	g kg ⁻¹
Ciclo 1	16,9 ± 1,34 ^B
Ciclo 2	20,4 ± 1,17 ^A
Ciclo 3	21,6 ± 1,15 ^A

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=12).

A concentração de potássio na F₂ apresentou a mesma tendência da F₁ e das raízes, verificando-se a mesma relação de redução nos teores de K em função do aumento do fornecimento de N (**Tabela 23**). Trabalhos no tocante a relação N e K nas plantas expressam funções do K no início do metabolismo do N, na incorporação do nitrogênio mineral e especialmente na redução do nitrato bem como no estágio final do metabolismo deste nutriente (MARSCHNER, 1995; RUAN et al., 1998; 1999). Em avaliação dos efeitos da adubação em capim-elefante (*Pennisetum purpureum* schum.) ANDRADE et al., 2000 verificaram a absorção de K diminuiu com a adubação nitrogenada, resultados que corroboram com os verificados neste estudo bem como no experimento avaliando os efeitos das doses de potássio sobre os teores de nitrogênio, que será discutido mais adiante. A provisão de N altera positivamente as proporções de Ca e de Mg e negativamente a proporção de potássio (K) na parte aérea (BATISTA; MONTEIRO, 2010).

Tabela 23. Teores de K nas lâminas foliares F₂ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação nitrogenada e ciclos de corte.

Dose de N (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
		Potássio (g kg ⁻¹)	
6	24,3 ± 0,88 ^{Aa}	26,5 ± 1,12 ^{Aa}	25,0 ± 1,15 ^{Aa}
20	18,8 ± 0,85 ^{Bb}	26,0 ± 0,68 ^{Aa}	23,4 ± 1,30 ^{Aa}
100	15,7 ± 0,95 ^{Cb}	18,5 ± 0,84 ^{Ba}	15,1 ± 0,66 ^{Bb}
200	16,3 ± 0,73 ^{Cc}	19,7 ± 0,81 ^{Aa}	16,9 ± 1,39 ^{Bb}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

O teor médio de cálcio na F₂ foi superior ao verificado na F₁ independentemente do nível de fornecimento de nitrogênio (**Tabelas 24 e 25**). Os teores de Ca no tecido vegetal variaram em função do ciclo de crescimento na F₁ sendo estatisticamente inferior no ciclo 2 em relação aos demais. Os teores médios deste nutriente nesta folha foram de 4,9 g kg⁻¹, 3,7 g kg⁻¹ e 5,0 g kg⁻¹ nos ciclos 1, 2 e 3, respectivamente (**Tabela 24**).

Tabela 24. Teor dos macronutriente Ca nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu nos ciclos de crescimento.

Ciclo de Crescimento	Ca
	g kg ⁻¹
Ciclo 1	4,9 ± 0,20 ^A
Ciclo 2	3,7 ± 0,22 ^B
Ciclo 3	5,0 ± 0,21 ^A

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=12).

A faixa de teor adequado de Ca na parte aérea de capim-marandu está compreendida entre 3 a 6 g/kg (WERNER et al., 1997) logo, o fornecimento de N em níveis inferiores ao requeridos pelo capim marandu resultaram em acúmulo excessivo de Ca na F₂, nos ciclos 2 e 3, sucedendo em concentrações acima da faixa de teor adequado, em contrapartida, o fornecimento de N em nível igual ou acima do recomendado pela cultura não resultou em acúmulo de Ca fora da faixa adequada de teor em nenhum dos ciclos de crescimento estudados (**Tabela 25**). Estes resultados ratificam os verificados em estudo de BATISTA; MONTEIRO, 2010 que trabalhando em Neossolo Quartzarênico concluíram que a adubação nitrogenada ocasionou alterações nos teores de cálcio e magnésio nos tecidos foliares das plantas e interferindo negativamente nas proporções de potássio, cálcio e magnésio e demonstrando os efeitos secundários da aplicação do nitrogênio que resultou em reduções nos teores de Ca e Mg. Em trabalho realizado por COSTA et al., 2008 nas maiores doses de nitrogênio a absorção de Ca não acompanhou o crescimento da planta causando uma redução nos seus teores, o que refletiu numa ligeira queda da extração de Ca nas maiores doses de N. A dose de N que proporcionou máxima extração de Ca foi de 57mg dm³. Nesta dose, o incremento em relação a testemunha foi de 1,5%.

Tabela 25. Teores de Ca nas lâminas foliares F₂ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação nitrogenada e ciclos de corte.

Dose de N (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2 Cálcio (g kg ⁻¹)	Ciclo 3
6	5,2 ± 0,37 ^{Bb}	6,1 ± 0,31 ^{Ab}	7,3 ± 0,32 ^{Aa}
20	6,1 ± 0,24 ^{Ab}	6,2 ± 0,15 ^{Aa}	7,2 ± 0,42 ^{Aa}
100	4,9 ± 0,23 ^{Bb}	5,3 ± 0,07 ^{Bb}	5,9 ± 0,22 ^{Ba}
200	5,1 ± 0,12 ^{Bb}	4,2 ± 0,29 ^{Cc}	6,0 ± 0,50 ^{Ba}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

Para o Mg, no ciclo 2, plantas que receberam 100% e 200% do recomendado de N foram estatisticamente inferiores as plantas que estavam em condição de deficiência quando se avalia a concentração deste nutriente na parte área. Verificou-se também que os teores de Mg na

lâmina foliares F_1 aumentaram em função dos ciclos de crescimento. Ao se considerar a faixa de teor adequado de Mg na parte aérea de capim-marandu de 1,5 a 4,0 g kg⁻¹ (WERNER et al., 1997) pode-se notar que no primeiro ciclo a deficiência (Dose 6%N) ou o excesso (Dose 200%N) na solução resultaram em deficiência de Mg no capim (**Tabela 26 e 27**).

Entre os elementos essenciais para o crescimento das plantas, o magnésio é particularmente propenso a uma série de interações com outros nutrientes. A aplicação de Mg pode aumentar a eficiência do uso de N nas plantas, mas os mecanismos subjacentes à interação de Mg e N não são bem compreendidos (PENG et. al; 2019). Nas células vegetais o íon Mg²⁺ tem papel específico na ativação de enzimas envolvidas na respiração e na fotossíntese e também é parte da estrutura em anel da molécula de clorofila (TAIZ et. al; 2017) A falta de N ou Mg leva à clorofila diminuir e, finalmente, afetar a transferência de energia nos fotossistemas (KALAJI et. al; 2017).

Tabela 26. Teor de Mg nas lâminas foliares F_1 (mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação nitrogenada e ciclos de corte.

Dose de N (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
	Magnésio (g kg ⁻¹)		
6	1,4 ± 0,06 ^{Ab}	2,4 ± 0,17 ^{Aa}	2,2 ± 0,12 ^{Ba}
20	1,2 ± 0,09 ^{Ab}	2,0 ± 0,09 ^{Ba}	2,3 ± 0,10 ^{Ba}
100	1,7 ± 0,07 ^{Ab}	1,7 ± 0,03 ^{Cb}	3,1 ± 0,32 ^{Aa}
200	1,3 ± 0,22 ^{Ab}	1,8 ± 0,22 ^{Cb}	2,1 ± 0,06 ^{Ba}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

Tabela 27. Teores de Mg nas lâminas foliares F_2 (mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação nitrogenada e ciclos de corte.

Dose de N (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
	Magnésio (g kg ⁻¹)		
6	2,3 ± 0,14 ^{Ab}	3,7 ± 0,21 ^{Aa}	3,5 ± 0,18 ^{Aa}
20	2,1 ± 0,29 ^{Ab}	3,5 ± 0,29 ^{Aa}	3,7 ± 0,27 ^{Aa}
100	2,5 ± 0,30 ^{Ab}	2,4 ± 0,07 ^{Bb}	3,9 ± 0,35 ^{Aa}
200	2,5 ± 0,32 ^{Aab}	2,3 ± 0,23 ^{Bb}	3,1 ± 0,09 ^{Ba}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

Na pesquisa aqui reportada o aumento do fornecimento reduziu o teor de S na F_1 e não afetou os teores de S na F_2 . O enxofre, ao contrário do N, não é remobilizado com facilidade para as folhas jovens na maioria das espécies (TAIZ, et al, 2017) o que pode auxiliar no entendimento das diferenças nos teores entre as folhas analisadas (**Tabela 28**). Segundo

Sutradhar et al, (2017) a aplicação de N impacta a absorção e utilização de N e S na planta sendo que no geral, a absorção e utilização de N e S estão inter-relacionadas, mas devido ao maior requerimento de N para a cultura do milho, a influência que N tem na absorção de S pode ser maior do que a influência que S tem na absorção de N.

Tabela 28. Teor de S nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação nitrogenada e ciclos de corte.

Dose de N (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2 Enxofre (g kg ⁻¹)	Ciclo 3
6	1,3 ± 0,17 ^{Ab}	1,3 ± 0,13 ^{Ab}	2,3 ± 0,15 ^{Aa}
20	1,2 ± 0,09 ^{Aa}	1,1 ± 0,07 ^{Ba}	1,2 ± 0,06 ^{Ba}
100	1,1 ± 0,10 ^{Aa}	1,0 ± 0,12 ^{Ba}	1,0 ± 0,22 ^{Ca}
200	1,1 ± 0,07 ^{Aa}	0,8 ± 0,18 ^{Ca}	0,7 ± 0,06 ^{Db}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

Os teores de S verificados na pesquisa estão dentro da faixa de teor adequado na parte aérea de capim-marandu que é de 0,8 a 2,5 g/kg (WERNER et al., 1997) entretanto pode-se verificar a partir do segundo ciclo de crescimento que o aumento da disponibilidade de nitrogênio na solução resultou em teor de S estatisticamente inferior nas folhas mais jovens da forrageira. Trabalho realizado por Scott et al. (1983) demonstra que, geralmente, valores de N:S acima de 14:1 indicam deficiência de S. A relação N:S na F₁ para as doses de 6, 20, 100 e 200% foram de 5,9:1, 10,7:1, 18,6:1 e 25,1:1 respectivamente, e na F₂ de 6,5:1, 8,0:1, 14,8:1 e 22,2:1 respectivamente. No geral, os valores de S na F₁ foram superiores resultando em relação N:S menor nesta folha.

Em levantamento realizado por SENGER et al., 1997 para os teores médios de S nas pastagens, em diferentes épocas e fertilidade de solos, observaram nas 273 amostras analisadas, a média dos teores deste elemento foi de 1,7 g kg⁻¹, com valores que oscilaram entre 0,7 e 4,8 g kg⁻¹ na MS. 91% dos valores médios das amostras suprem as necessidades de 1,0 g kg⁻¹ de S na MS. Esta necessidade de S somente não foi suprida na dose de 200% de N na qual os teores de S oscilaram entre 0,8 e 0,7 g kg no segundo e terceiro ciclo de crescimento, respectivamente.

A máxima eficiência da fertilização depende do equilíbrio entre os nutrientes, entretanto existem poucos trabalhos na literatura retratando a adubação de macronutrientes relacionada a absorção de micronutrientes em pastagens existindo lacunas no conhecimento sobre a exigência das espécies e cultivares quanto aos micronutrientes. Atualmente a adubação com micronutrientes em pastagens tropicais tem sido pouco estudada, entretanto fica evidenciado a

relação entre a adubação nitrogenada altera a concentração dos micronutrientes na parte aérea bem como nas raízes do capim marandu.

Os teores de Fe observados na parte aérea situaram-se dentro do comumente observado para a espécie que é de 50 a 250 mg/kg. A partir do segundo ciclo de crescimento, plantas que se desenvolveram em solução nutritiva com 20% e 100% do teor de nitrogênio requerido pela cultura apresentaram teor de ferro estatisticamente inferior as demais. Segundo Persson et al., (2009) altas doses de fertilizantes nitrogenados podem potencialmente promover a translocação de Fe e Zn nas plantas. No geral, houve redução no teor de Fe em função dos ciclos de rebrotação da gramínea (**Tabela 29**).

Tabela 29. Teores de Fe nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação nitrogenada e ciclos de corte.

Dose de N	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
	Ferro (mg kg ⁻¹)		
6	209,6 ± 17,69 ^{Aa}	202,1 ± 22,72 ^{Aa}	191,31 ± 19,31 ^{Aa}
20	199,2 ± 13,79 ^{Aa}	137,3 ± 27,50 ^{Cb}	92,8 ± 20,51 ^{Cc}
100	198,5 ± 19,98 ^{Aa}	120,8 ± 22,17 ^{Cb}	78,9 ± 7,59 ^{Cc}
200	127,5 ± 16,10 ^{Bb}	151,1 ± 7,19 ^{Ba}	120,8 ± 20,41 ^{Bb}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

Neste trabalho o aumento do fornecimento de N resultou em aumento na concentração de B na F₁, entretanto todos os teores permaneceram dentro da faixa de teor adequado de B na parte aérea de capim-marandu que é de 10 a 25 mg kg⁻¹. A interação de N com B é de grande importância porque ambos os elementos são bastante móveis no ambiente do solo. Sendo que deficiências de B são frequentes na agricultura brasileira e este é um dos micronutrientes que mais limita o rendimento das pastagens no Brasil entretanto para os bovinos este nutriente não tem uma exigência clara (OLSON, 2007). Pesquisas demonstram que as aplicações de N em grandes taxas levaram à diminuição da absorção de B pelas plantas (PETRIDIS, 2012) entretanto neste estudo o aumento do fornecimento de nitrogênio acarretou em aumento no teor de B nas lâminas foliares mais jovens completamente expandidas. Na literatura ainda existem contradições sobre o efeito do N na deficiência de B (LOU et al. 2003; WILLET, JAKOBSEN e ZARCINAS 1985).

Analisando-se a F₁ verifica-se redução nos teores de Mn em função do aumento das doses de N. Na F₂ houve interação entre a dose de nitrogênio fornecida e o ciclo de crescimento estudado, entretanto, no geral, os maiores teores de Mn foram observados nas menores doses

de N (**Tabela 30** e **Tabela 31**). O Mn participa da fotossíntese, formação de cloroplasto, manutenção do equilíbrio hormonal, biossíntese de lipídios e resistência da planta a estresses bióticos e abióticos (ROCHA E GUERINOT, 2014). Os resultados aqui apresentados diferem dos apresentados em estudo de Stepien et. al, (2019) que verificou que um aumento na adubação nitrogenada de 150 para 200 kg ha⁻¹ aumentou o teor de Mn porém corroboram com os verificados por Ai et. al, (2017) em que o teor de Mn nos tecidos diminuiu significativamente em função do aumento da adubação nitrogenada.

Tabela 30. Teor dos nutrientes B e Mn nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu em função da adubação nitrogenada.

Dose de Nitrogênio	B		Mn
	mg kg ⁻¹		
6	13,1 ± 1,22 ^C		159,2 ± 5,48 ^A
20	15,0 ± 1,46 ^C		130,4 ± 4,62 ^B
100	17,1 ± 1,93 ^B		94,5 ± 4,80 ^C
200	19,0 ± 1,45 ^A		100,1 ± 6,48 ^C

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=9).

Tabela 31. Teor de Mn nas lâminas foliares F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação nitrogenada e ciclos de corte.

Dose de N	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
		Manganês (mg kg ⁻¹)	
6	185,2 ± 19,74 ^{Aa}	138,8 ± 11,89 ^{Bb}	173,3 ± 5,4 ^{Aa}
20	120,4 ± 24,07 ^{Bc}	202,5 ± 9,74 ^{Aa}	156,0 ± 20,04 ^{Ab}
100	75,9 ± 6,93 ^{Cb}	101,5 ± 10,10 ^{Cb}	171,3 ± 17,03 ^{Aa}
200	60,4 ± 9,65 ^{Cb}	135,5 ± 22,42 ^{Ba}	129,2 ± 24,39 ^{Ba}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

Os teores dos micronutrientes B, Cu, Mn, Fe e Zn observados na parte aérea situaram-se dentro das faixas comumente observadas para a espécie em todos os ciclos de crescimento. Os teores de B variaram entre 11,5 e 22,7 mg kg⁻¹, os teores de Cu variaram entre 8,5 a 11,7 mg/kg, os teores de Mn variaram entre 95,6 e 164,3 mg kg⁻¹ os teores de Zn variaram entre 19,1 e 27,7 mg kg⁻¹ e os teores de Fe variaram entre 140,5 e 191,5 mg kg⁻¹ (**Tabelas 32** e **33**).

Tabela 32. Teor dos micronutrientes, B, Cu, Mn e Zn nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu nos ciclos de crescimento.

Ciclo de Crescimento	B	Cu	Mn	Zn
	mg kg ⁻¹			
Ciclo 1	22,73 ± 4,88 ^A	8,5 ± 1,74 ^B	95,6 ± 32,13 ^B	20,6 ± 2,87 ^B
Ciclo 2	11,55 ± 3,19 ^B	11,7 ± 1,86 ^A	103,4 ± 26,72 ^B	25,6 ± 3,98 ^A
Ciclo 3	12,74 ± 4,53 ^B	11,2 ± 2,56 ^A	164,3 ± 34,54 ^A	24,7 ± 3,34 ^A

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=12).

Tabela 33. Teor dos micronutrientes, B, Cu, Fe e Zn nas lâminas foliares F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu nos ciclos de crescimento.

Ciclo de Crescimento	B	Cu	Fe	Zn
Ciclo 1	19,3 ± 1,50 ^A	8,6 ± 1,64 ^B	191,5 ± 20,55 ^A	19,1 ± 3,35 ^B
Ciclo 2	15,4 ± 1,76 ^B	10,9 ± 1,60 ^A	165,8 ± 10,82 ^B	25,5 ± 4,10 ^A
Ciclo 3	19,1 ± 1,71 ^A	10,8 ± 1,55 ^A	140,5 ± 16,94 ^C	27,7 ± 4,34 ^A

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=12).

A disponibilidade de nitrogênio na solução nutritiva afetou significativamente os teores de N ($p < 0,01$), P ($p < 0,05$), K ($p < 0,01$), Ca ($p < 0,01$) e S ($p < 0,05$) nas raízes. Altas concentrações de N na solução aumentaram os teores de N, Ca e S e reduziram os teores de K e P nas raízes. Os teores de Mg nas raízes não foram afetados pela disponibilidade de N (**Tabela 34**). Resultados de teores de nutrientes em raízes de forrageiras são escassos na literatura.

A concentração de N nas raízes variou entre 3,8 e 10,5 g kg⁻¹, sendo 79% menor em condições de severa deficiência de N (Dose 6%) e 51% menor em condições de deficiência moderada (Dose 20%) em comparação aos teores observados nas plantas cultivadas em condições de adequado fornecimento de N (Dose 100%). Quando o N foi fornecido na dose de 200% houve aumento nos teores de N nas raízes na ordem de 54%, em relação a dose de 100%. Os resultados obtidos corroboram com os verificados por SILVEIRA et al., 2011 que ensaio avaliando doses de nitrogênio e enxofre em uma pastagem de marandu, reportaram que a concentração de nitrogênio nas raízes foi significativamente afetada pelas adubações nitrogenadas. A adubação nitrogenada em dois anos consecutivos ocasionou mudanças significativas nas raízes das gramíneas, expressas pela massa seca, comprimento, superfície e concentração de nitrogênio. Nesta pesquisa, um modelo de regressão linear simples explica a relação entre a disponibilidade de N na solução e o teor de N nas raízes conforme equação $y = 0,0339x + 3,6312$ ($p < 0,05$) (**Figura 12**).

Os teores de P variaram entre 0,8 e 1,2 g kg⁻¹, o maior teor verificado em condições de deficiência de N. Segundo Andrew e Robins, 1971 o N estimula a absorção e translocação do P o que pode explicar os menores teores de P em condições em que a disponibilidade de N era maior.

O teor de K nas raízes diferiu estatisticamente em função das doses de nitrogênio na solução reduzindo drasticamente com o aumento da disponibilidade de N. O teor de K na dose

6% foi de 13,6 g kg⁻¹, na dose de 20% foi de 7,7 g kg⁻¹, na dose de 100% foi de 2,5 g kg⁻¹ e na dose de 100% foi de 1,9 g kg⁻¹. Os resultados observados nas raízes corroboram com os obtidos na parte aérea das plantas, demonstrando que, como visto anteriormente, na presença de maior quantidade de N na solução ocorre uma alteração negativa sob a proporção de potássio (K) nos tecidos. A equação $y=0,0005x^2 - 0,1644x + 12,903$ ($p<0.10$) representa a relação entre o fornecimento de nitrogênio para o capim marandu e o teor de K nas raízes das plantas. GARCEZ et al., 2011 visando estudar desenvolvimento do sistema radicular do marandu em doses de nitrogênio e magnésio verificaram que altas doses de N na solução nutritiva promoveram aumento na concentração de N e diminuição de K nas raízes, resultados que validam os verificados neste estudo.

De maneira oposta ao que foi observado na parte aérea, os teores de Ca nas raízes aumentaram com o aumento da disponibilidade de N com variações entre 1,6 g kg⁻¹ (Dose 6%) e 2,2 g kg⁻¹ (Dose de 200%). Estes resultados corroboram com os obtidos por BATISTA, MONTEIRO, 2010) que verificaram que o teor de Ca nas raízes que aumentou em função do fornecimento de N na solução e também com os resultados verificados por GARCEZ et al., 2011 que concluem que a concentração de cálcio aumenta em função do acréscimo nas doses de N.

Analisando-se os teores de S nas raízes confirma-se que a absorção deste nutriente e do N estão inter-relacionadas, ocorrendo aumento no teor de S nas raízes em raízes cultivadas em solução com maior disponibilidade de N. A maior disponibilidade de N impactou na absorção e utilização de N e S na planta sendo que os teores de S foram de 2,1, 2,2, 2,4 e 2,6 g kg⁻¹ nas doses de 6, 20, 100 e 200% de N, respectivamente. As relações N:S nas raízes foram de 1,8:1,0 na dose de 6%, 2,0:1,0 na dose de 20%, 2,8:1,0 na dose de 100% e de 4,0:1,0 na dose de 200%,

Tabela 34. Resultados da análise dos macronutrientes nas raízes em capim marandu submetido a doses de adubação nitrogenada.

Dose de N (%)	Nutriente					
	N	P	K	Ca g kg ⁻¹	Mg	S
6	3,8 ± 0,06 ^C	1,2 ± 0,06 ^A	13,6 ± 1,22 ^A	1,6 ± 0,08 ^C	1,9 ± 0,03	2,1 ± 0,01 ^C
20	4,5 ± 0,02 ^C	0,9 ± 0,04 ^B	7,7 ± 0,83 ^B	1,7 ± 0,07 ^C	1,7 ± 0,08	2,2 ± 0,01 ^C
100	6,8 ± 0,36 ^B	0,8 ± 0,01 ^B	2,5 ± 0,40 ^C	1,9 ± 0,08 ^B	1,8 ± 0,04	2,4 ± 0,07 ^B
200	10,5 ± 0,63 ^A	0,8 ± 0,10 ^B	1,9 ± 0,23 ^C	2,2 ± 0,05 ^A	1,6 ± 0,15	2,6 ± 0,06 ^A
p valor	<0,0001	0,0293	0,0002	0,0078	0,6172	0,0117

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3)

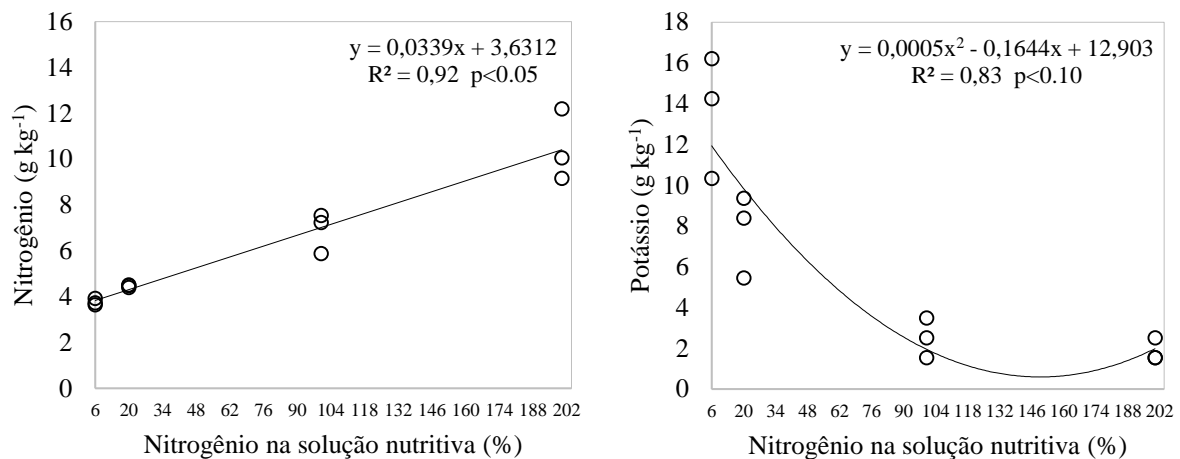


Figura 7. Relação entre a disponibilidade de N na solução nutritiva e o teor de nutrientes nas raízes (A) Nitrogênio, (B) Potássio

Ainda que os micronutrientes desempenhem um papel fundamental na formação e no metabolismo de uma série de enzimas, e sabendo-se que a falta de micronutrientes pode causar doenças e afetar o crescimento normal das plantas (KHOSHGOFTARMANESH et al., 2010) os micronutrientes em pastagens têm sido pouco estudados. Verifica-se neste estudo que a disponibilidade de N teve influência significativa sobre todos os micronutrientes avaliados, entretanto com respostas distintas para cada um deles. Para o B e Fe houve aumento dos teores em função do aumento da dose de N, com teores de B variando entre 3,7 g kg⁻¹ (Dose 6%) e 13,6 g kg⁻¹ (Dose 200%) e teores de Fe variando entre 407,9 g kg⁻¹ (Dose 20%) e 853,4 g kg⁻¹ (Dose 200%). Para o Mn e Zn os teores foram verificados nas doses de 20% e 100%, com teores de Mn variando entre 372,3 g kg⁻¹ (Dose 200%) e 884,3 g kg⁻¹ (Dose 20%) e teores de Zn variando entre 32,1 g kg⁻¹ (Dose 6%) e 38,9 g kg⁻¹ (Dose 200%). Os teores de cobre não seguiram uma tendência em função das doses, sendo os teores observados nas doses de 20% e 200% de N estatisticamente iguais (**Tabela 35**).

Tabela 35. Resultados da análise de variância para os micronutrientes nas raízes em capim marandu submetido a doses de adubação nitrogenada

Dose	Nutriente (mg kg ⁻¹)				
	B	Cu	Fe	Mn	Zn
6	4,3 ± 0,53 ^C	14,3 ± 1,58 ^C	531,8 ± 14,9 ^B	562,1 ± 6,7 ^{BC}	32,1 ± 2,71 ^B
20	3,7 ± 0,15 ^C	59,8 ± 2,87 ^{AB}	407,9 ± 11,7 ^B	884,3 ± 14,4 ^A	35,5 ± 2,34 ^{AB}
100	7,3 ± 0,50 ^B	29,8 ± 9,50 ^{BC}	844,2 ± 28,1 ^A	720,7 ± 31,8 ^{AB}	38,9 ± 1,99 ^A
200	13,6 ± 1,12 ^A	63,1 ± 9,30 ^A	853,4 ± 40,5 ^A	372,3 ± 41,7 ^C	33,1 ± 2,09 ^B
p valor	0,0003	0,0227	0,0014	0,0016	0,0185

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

O comportamento do B em função das doses de N é descrito pela equação $y = 0,0002x^2 + 0,0113x + 3,8511$ com $p < 0,05$. A equação $y = -0,018x^2 + 5,8456x + 409,5$ ($p < 0,10$) representa a relação entre o fornecimento de nitrogênio para o capim marandu e o teor de Fe nas raízes das plantas (**Figura 13**).

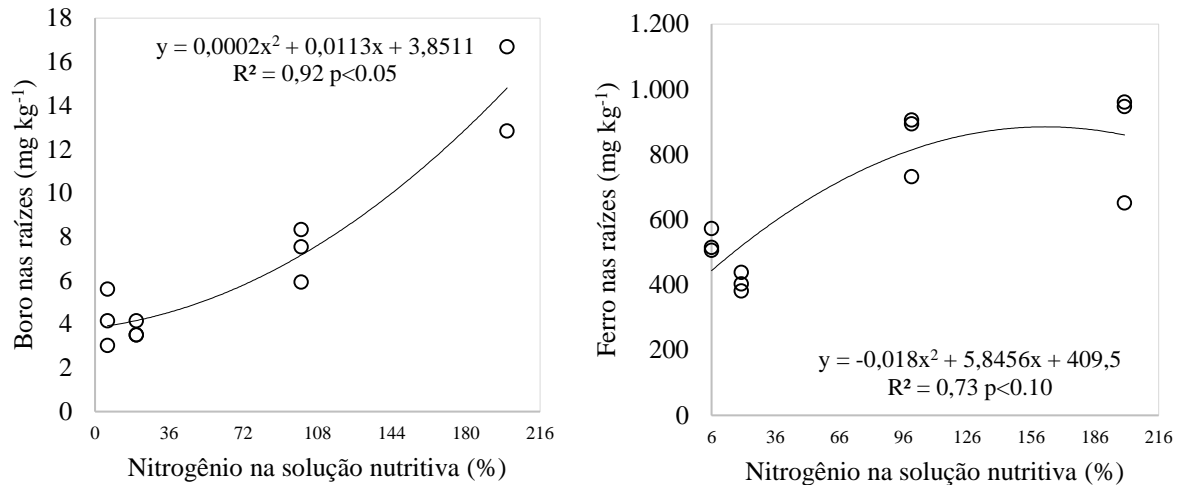


Figura 8. Relação entre a disponibilidade de N na solução nutritiva e o teor de nutrientes nas raízes (A) Boro, (B) Ferro

1.6.2 Potássio

Em condições de fornecimento deficiente de potássio, em média, o capim-marandu apresentou a seguinte ordem de acúmulo no limbo foliar $N > K > Ca > S > Mg > P > Fe > Mn > Zn > B > Cu$ e em condições de adequado ou excessivo fornecimento de potássio, o acúmulo dos nutrientes seguiu a seguinte ordem $K > N > Ca > S > Mg > P > Fe > Mn > Zn > B > Cu$, sendo este cenário, o K foi o nutriente de maior exigência pelo marandu. Resultados que se repetiram independentemente da folha analisada (**Tabelas 36 e 37**).

Tabela 36. Teores médios de macronutrientes no limbo foliar em função da disponibilidade de potássio na solução nutritiva

Dose de K (%)	Nutriente					
	N	P	K	Ca	Mg	S
6	17,0 ± 0,48	1,2 ± 0,06	7,3 ± 0,32	5,4 ± 0,16	2,7 ± 0,13	3,7 ± 0,12
20	15,4 ± 0,16	1,2 ± 0,11	13,4 ± 0,30	5,5 ± 0,11	2,8 ± 0,13	3,8 ± 0,15
100	14,9 ± 0,18	1,5 ± 0,10	21,7 ± 0,54	5,2 ± 0,12	2,6 ± 0,18	3,8 ± 0,11
200	15,6 ± 0,26	1,3 ± 0,07	28,2 ± 0,76	4,5 ± 0,16	2,5 ± 0,16	3,7 ± 0,12

Tabela 37. Teores médios de micronutrientes no limbo foliar em função da disponibilidade de potássio na solução nutritiva

Dose de K %	B	Cu	Nutriente		
			Fe mg kg ⁻¹	Mn	Zn
6	17,1 ± 1,51	8,3 ± 0,72	142,7 ± 12,02	142,7 ± 17,51	27,8 ± 1,04
20	14,9 ± 1,22	8,3 ± 0,61	131,8 ± 11,34	116,2 ± 12,31	25,0 ± 0,84
100	17,4 ± 1,26	7,4 ± 0,42	174,6 ± 16,01	93,2 ± 8,80	33,5 ± 2,42
200	12,1 ± 1,51	8,7 ± 0,43	174,7 ± 14,64	102,3 ± 13,00	25,6 ± 0,81

Apesar das variações verificadas, as médias gerais dos teores verificados nos dados apresentaram-se dentro das faixas consideradas adequadas verificadas na literatura para a maioria dos nutrientes avaliados (WERNER et al., 1997). No geral, a absorção de enxofre apresentou-se acima da faixa considerada ótima para a cultura, que é de 0,8 a 2,5 g kg⁻¹, porém isso não se deve a um tratamento específico e sim ao conjunto de dados da pesquisa.

O teor de K na dose de 200% de K na solução ficou próxima ao limite superior dos teores considerados ideais para a cultura, que corresponde a 30 g kg⁻¹ de K na matéria seca. Esse teor pode indicar uma possível absorção de luxo, que é um fenômeno que ocorre quando a concentração de nutrientes aumenta em um tecido sem um aumento correspondente no rendimento (KANG et al., 2015; ZHAO et al., 2019). No próximo capítulo será discutido o efeito da taxa de K na produtividade da cultura, uma vez que a remoção de nutrientes pode superestimar a necessidades de K da cultura em função da produtividade.

A proporção entre os macros e micronutrientes na parte aérea variaram em função da disponibilidade de potássio (**Figura 9 e 10**). Os nutrientes P, K e S são extraídos em menores quantidades pelo capim. A extração de P é baixa se comparada à dos demais macronutrientes, pois apenas de 3 a 2 % do total acumulado na planta corresponde a este nutriente. A proporção de P, Ca, Mg e S na parte aérea é variou entre 34 e 21 % do total absorvido, decrescendo com o aumento da disponibilidade de K. Essa aferição é interessante para demonstrar até que ponto a disponibilidade de nutrientes nos ambientes de cultivo ou, por exemplo, um aporte extra de fertilizantes influencia nos níveis de exportação de nutrientes nos ciclos de crescimento. Tais informações podem subsidiar ajustes nas recomendações de manejo da adubação para os sistemas de produção envolvendo a cultura.

Íons que apresentam propriedades químicas similares competem por sítios de adsorção, absorção e transporte, todavia a soma total de cátions em uma planta é pouco modificada, mesmo com grandes variações na disponibilidade dos cátions no meio nutritivo. Aumentando-

se o suprimento de um cátion pode ocorrer diminuição da absorção de outras espécies catiônicas pela planta de modo que o total de cargas positivas absorvidas se mantém. Segundo Oliveira, 2001, a absorção do K pelas plantas é favorecida em comparação com outras espécies catiônicas, como Ca e Mg, sendo, dentre os cátions macronutrientes, o que se apresenta, em geral, em menor e maior concentração no solo e na planta, respectivamente, o que confirma os resultados verificados neste trabalho, mesmo em condições de baixa disponibilidade de K (dose de 6%) o K representou 20% da composição de macronutrientes da parte aérea, frente a 14% de Ca e 7% de Mg.

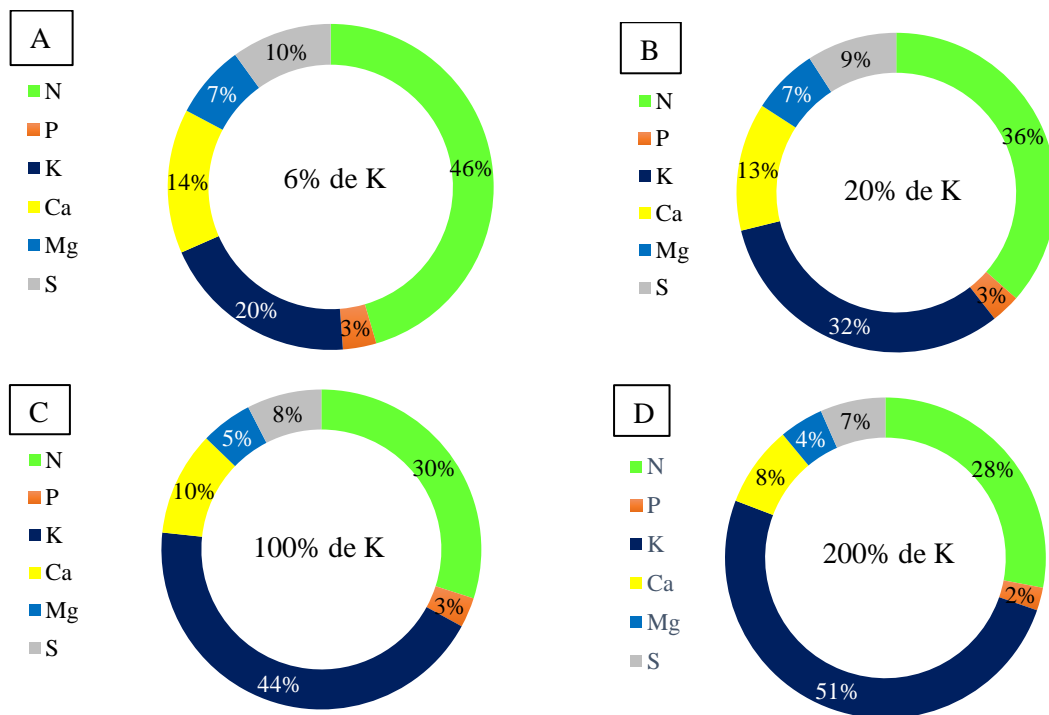
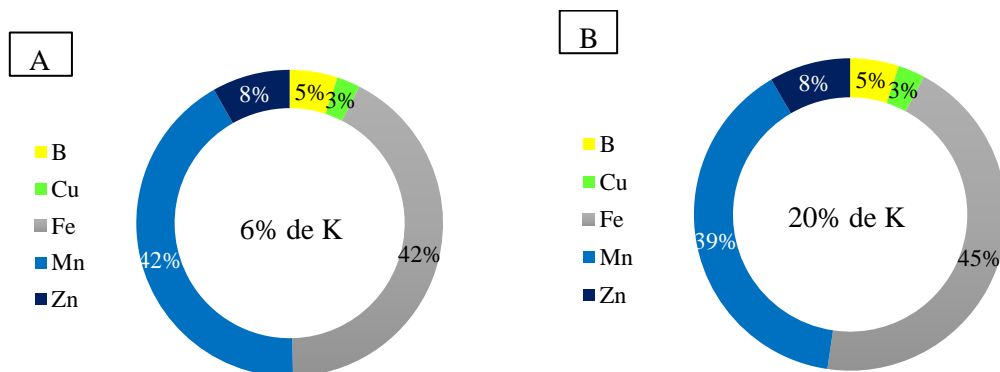


Figura 9. Composição (%) dos macronutrientes no limbo foliar em função do fornecimento de potássio na solução nutritiva (A) 6% (B) 20%, (C) 100% e (D) 200%



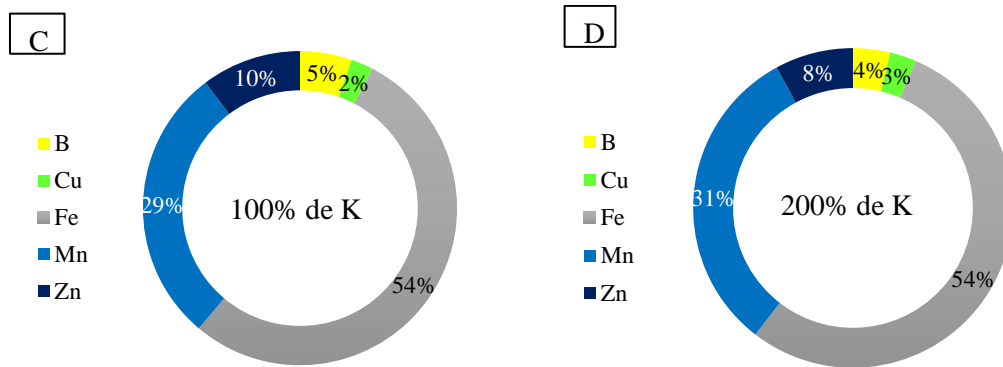


Figura 10. Composição (%) dos micronutrientes no limbo foliar em função do fornecimento de potássio na solução nutritiva (A) 6% (B) 20%, (C) 100% e (D) 200%

Analisando-se as raízes, em condições de deficiência de potássio o capim-marandu apresentou a seguinte ordem de acúmulo de nutrientes $N > Mg > K > S > Ca > P > Fe > Mn > Cu > Zn > B$. Em condições de adequado ou excessivo fornecimento de K, a ordem de acúmulo foi de $K > N > S > Ca = Mg > P > Fe > Mn > Cu > Zn > B$ (Tabelas 38 e 39).

Nesta pesquisa, as concentrações de N nas raízes variaram entre $5,5 \text{ g kg}^{-1}$ e $9,4 \text{ g kg}^{-1}$, com uma média de $7,3 \text{ g kg}^{-1}$ para as plantas cultivadas em condições de adequado fornecimento de K (Dose 100%). As concentrações de P variaram entre $0,6 \text{ g kg}^{-1}$ e $1,2 \text{ g kg}^{-1}$, com uma média de $0,9 \text{ g kg}^{-1}$ para a dose de K de 100%. As concentrações de K variaram entre $9,2 \text{ g kg}^{-1}$ e $1,8 \text{ g kg}^{-1}$, com uma média de $6,6 \text{ g kg}^{-1}$ para a dose de K de 100%. As concentrações de Ca apresentaram pequena variação em função das doses de K, com teores entre $1,6 \text{ g kg}^{-1}$ e $1,8 \text{ g kg}^{-1}$, com uma média de $1,7 \text{ g kg}^{-1}$ para a dose de K de 100%. As concentrações de Mg variaram entre $1,6 \text{ g kg}^{-1}$ e $2,6 \text{ g kg}^{-1}$, com uma média de $1,6 \text{ g kg}^{-1}$ para a dose de K de 100%. Os teores de S foram semelhantes em condições de deficiência de K (Doses 6% e 20%) sendo de $1,9 \text{ g kg}^{-1}$ e em condições de adequado ou alto fornecimento de K (Doses 100% e 200%) foram de $2,1 \text{ g kg}^{-1}$ em média.

Tabela 38. Teores médios de macronutrientes nas raízes em função da disponibilidade de potássio na solução nutritiva

Dose de K (%)	Nutriente					
	N	P	K	Ca	Mg	S
6	$9,4 \pm 0,64$	$1,2 \pm 0,01$	$1,8 \pm 0,14$	$1,6 \pm 0,14$	$2,3 \pm 0,14$	$1,9 \pm 0,02$
20	$8,1 \pm 0,24$	$1,0 \pm 0,06$	$2,7 \pm 0,09$	$1,8 \pm 0,11$	$2,6 \pm 0,48$	$1,9 \pm 0,01$
100	$7,3 \pm 0,19$	$0,9 \pm 0,06$	$6,6 \pm 0,57$	$1,7 \pm 0,09$	$1,6 \pm 0,11$	$2,1 \pm 0,01$
200	$5,5 \pm 0,28$	$0,6 \pm 0,01$	$9,2 \pm 0,13$	$1,6 \pm 0,08$	$1,7 \pm 0,01$	$2,1 \pm 0,02$

Erro padrão (n=3)

Tabela 39. Teores médios de micronutrientes nas raízes em função da disponibilidade de potássio na solução nutritiva

Dose de K %	B	Cu	Nutriente		
			Fe mg kg ⁻¹	Mn	Zn
6	4,4 ± 1,46	14,5 ± 1,44	502,6 ± 12,69	289,9 ± 11,32	15,6 ± 0,07
20	9,6 ± 2,16	29,9 ± 0,67	483,3 ± 15,81	315,8 ± 4,67	16,0 ± 0,54
100	6,4 ± 1,73	39,7 ± 2,62	467,0 ± 20,77	324,1 ± 17,19	16,3 ± 0,08
200	5,2 ± 1,15	39,0 ± 2,87	539,7 ± 9,38	335,1 ± 5,68	17,0 ± 0,06

Erro padrão (n=3)

Relata-se alterações nas concentrações de N nas raízes, assim como verificado na parte aérea, em função da variação do suprimento de K, ocorrendo um decréscimo na proporção de N no tecido vegetal em função do acréscimo da disponibilidade de potássio para as plantas. Dentre os micronutrientes, o Fe é o mais requerido seguido pelo manganês. Estes elementos juntos correspondem a mais de 90% do teor de micronutrientes nas raízes (**Figuras 16 e 17**).

Comparando-se a quantidade de nutrientes presentes na parte aérea e nas raízes nota-se que a maior parte do potássio está presente na parte aérea do marandu, assim como os demais macronutrientes. Para o fosforo, a diferença de concentração verificada na parte aérea e raízes é menor, apesar disso, os maiores teores também são verificados na parte aérea das plantas. Para os micronutrientes, verifica-se comportamento distinto, com os maiores teores observados na parte aérea das plantas, para B e Zn enquanto que para Cu, Fe e Mn as maiores concentrações foram observadas nas raízes.



Figura 11. Composição (%) dos macronutrientes nas raízes em função do fornecimento de potássio na solução nutritiva (A) 6% (B) 20%, (C) 100% e (D) 200%

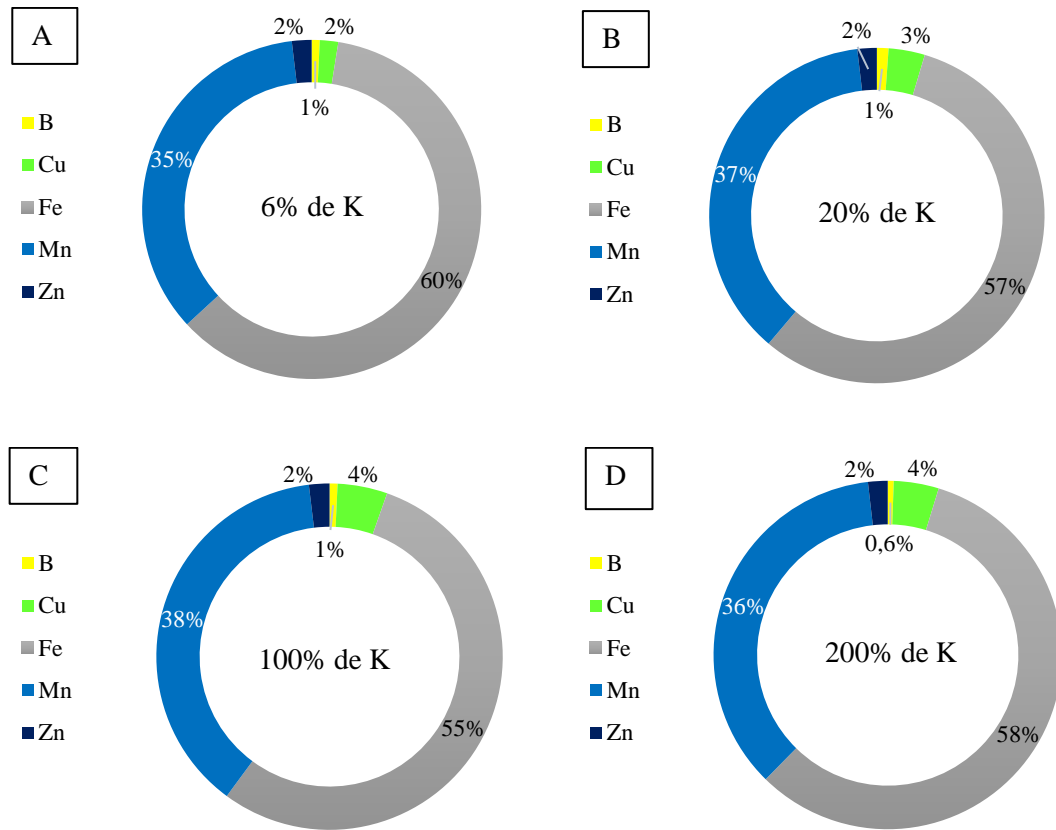


Figura 12. Composição (%) dos micronutrientes nas raízes em função do fornecimento de potássio na solução nutritiva (A) 6% (B) 20%, (C) 100% e (D) 200%

A disponibilidade de potássio afetou significativamente os teores de nitrogênio, magnésio e enxofre na parte aérea das plantas, mostrando significância para a interação dose*ciclo ($p < 0,05$). O teor de Ca nas folhas variou em função das doses de K e na F₂ variou também em função do ciclo de crescimento (**Tabela 40**). Não houve influência da disponibilidade de potássio sobre a absorção de fosforo pelas plantas.

Tabela 40. Resultados da análise de variância para os macronutrientes N, P, Ca, Mg e S nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) e F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu submetido a doses de adubação potássica.

Fonte de variação	Nutriente					
	N	P	K	Ca	Mg	S
F₁						
Dose de K (D)	0,0001**	0,1524 ^{ns}	<0001**	0,0031**	0,5261 ^{ns}	0,9877 ^{ns}
Ciclo de crescimento (C)	0,0034**	0,3202 ^{ns}	0,1105 ^{ns}	0,8925 ^{ns}	0,0323*	0,4502 ^{ns}
Interação D*C	0,0009**	0,1399 ^{ns}	0,4812 ^{ns}	0,3414 ^{ns}	0,0302*	0,7089 ^{ns}
F₂						
Dose de K (D)	0,0021**	0,5214 ^{ns}	<0001**	0,0073**	0,2072 ^{ns}	0,3557 ^{ns}

Ciclo de crescimento (C)	0,5149 ^{ns}	0,1347 ^{ns}	0,0341 *	0,0315 *	<0,0001 ^{**}	0,0295*
Interação D*C	0,0229 *	0,8546 ^{ns}	0,1858 ^{ns}	0,4314 ^{ns}	0,0042 **	0,0241 *

Nível de significância: *p<.05, **p<0.01, ^{ns}não significativo.

A análise de variância para B, Cu, Fe, Mn e Zn nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) e F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu demonstrou que a adubação potássica afetou o acúmulo de todos os micronutrientes na parte aérea (**Tabela 41**). Para o B, Mn, Zn e Cu houve interação entre dose de K e ciclo de crescimento. Para o Fe verificou-se efeito da dose de K bem como do ciclo de crescimento.

Tabela 41. Resultados da análise de variância para os micronutrientes B, Cu, Fe, Mn e Zn nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) e F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu submetido a doses de adubação potássica.

Fonte de variação	Nutriente				
	B	Cu	Fe	Mn	Zn
F₁					
Dose de K (D)	<0,0001**	0,5053 ^{ns}	0,0523 †	<0,0001**	0,7056 ^{ns}
Ciclo de crescimento (C)	<0,0001**	0,0240*	<0,0001**	<0,0001**	0,0129 *
Interação D*C	0,0126 *	0,0742	0,1798 ^{ns}	0,0003 **	0,6512 ^{ns}
F₂					
Dose de K (D)	0,0049 **	0,5483 ^{ns}	0,0233 *	0,0001**	<0,0001**
Ciclo de crescimento (C)	0,0006 **	0,0167 *	0,0004 **	<0,0001**	0,2997 ^{ns}
Interação D*C	0,1028 ^{ns}	0,8559 ^{ns}	0,7901 ^{ns}	0,0012 **	0,0123 *

Nível de significância: *p<.05, **p<0.01, †p<.10, ^{ns}não significativo.

A análise de correlação entre potássio e os nutrientes nas F₁ e F₂ apresentou resultados congruentes para N, Ca e Fe, sendo uma correlação negativa para N (p<.05) e Ca (p<0.01) e uma correlação positiva para o Fe (F₁= p<0.01 e F₂= p<.05). Para os demais macros e micronutrientes analisados não foram constatadas correlações significativas (**Tabela 42**).

Tabela 42. Correlação entre o potássio e os teores de minerais nas folhas em capim marandu

Folha	Nutriente									
	N	P	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Coefficiente de correlação										
F1	-0,34*	0,07 ^{ns}	-0,50**	-0,15 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,34**	-0,26 ^{ns}	-0,22 ^{ns}
F2	-0,37*	0,17 ^{ns}	-0,48**	-0,11 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	0,31*	-0,11 ^{ns}	0,08 ^{ns}

Nível de significância: *p<.05, **p<0.01, †p<.10, ^{ns}não significativo.

Para o N nota-se que a variação do comportamento entre os ciclos de crescimento é pouco variável, ocorrendo diferença estatística entre ciclos apenas em situação de deficiência extrema de K (Dose de 6%) independentemente da folha analisada (**Tabelas 43 e 44**), entretanto

é demonstrado na literatura que as quantidades absorvidas de um dado nutriente podem variar, dentre outros fatores, pela relação da disponibilidade entre nutrientes no meio e isto foi constatado para os teores de N em função das doses de K. O aumento da disponibilidade de K para as plantas proporcionou redução significativa nos teores de N pelo capim-marandu, na F₁ em todos os ciclos avaliados. A amplitude de variação de N entre as doses estudadas foram de 18,9 g kg⁻¹ (dose 6%K) a 14,9 g kg⁻¹ (dose 100%K) no primeiro ciclo, de 17,1 g kg⁻¹ (dose 6%K) a 15,0 g kg⁻¹ (dose 100%K) no segundo ciclo e entre 16,9 g kg⁻¹ (dose 6%K) e 14,3 g kg⁻¹ (dose 100%K) no terceiro ciclo, confirmando a correlação negativa para a folha 1 demonstrada anteriormente. Segundo Daliparthy, Barker e Modal, 2008 existe um efeito antagônico entre a absorção de K e NH₄, no qual a absorção de K é restrita.

Tabela 43. Teores de N nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação potássica e ciclos de corte.

Dose de K (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
	Nitrogênio (g kg ⁻¹)		
6	18,9 ± 0,55 ^{Aa}	17,1 ± 0,41 ^{Ab}	16,9 ± 0,35 ^{Ab}
20	16,9 ± 0,19 ^{Aa}	16,8 ± 0,35 ^{Aa}	16,1 ± 0,19 ^{Aa}
100	14,9 ± 0,64 ^{Ba}	15,0 ± 0,35 ^{Ba}	14,3 ± 0,25 ^{Ba}
200	15,2 ± 0,93 ^{Ba}	15,5 ± 0,22 ^{Ba}	15,0 ± 0,44 ^{Ba}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

Para a folha 2 os resultados seguiram a mesma tendência, no geral os maiores teores de nitrogênio foram observados nas folhas das plantas submetidas a deficiência de potássio. O teor médio de N em plantas submetidas a deficiência extrema de K (dose de 6%) foi de 17,8 g kg⁻¹ ao longo dos ciclos, já na dose completa de K (dose de 6%) de 14,8 g kg⁻¹, uma diferença redução equivalente a 16,9% ou 3 g kg⁻¹.

Tabela 44. Teores de N nas lâminas foliares F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação potássica e ciclos de corte

Dose de K (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
	Nitrogênio (g kg ⁻¹)		
6	18,6 ± 0,84 ^{Aa}	16,7 ± 0,74 ^{Ab}	18,0 ± 1,40 ^{Aa}
20	15,2 ± 0,19 ^{Ba}	15,7 ± 0,32 ^{Aa}	15,9 ± 0,64 ^{Aa}
100	14,3 ± 0,18 ^{Ba}	15,5 ± 0,38 ^{Aa}	14,6 ± 0,44 ^{Ba}
200	15,3 ± 0,80 ^{Ba}	15,3 ± 0,56 ^{Aa}	15,4 ± 0,90 ^{Ba}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

O aumento das doses de potássio na solução resultou em um aumento de acúmulo de K na parte aérea (Tabelas 45 e 46). Cultivando *Brachiaria brizantha* cv. Marandu em solução nutritiva com omissões de macronutrientes, Monteiro et al. (1995) constataram que na omissão de potássio, a concentração desse nutriente na parte aérea era de 4,3 g kg⁻¹ e nas raízes de 3,6 g kg⁻¹, as quais foram mais baixas daquelas do tratamento completo que atingiram 28,0 e 25,0 g kg⁻¹, respectivamente. Mattos (1997) conduziu dois experimentos em casa-de-vegetação com solução nutritiva, avaliando a diagnose nutricional de potássio em *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk e *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. Verificou que o incremento de potássio na solução proporcionou aumentos na produção de massa seca da parte aérea, das raízes, no perfilhamento e na concentração de potássio nos componentes da parte aérea e nas raízes das duas espécies, resultados que corroboram com os verificados neste estudo, ficando claro o aumento da absorção em função das doses e seus reflexos sobre os parâmetros produtivos da cultura (parte aérea e raízes).

Tabela 45. Teores de K nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu em função da adubação potássica

Dose de K (%)	K g kg ⁻¹
6	7,2 ± 0,32 ^D
20	12,8 ± 0,44 ^C
100	21,5 ± 0,36 ^B
200	28,0 ± 0,36 ^A

Tabela 46. Teores de K nas lâminas foliares F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu em função da adubação potássica

Dose de K (%)	K g kg ⁻¹
6	7,5 ± 0,32 ^D
20	13,9 ± 0,44 ^C
100	21,8 ± 0,36 ^B
200	28,2 ± 0,36 ^A

Tabela 47. Teores de K nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu em função da adubação potássica

Ciclo de crescimento	K g kg ⁻¹
Ciclo 1	19,2 ± 0,32 ^A
Ciclo 2	17,4 ± 0,44 ^{AB}
Ciclo 3	17,1 ± 0,36 ^B

A interação entre potássio x cálcio e magnésio é amplamente discutida na literatura sendo que o aumento no teor de K na solução causa diminuição dos teores de Ca e Mg nas plantas, resultados que corroboram com os obtidos neste estudo (**Tabelas 47, 48, 49 e 50**) podendo ser explicado pelo efeito de diluição, segundo Rosolem, 2005. Plantas bem nutridas em K apresentam maior desenvolvimento vegetativo, sendo que mesmo com o efeito da diminuição dos teores de Ca e Mg pode não ocorrer redução no crescimento ou na produtividade das mesmas, contudo, se os teores de K forem excessivamente altos podem ocorrer danos pela intensificação do efeito da diluição. Os teores de cálcio na F₁ foram inferiores aos verificados na F₂. Apesar dos teores de Ca estarem dentro da faixa adequada (3,0 a 6,0 g kg⁻¹) os menores teores aparecem primeiramente nas folhas mais novas da planta isto pode ser explicado pelo fato de que o Ca é relativamente imóvel nas plantas (MALAVOLTA, 2010), em consequência de sua baixa mobilidade, os sintomas de carência aparecem primeiramente nas folhas e órgãos ou regiões novas da planta. Resultados observados corroboram com os observados por CARMEIS FILHO et al 2017 no qual as concentrações de Ca, Mg e S na parte aérea diminuíram com o aumento das taxas de K.

Tabela 48. Teor de Ca nas lâminas foliares F₁ e F₂ (mais jovem e segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu em função da adubação potássica.

Dose de K (%)	Folha	
	F ₁	F ₂
	Ca (g kg ⁻¹)	
6	5,0 ± 0,33 ^A	5,7 ± 0,39 ^A
20	5,3 ± 0,18 ^A	5,6 ± 0,33 ^A
100	5,1 ± 0,24 ^A	5,4 ± 0,32 ^A
200	4,3 ± 0,40 ^B	4,8 ± 0,35 ^B

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=9).

Tabela 49. Teor de Ca nas lâminas foliares F₂ (mais jovem e segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu em função do ciclo de crescimento

Ciclo de crescimento	Ca g kg ⁻¹
Ciclo 1	5,2 ± 0,32 ^B
Ciclo 2	5,8 ± 0,44 ^A
Ciclo 3	5,2 ± 0,36 ^B

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=12).

As plantas absorvem os minerais Mg e K apenas na forma catiônica (Mg²⁺ e K⁺). Altas concentrações de K na solução do solo inibem a absorção de Mg e podem induzir a deficiência de Mg nas plantas (SALMON 1963, HEENAN e CAMPBELL 1981). Nesta pesquisa o antagonismo entre o potássio e o magnésio foi observado no segundo e terceiro ciclo de crescimento, para ambas as folhas analisadas (**Tabelas 50 e 51**). No geral, a proporção de K, Ca e Mg pelos nutrientes disponíveis para absorção na solução do solo (LOIDE, 2004). Em avaliação dos efeitos da adubação potássica sobre o capim-elefante (*Pennisetum purpureum* schum.) ANDRADE et al., 2000 verificaram redução nos teores de magnésio na lâmina foliar de 1,9 para 1,0 g/kg entre a menor e a maior dose de K. Os autores sugerem que a redução ocorrida no teor de Mg em decorrente da adubação potássica seja decorrente da absorção competitiva entre estes elementos. K e Mg estão mutuamente envolvidos em uma série de processos fisiológicos, incluindo a ativação de várias enzimas e a regulação do equilíbrio cátion-ânion (MARSCHNER, 2012). Lavres Júnior (2001) verificou que a concentração de magnésio nas lâminas de folhas recém-expandidas foi reduzida em função do aumento no suprimento de potássio. Normalmente o Mg não é usado em adubações, mas na calagem, e o uso de K em doses elevadas pode levar à deficiência de Mg (MARSCHNER, 1995). Segundo Daliparthy, Barker e Modal, 1994 a deficiência de magnésio (Mg) ou cálcio (Ca) ocorre a partir do antagonismo de íons em solos ácidos após a fertilização com K e em solos com K altamente trocável.

Tabela 50. Teores de Mg nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação potássica e ciclos de corte.

Dose de K (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
	Magnésio (g kg ⁻¹)		
6	2,3 ± 0,09 ^{Ba}	2,9 ± 0,44 ^{Aa}	2,8 ± 0,20 ^{Aa}
20	2,9 ± 0,13 ^{Aa}	2,2 ± 0,26 ^{Ba}	2,9 ± 0,38 ^{Aa}
100	3,2 ± 0,32 ^{Aa}	2,0 ± 0,12 ^{Bb}	2,2 ± 0,35 ^{Bb}

200 $3,0 \pm 0,19$ ^{Aa} $2,0 \pm 0,15$ ^{Bb} $2,1 \pm 0,43$ ^{Bb}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

Tabela 51. Teores de Mg nas lâminas foliares F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação potássica e ciclos de corte

Dose de K (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
	Magnésio (g kg ⁻¹)		
6	$2,3 \pm 0,29$ ^{Bb}	$2,9 \pm 0,22$ ^{Aab}	$3,2 \pm 0,40$ ^{Aa}
20	$3,0 \pm 0,17$ ^{Ab}	$2,6 \pm 0,18$ ^{Ab}	$3,5 \pm 0,15$ ^{Aa}
100	$3,4 \pm 0,19$ ^{Aa}	$1,7 \pm 0,03$ ^{Bb}	$3,1 \pm 0,22$ ^{Ba}
200	$3,0 \pm 0,52$ ^{Aa}	$1,8 \pm 0,09$ ^{Bb}	$3,0 \pm 0,19$ ^{Ba}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

Os teores de S na F₂ variaram em função da interação entre as doses de K e o ciclo de crescimento (**Tabela 52**) sendo que os teores de S da forragem ficaram acima da faixa adequada da cultura em todos os tratamentos e ciclos de crescimento (WERNER et al., 1996). A fonte de S na solução nutritiva deste estudo mesma utilizada nos demais apresentados neste trabalho, ou seja, MgSO₄.7H₂O, portanto descarta-se a hipótese que este aumento seja proveniente do meio de cultivo. Segundo ORTEGA; MALAVOLTA, 2012 um efeito negativo da adubação com K foi verificado na absorção de S pelas plantas, justificam que esta resposta está relacionada a um efeito antagônico entre o Cl de KCl e SO₄, com os resultados obtidos neste estudo este efeito não pode ser confirmado.

Tabela 52. Teores de S nas lâminas foliares F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação potássica e ciclos de corte.

Dose de K (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
	Enxofre (g.kg ⁻¹)		
6	$4,2 \pm 0,12$ ^{Aa}	$3,6 \pm 0,19$ ^{Bab}	$3,4 \pm 0,15$ ^{Bb}
20	$4,3 \pm 0,22$ ^{Aa}	$3,4 \pm 0,22$ ^{Bb}	$4,3 \pm 0,61$ ^{Aa}
100	$4,2 \pm 0,28$ ^{Aa}	$3,4 \pm 0,20$ ^{Bb}	$3,6 \pm 0,21$ ^{ABb}
200	$3,7 \pm 0,18$ ^{Aab}	$4,2 \pm 0,13$ ^{Aa}	$3,1 \pm 0,15$ ^{Bb}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

Houve relação entre os teores de B na parte aérea e os teores de K na solução, com diferentes respostas entre os teores verificados na F1 e F2 para este nutriente (**Tabela 53, 54 e 55**). Devido à sobreposição de papéis desempenhados por K e B na fisiologia vegetal, os efeitos desses dois nutrientes vegetais no desenvolvimento da planta são significativos. Ambos K e B servem como tampões e são necessários para a manutenção dos tecidos condutores (MENGEL e KIRKBY, 2001). Segundo Quaggio et. al, (2011) a medida que se aumenta o teor de potássio nas lâminas foliares de citros o teor de boro se reduz, resultados que corroboram com os verificados na F2 o que nos leva a ter mais atenção ao manejo de B em áreas de alto teor de K, independentemente da cultura estudada. A maior disponibilidade de K impactou na absorção de B na planta sendo que os teores foram de 29,9, 17,1, 15,0 e 12,9 g kg⁻¹ nas doses de 6, 20, 100 e 200% de K, respectivamente.

Tabela 53. Teores de B nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação potássica e ciclos de corte.

Dose de K (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
	Boro (mg kg ⁻¹)		
6	11,1 ± 0,32 ^{Bb}	15,8 ± 1,72 ^{Ba}	10,1 ± 1,41 ^{Bb}
20	14,8 ± 0,58 ^{Aa}	16,4 ± 0,47 ^{Ba}	7,3 ± 0,84 ^{Bb}
100	16,4 ± 1,98 ^{Ab}	21,0 ± 1,90 ^{Aa}	16,2 ± 2,46 ^{Ab}
200	9,0 ± 0,35 ^{Cb}	17,9 ± 0,84 ^{ABa}	4,11 ± 0,69 ^{Cc}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

Tabela 54. Teor B nas lâminas foliares F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu em função da adubação potássica.

Dose de K (%)	B mg kg ⁻¹
6	21,9 ± 1,67 ^A
20	17,1 ± 1,08 ^B
100	15,0 ± 0,97 ^C
200	12,9 ± 0,68 ^D

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=9).

Tabela 55. Teor B nas lâminas foliares F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu em função do ciclo de crescimento

Ciclo de crescimento	B mg kg ⁻¹
Ciclo 1	15,6 ± 2,64 ^B
Ciclo 2	21,9 ± 1,85 ^A
Ciclo 3	14,9 ± 4,22 ^B

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=12).

Os teores de Cu nas folhas não foram influenciados pelo teor de K na solução, ocorrendo diferenças de absorção somente entre os ciclos de crescimento. No ciclo 1 o teor médio de Cu na F₁ foi de 8,8 mg Kg⁻¹ e na F₂ de 9,8 mg kg⁻¹, no ciclo 2 os teores foram de 6,6 mg Kg⁻¹ na F₁ e de 6,9 mg kg⁻¹ na F₂ e no último ciclo estudado o teor na F₁ foi de 8,4 mg Kg⁻¹ e na F₂ de 8,5 mg kg⁻¹ (**Tabela 56**).

Tabela 56. Teores de Cu nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação potássica e ciclos de corte.

Ciclo de crescimento	Folha	
	F ₁	F ₂
	Cu (mg kg ⁻¹)	
Ciclo 1	8,8 ± 1,28 ^A	9,8 ± 1,13 ^A
Ciclo 2	6,6 ± 0,70 ^B	6,9 ± 0,68 ^B
Ciclo 3	8,4 ± 1,50 ^A	8,5 ± 1,03 ^{AB}

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=12).

Analisando-se o Fe nas folhas verifica-se uma tendência de aumento deste elemento em função do aumento da disponibilidade de K no meio de cultivo (Tabela 51). Na F₁ os teores variaram entre 135,5 mg kg⁻¹ (Dose 20% K) e 180,1 mg kg⁻¹ (Dose 200% K). Na F₂ os teores variaram entre 128,0 mg kg⁻¹ (Dose 20% K) e 202,7 mg kg⁻¹ (Dose 100% K). Em média, em condições de deficiência os maiores teores foram verificados na F₁. Houve uma redução nos teores de Fe no tecido foliar em função dos ciclos de crescimento estudados (**Tabelas 56 e 57**). Segundo (UJWALA RANADE-MALVI, 2011) o K apresenta relações sinérgicas diretas com o ferro e manganês.

Tabela 57. Teor de Fe nas lâminas foliares F₁ e F₂ (primeira e segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu em função da disponibilidade de potássio

Dose de K (%)	F ₁	F ₂
	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
6	143,2 ± 15,2 ^B	142,2 ± 23,52 ^B
20	135,5 ± 13,24 ^B	128,0 ± 23,20 ^B
100	146,4 ± 20,97 ^B	202,7 ± 26,84 ^A

200	180,1 ± 18,7 ^A	179,3 ± 40,76 ^A
-----	---------------------------	----------------------------

Letras comparam as médias nas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=9).

Tabela 58. Teor de Fe nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu em função do ciclo de crescimento

Ciclo de crescimento	Fe mg kg ⁻¹
Ciclo 1	168,7 ± 19,04 ^A
Ciclo 2	183,8 ± 13,52 ^A
Ciclo 3	101,4 ± 19,98 ^B

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=12).

Os teores de Mn variaram em função da interação dose de K e ciclo de crescimento para ambas as folhas analisadas (p<0.01) Para a F₁ nos ciclos 1 e 2 os maiores teores de Mn foram verificados em condições de deficiência severa de K e não diferiram estatisticamente entre si no ciclo 3 (**Tabela 59**). Para a F₂, os resultados foram semelhantes nos ciclos 1 e 2 sendo que os maiores teores de Mn foram verificados em condições de deficiência severa de K e não diferiram estatisticamente entre si no ciclo 3 (**Tabela 59**).

Tabela 59. Teores de Mn nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação potássica e ciclos de corte

Dose de K (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
	Mn (mg kg ⁻¹)		
6	143,8 ± 14,04 ^{Ab}	214,9 ± 24,23 ^{Aa}	49,3 ± 0,56 ^{Ac}
20	93,5 ± 8,90 ^{Bb}	160,8 ± 12,09 ^{Ba}	42,2 ± 2,19 ^{Ac}
100	97,5 ± 12,05 ^{Ba}	107,1 ± 7,22 ^{Ca}	50,6 ± 2,28 ^{Ab}
200	110,2 ± 12,45 ^{Ba}	97,9 ± 13,25 ^{Ca}	46,3 ± 2,73 ^{Ab}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

Tabela 60. Teor de Mn nas lâminas foliares F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação potássica e ciclos de corte.

Dose de K (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
	Mn (mg kg ⁻¹)		
6	207,8 ± 6,39 ^{Aa}	190,8 ± 12,32 ^{Aa}	49,4 ± 1,71 ^{Ab}
20	171,4 ± 26,15 ^{Ca}	152,1 ± 3,11 ^{Ba}	70,3 ± 11,30 ^{Ab}
100	146,7 ± 18,21 ^{Da}	106,5 ± 3,37 ^{Cb}	51,4 ± 3,94 ^{Ac}
200	201,7 ± 1,91 ^{Ba}	112,5 ± 3,97 ^{Cb}	45,4 ± 1,99 ^{Ac}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

Os teores de Zn na F1 variaram apenas em função do ciclo de crescimento, com aumento nos teores a cada ciclo avaliado (**Tabela 61**). Na F2 houve interação entre dose de K e ciclo de crescimento (**Tabela 62**). Todos os teores de Zn estudados estavam dentro da faixa adequada para a cultura que é de 20 a 50 mg kg⁻¹. Na F2 os maiores teores de Zn foram verificados na dose de 100% de K, demonstrando que um adequado fornecimento de K pode ser importante para o acúmulo de Zn na parte aérea do capim marandu.

Tabela 61. Teor de Zn na lâmina foliar F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu em função do ciclo de crescimento

Ciclo de crescimento	Zn mg kg ⁻¹
Ciclo 1	24,1 ± 1,12 ^B
Ciclo 2	25,3 ± 1,06 ^B
Ciclo 3	28,8 ± 1,43 ^A

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=12).

Tabela 62. Teor de Zn nas lâminas foliares F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação potássica e ciclos de corte.

Dose de K	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
	Zn (mg.kg ⁻¹)		
6	27,2 ± 1,24 ^{Ba}	28,0 ± 3,95 ^{Ba}	29,8 ± 1,41 ^{Aa}
20	23,4 ± 2,10 ^{Ba}	21,7 ± 0,23 ^{Ba}	27,5 ± 1,50 ^{Aa}
100	48,7 ± 2,59 ^{Aa}	41,4 ± 4,00 ^{Ab}	32,7 ± 2,19 ^{Ac}
200	26,7 ± 1,53 ^{Ba}	24,1 ± 1,56 ^{Ba}	27,0 ± 1,70 ^{Aa}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

A interação de nutrientes com K pode ocorrer na planta ou no solo. A concentração média geral de N nas raízes diminuiu com o aumento do fornecimento de K (p<0.01), assim como para os nutrientes P (p<0.01), e Mg (p<0.10), já para os nutrientes K e S verificou-se o efeito oposto, aumentando a concentração desses nutrientes em função do aumento da dose de K. A concentração média Ca nas raízes não foi influenciada pela adubação potássica, sendo de 1,6 g kg⁻¹ em média (**Tabela 63**). JIA et al., 2008 verificaram que com a diminuição do nível de K no meio de crescimento, as concentrações de K diminuíram significativamente nas raízes,

resultados corroboram com os verificados nesta pesquisa. A competição entre Mg^{2+} e K^+ íons para os mesmos locais de ligação na transportadora durante o processo de aquisição de íons é provavelmente refletido em efeitos negativos na captação de Mg (MORTVEDT; KHASAWNEH, 1986) o que nos auxilia no entendimento da redução de Mg em função do aumento de K na solução.

Tabela 63. Teores de macronutrientes nas raízes em função da disponibilidade de potássio na solução nutritiva

Dose de K (%)	Nutriente					
	N	P	K	Ca	Mg	S
	g kg ⁻¹					
6	9,4 ± 0,64 ^A	1,2 ± 0,01 ^A	1,8 ± 0,14 ^C	1,6 ± 0,14	2,3 ± 0,14 ^A	1,9 ± 0,02 ^B
20	8,1 ± 0,24 ^B	1,0 ± 0,06 ^B	2,7 ± 0,09 ^C	1,8 ± 0,11	2,6 ± 0,48 ^A	1,9 ± 0,01 ^B
100	7,3 ± 0,19 ^B	0,9 ± 0,06 ^B	6,6 ± 0,57 ^B	1,7 ± 0,09	1,6 ± 0,11 ^B	2,1 ± 0,01 ^A
200	5,5 ± 0,28 ^C	0,6 ± 0,01 ^C	9,2 ± 0,13 ^A	1,6 ± 0,08	1,7 ± 0,01 ^B	2,1 ± 0,02 ^A
p-valor	0,0006	<.0001	<.0001	0,5695	0.0776	<.0001

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão (n=3)

Diferenças significativas nas quantidades de remoção de todos os micronutrientes foram observadas em função da disponibilidade de K. Para o B o resultado foi semelhante ao observado na parte aérea, no qual a maior disponibilidade de K impactou na absorção de B na planta sendo que os teores nas raízes foram de 9,4, 9,6, 6,4 e 5,2 g kg⁻¹ (abaixo da faixa relatada por WERNER et al., 1997) nas doses de 6, 20, 100 e 200% de K, respectivamente. Os nutrientes Cu, Mn e Zn tiveram teores aumentados com o aumento dos teores de K na solução (**Tabela 63**). Segundo Daliparthy, Barker e Modal, 2008 com o aumento dos níveis de K aplicado ou do solo, observou-se que a severidade da deficiência de zinco (Zn) induzida por fósforo (P) no milho diminui, resultados que corroboram com os verificados neste estudo pois com o aumento do teor de K na solução houve aumento nos teores de Zn na planta e redução dos teores de P nas raízes. Foi relatado que a aplicação de K diminui os níveis de B nas plantas e aumenta a incidência de deficiência de boro (B) o que foi confirmado nessa pesquisa, ficando com os teores abaixo da faixa ótima (WERNER et al., 1997).

Tabela 64. Teores médios de micronutrientes nas raízes em função da disponibilidade de potássio na solução nutritiva

Dose de K (%)	Nutriente				
	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg kg ⁻¹				
6	9,4 ± 1,46 ^A	14,5 ± 1,44 ^C	502,6 ± 12,69 ^A	289,9 ± 11,32 ^C	15,6 ± 0,07 ^D
20	9,6 ± 2,16 ^A	29,9 ± 0,67 ^B	483,3 ± 15,81 ^B	315,8 ± 4,67 ^B	16,0 ± 0,54 ^C
100	6,4 ± 1,73 ^B	39,7 ± 2,62 ^A	467,0 ± 20,77 ^B	324,1 ± 17,19 ^B	16,3 ± 0,08 ^B
200	5,2 ± 1,15 ^C	39,0 ± 2,87 ^A	539,7 ± 9,38 ^A	335,1 ± 5,68 ^A	17,0 ± 0,06 ^A
p-valor	0,0954	<.0001	0,0480	0.0776	<.0001

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

As equações $y = -0,0176x + 9,0135$ ($p < 0.10$), $y = -0,00246x + 1,1024$ ($p < 0.10$), $y = 0,0381x + 1,9732$ ($p < 0.05$), $y = -0,0013x^2 + 0,3775x + 16,981$ ($p < 0.10$), $y = -0,0067x + 15,653$ ($p < 0.10$) representam as relações entre o fornecimento de potássio para o capim marandu e os teores de N, P, K, Cu e Zn nas raízes das plantas, respectivamente (**Figura 13**).

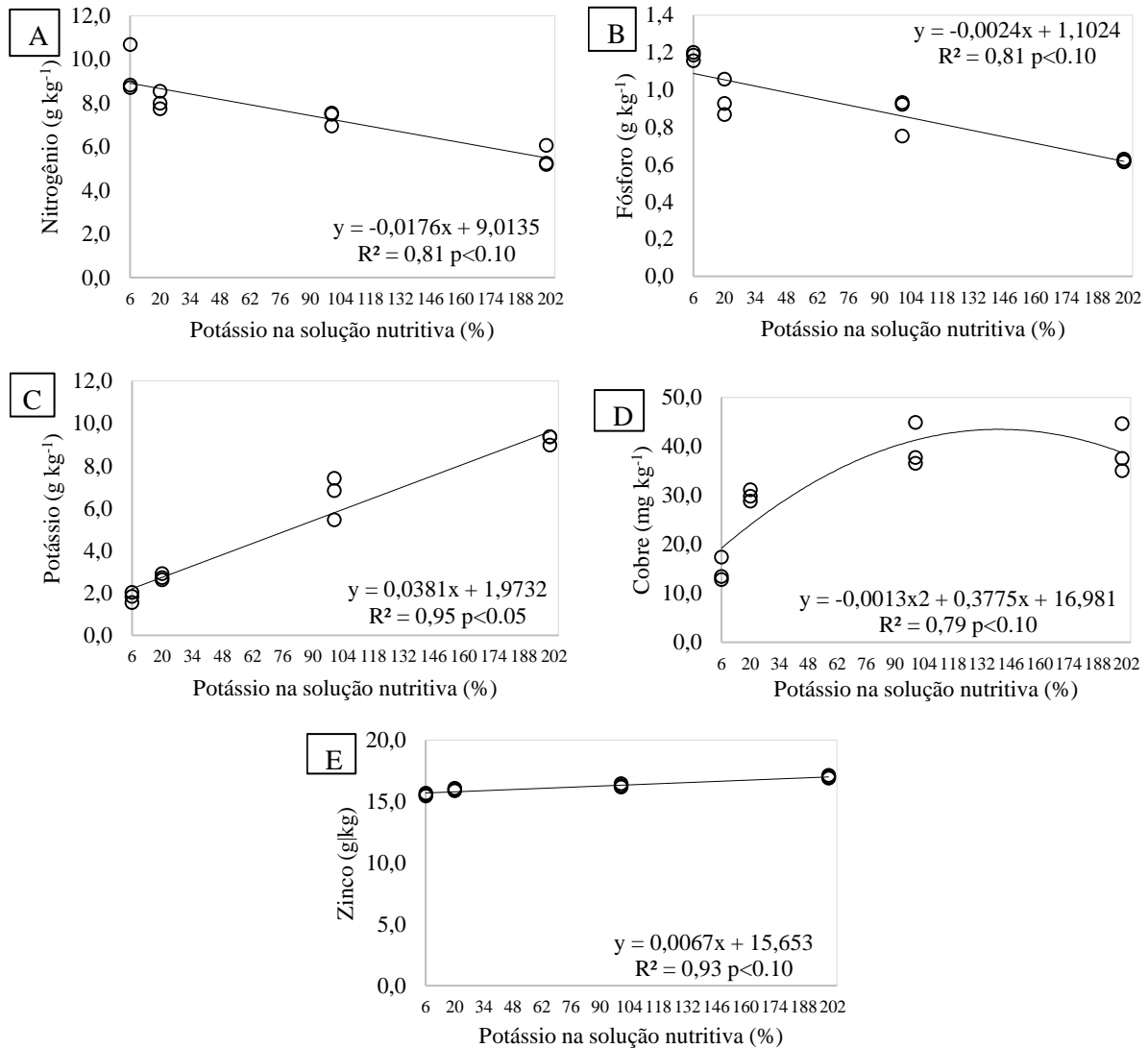


Figura 13. Relação entre a disponibilidade de K na solução nutritiva e o teor de nutrientes nas raízes (A) Nitrogênio, (B) Fósforo, (C) Potássio, (D) Cobre (E) Zinco.

2.3.4 Calcio

Neste estudo, em condições de fornecimento deficiente de Ca (Dose 6%) e em excesso (Dose 200%) o capim-marandu manifestou seguinte ordem de acúmulo no limbo foliar $N > K > Ca > P > S > Mg > Mn > Fe > Zn > B > Cu$ e em condições de deficiência moderada (Dose

20%) ou adequado fornecimento, o acúmulo dos nutrientes seguiu a seguinte ordem $K > N > Ca > P > S > Mg > Mn > Fe > Zn > B > Cu$. Identifica-se que houve alteração para a ordem de extração total de N e K. Resultados que se repetiram independentemente da folha analisada, em função disto os resultados apresentados são relativas as médias das folhas 1 e 2 (**Tabelas 64 e 65**).

A absorção média geral de N foi de $16,2 \text{ g kg}^{-1}$, a absorção de P variou entre $3,7 \text{ g kg}^{-1}$ e $4,0 \text{ g kg}^{-1}$, com média de $3,85 \text{ g kg}^{-1}$, a absorção de K variou entre $15,0 \text{ g kg}^{-1}$ e $16,9 \text{ g kg}^{-1}$, com média de $15,9 \text{ g kg}^{-1}$, a absorção de Ca variou entre $4,0 \text{ g kg}^{-1}$ e $6,5 \text{ g kg}^{-1}$, uma variação de 62,5% entre a maior (Dose 200%) e a menor dose (Dose 6%) verificadas no estudo, a absorção de Mg variou entre $1,6 \text{ g kg}^{-1}$ e $2,0 \text{ g kg}^{-1}$, com média de $1,83 \text{ g kg}^{-1}$ e o S variou entre $2,5 \text{ g kg}^{-1}$ e $2,8 \text{ g kg}^{-1}$ com média de $2,7 \text{ g kg}^{-1}$, sendo que os teores encontrados estão dentro da faixa adequada para N, K e Mg e acima para Mo, Ca, P e S (WERNER et al., 1997).

Tabela 65. Teores médios de macronutrientes no limbo foliar em função da disponibilidade de cálcio na solução nutritiva

Dose de Ca (%)	Nutriente					
	N	P	K	Ca	Mg	S
6	$16,5 \pm 1,32$	$3,7 \pm 0,15$	$16,1 \pm 1,09$	$4,0 \pm 0,29$	$1,6 \pm 0,08$	$2,6 \pm 0,17$
20	$16,3 \pm 1,26$	$3,7 \pm 0,15$	$16,9 \pm 0,99$	$4,6 \pm 0,35$	$1,9 \pm 0,09$	$2,5 \pm 0,22$
100	$15,6 \pm 1,30$	$4,0 \pm 0,07$	$15,0 \pm 0,44$	$7,1 \pm 0,31$	$1,8 \pm 0,11$	$2,8 \pm 0,16$
200	$16,3 \pm 1,45$	$4,0 \pm 0,07$	$15,6 \pm 0,64$	$6,5 \pm 0,33$	$2,0 \pm 0,13$	$2,8 \pm 0,15$

Erro padrão (n=18)

Tabela 66. Teores médios de micronutrientes no limbo foliar em função da disponibilidade de cálcio na solução nutritiva

Dose de Ca %	Nutriente				
	B	Cu	Fe	Mn	Zn
6	$20,7 \pm 1,57$	$8,4 \pm 0,60$	$93,8 \pm 5,98$	$243,1 \pm 6,91$	$37,1 \pm 0,76$
20	$19,0 \pm 1,56$	$7,7 \pm 0,81$	$107,0 \pm 8,74$	$258,7 \pm 6,04$	$44,1 \pm 2,39$
100	$22,1 \pm 1,83$	$9,7 \pm 0,81$	$122,9 \pm 10,75$	$255,4 \pm 9,36$	$50,6 \pm 4,26$
200	$21,5 \pm 2,11$	$11,4 \pm 0,75$	$133,8 \pm 12,59$	$253,9 \pm 4,67$	$40,2 \pm 2,92$

Erro padrão (n=18)

A proporção entre os macros e micronutrientes na parte aérea variaram pouco em função da disponibilidade de Ca (**Figuras 14 e 15**). Os macronutrientes primários N, P, K corresponderam a aproximadamente 80% da composição mineral do capim marandu, enquanto os macronutrientes secundários, Ca, Mg e S corresponderam a 20%. Neste cálculo, de proporção dos minerais foram considerados somente os macronutrientes. Neste estudo, o macronutriente menos absorvido foi o Mg, correspondendo a 4% do teor de macronutrientes da parte aérea. A proporção de Ca cresceu com o aumento da disponibilidade de Ca na solução e

teve pouco reflexo nos teores dos demais macronutrientes. Aparentemente, a proporção de K na parte aérea reduziu quando houve aumento nos teores de Ca, os dados da relação K e Ca serão discutidos posteriormente.

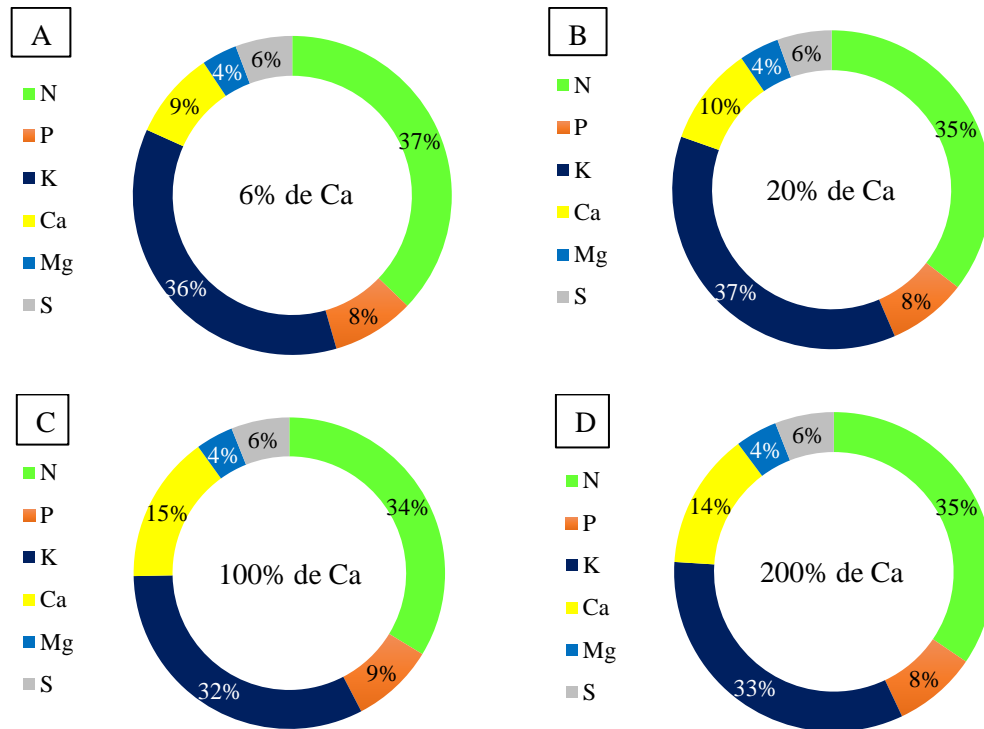


Figura 14. Composição (%) dos macronutrientes no limbo foliar em função da disponibilidade de cálcio na solução nutritiva (A) 6% (B) 20%, (C) 100% e (D) 200%

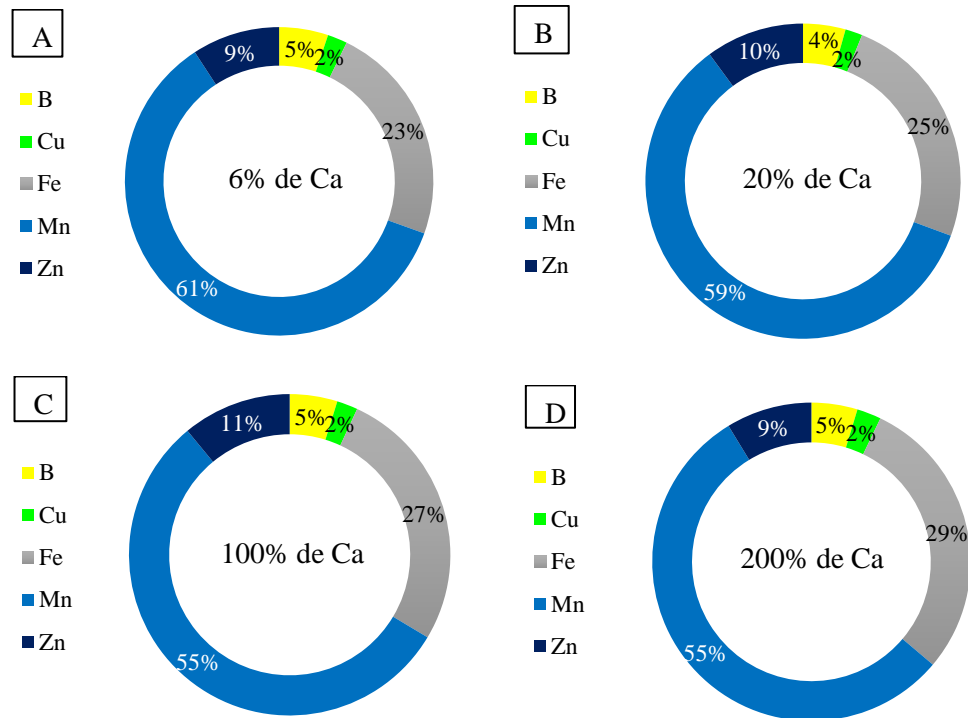


Figura 15. Composição (%) dos micronutrientes no limbo foliar em função do fornecimento de cálcio na solução nutritiva (A) 6% (B) 20%, (C) 100% e (D) 200%

O equilíbrio de nutrientes em micronutrientes é tão importante e ainda mais difícil do que o equilíbrio entre os macronutrientes. Há uma proporção pré-determinada de nutrientes que é exigida pela planta, dependendo de seu ciclo de vida, ambiente e suas características genóticas para realizar seu máximo genético potencial. Esta proporção de elementos é mais crítica do que a real concentração dos elementos individuais (UJWALA RANADE-MALVI, 2011). Neste estudo, os teores de Ca tiveram pouca influência na proporção dos micronutrientes na parte aérea (**Figura 20**). Em condições de deficiência de Ca (Dose 6% e 20%) os nutrientes nas raízes apresentaram a seguinte ordem de acúmulo $N > S > Mg > Ca > K = P > Fe > Mn > Zn > Cu > B$. Em condições de adequado ou excessivo fornecimento de Ca, a ordem de acúmulo foi de $N > Mg > Ca > K > S > P > Fe > Mn > Cu > Zn > B$ (**Tabelas 66 e 67**).

Tabela 67. Teores médios de macronutrientes nas raízes em função da disponibilidade de cálcio na solução nutritiva

Dose de Ca (%)	Nutriente					
	N	P	K	Ca	Mg	S
6	$6,1 \pm 0,33$	$0,7 \pm 0,07$	$0,5 \pm 0,05$	$1,3 \pm 0,02$	$1,2 \pm 0,15$	$2,2 \pm 0,09$
20	$6,1 \pm 0,17$	$0,7 \pm 0,07$	$0,9 \pm 0,03$	$1,7 \pm 0,06$	$2,4 \pm 0,45$	$2,4 \pm 0,12$
100	$6,0 \pm 0,40$	$0,8 \pm 0,04$	$2,5 \pm 0,04$	$1,9 \pm 0,05$	$3,8 \pm 0,34$	$2,3 \pm 0,12$
200	$6,0 \pm 0,58$	$0,7 \pm 0,05$	$1,5 \pm 0,03$	$2,4 \pm 0,08$	$3,6 \pm 0,33$	$1,9 \pm 0,01$

Erro padrão (n=3)

Tabela 68. Teores médios de micronutrientes nas raízes em função da disponibilidade de cálcio na solução nutritiva

Dose de Ca %	B	Cu	Nutriente		
			Fe mg kg ⁻¹	Mn	Zn
6	4,7 ± 0,56	37,2 ± 7,74	603,3 ± 38,98	537,1 ± 32,25	40,2 ± 1,23
20	6,5 ± 0,91	29,9 ± 2,28	656,2 ± 46,03	324,3 ± 24,33	27,4 ± 3,93
100	6,8 ± 1,75	27,0 ± 2,16	568,0 ± 29,70	287,9 ± 12,14	18,3 ± 0,27
200	7,7 ± 1,55	51,1 ± 6,91	652,4 ± 49,38	280,0 ± 5,84	17,6 ± 0,77

Erro padrão (n=3)

Diferentemente do ocorrido na parte aérea, a proporção entre os macros e micronutrientes nas raízes variaram em função da disponibilidade de Ca (**Figuras 16 e 17**). Para fins de comparação, considerando-se os teores dos nutrientes na parte aérea nas doses de 6% e 100% de Ca, o N correspondeu a 51% e 35%, o P correspondeu a 6% e 5% o K correspondeu a 4% e 14%, o Ca correspondeu a 11% em ambas as doses, o Mg correspondeu a 10% e 22% e o S a correspondeu a 18% e 13%. Nota-se as maiores diferenças para o N, K e S. Considerando-se os teores dos micronutrientes nas raízes, nas doses de 6% e 100% de Ca, para fins de comparação o Mn correspondeu a 44% e 32%, o Fe correspondeu a 49% e 62% o Zn correspondeu a 3% e 2%, o Cu correspondeu a 3% em ambas as doses e o B a correspondeu a 0,4% e 1,0% (**Figura 22**).



Figura 16. Composição (%) dos macronutrientes nas raízes em função do fornecimento de cálcio na solução nutritiva (A) 6% (B) 20%, (C) 100% e (D) 200%

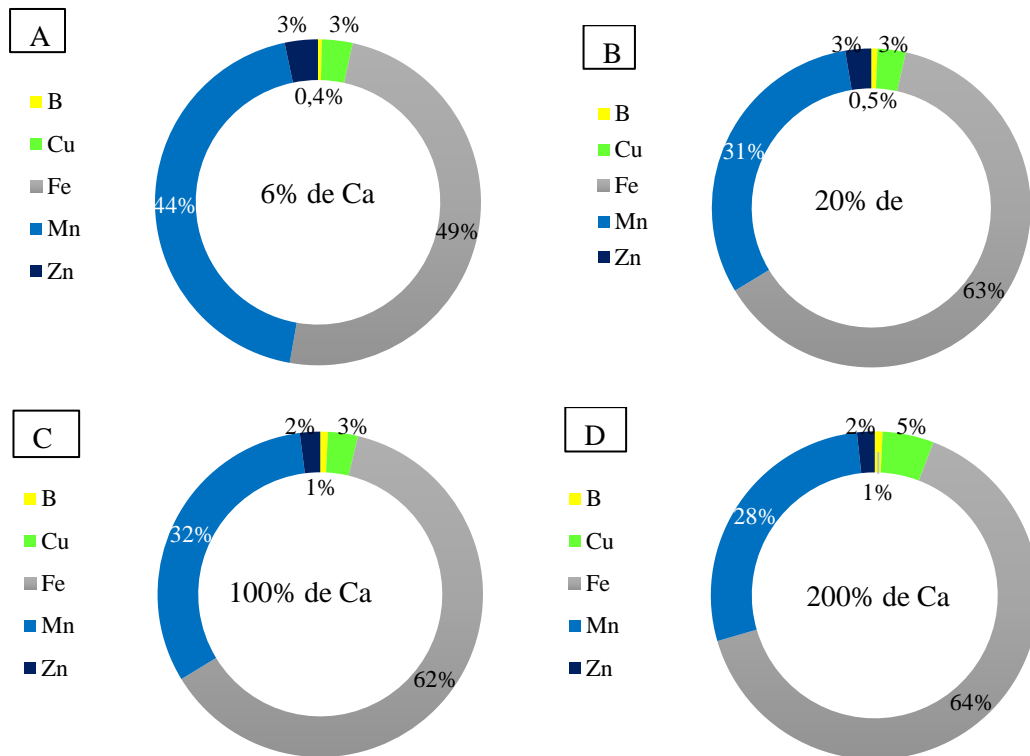


Figura 17. Composição (%) dos micronutrientes nas raízes em função do fornecimento de cálcio na solução nutritiva (A) 6% (B) 20%, (C) 100% e (D) 200%

Analisando-se estatisticamente os nutrientes na parte aérea do capim-marandu verifica-se que para os teores de fósforo e potássio houve interação entre a dose de Ca e os ciclos de crescimento do capim em ambas as folhas estudadas ($p < 0.01$) para os demais macronutrientes, N, Mg e S não houve efeito das doses de Ca, somente efeito dos ciclos de crescimento avaliados (**Tabela 69**). A produção das culturas é um reflexo da contribuição das interações dos nutrientes disponíveis no meio. Forrageiras exigentes em fertilidade apresentam, normalmente, teores adequados dos nutrientes em sua composição e quando a fertilidade do solo diminui estas reduzem sua produção. A exploração em níveis elevados de produção de forragem determina a extração de quantidades de nutrientes do solo pela planta forrageira de 2,5 a 10 vezes maiores que as quantidades extraídas pelas culturas comerciais.

Tabela 69. Resultados da análise de variância para os macronutrientes N, P, K, Ca, Mg e S nas lâminas foliares F1 (mais jovem completamente expandida) e F2 (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu submetido a doses de adubação cálcica

Fonte de variação	Nutriente					
	N	P	K	Ca	Mg	S
F₁						
Dose de Ca (D)	0,6379 ^{ns}	0,2236 ^{ns}	0,2348 ^{ns}	<0,0001**	0,2041 ^{ns}	0,1170 ^{ns}
Ciclo de crescimento (C)	<0,0001**	0,1205 ^{ns}	<0,0001**	<0,0001**	0,0067**	0,0219*
Interação D*C	0,4129 ^{ns}	0,0016**	0,0088**	<0,0001**	0,2161 ^{ns}	0,6538 ^{ns}
F₂						
Dose de Ca (D)	0,3396 ^{ns}	<0,0001**	0,1550 ^{ns}	<0,0001**	0,0443*	0,8941 ^{ns}
Ciclo de crescimento (C)	<0,0001**	<0,0001**	<0,0001**	0,0002**	0,0538†	<0,0001**
Interação D*C	0,6708 ^{ns}	<0,0001**	0,0091**	0,0866†	0,2970 ^{ns}	0,7862 ^{ns}

Nível de significância: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, † $p < 0.10$, ^{ns}não significativo.

Os teores de micronutrientes Cu, Fe e Zn na folha 1 variaram em função da interação da dose de Ca e do ciclo de crescimento. Para a absorção de B só foi constatado efeito do ciclo de crescimento e para Mn nesta folha, não houve alteração. Na folha 2, os teores de Cu e Fe variaram em função do fornecimento de Ca, os teores de Mn e Zn variaram somente entre os ciclos de crescimento. O teor de B variou em função da interação dose de Ca e ciclo de crescimento. (**Tabela 70**).

Tabela 70. Resultados da análise de variância para os micronutrientes B, Cu, Fe, Mn e Zn nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) e F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu submetido a doses de adubação cálcica

Fonte de variação	Nutriente				
	B	Cu	Fe	Mn	Zn
F₁					
Dose de Ca (D)	0,6969 ^{ns}	<0,0001 ^{**}	0,0325 [*]	0,8449 ^{ns}	<0,0001 ^{**}
Ciclo de crescimento (C)	<0,0001 ^{**}	<0,0001 ^{**}	0,0001 ^{**}	0,9550 ^{ns}	<0,0001 ^{**}
Interação D*C	0,8612 ^{ns}	<0,0001 ^{**}	0,0148[*]	0,7813 ^{ns}	<0,0001 ^{**}
F₂					
Dose de Ca (D)	0,0354 [*]	0,0004^{**}	0,0177[*]	0,1057 ^{ns}	0,2817 ^{ns}
Ciclo de crescimento (C)	<0,0001 ^{**}	<0,0001 ^{**}	<0,0001 ^{**}	<0,0001 ^{**}	0,0125[*]
Interação D*C	0,0133[*]	0,6332 ^{ns}	0,1384 ^{ns}	0,2439 ^{ns}	0,6633 ^{ns}

Nível de significância: *p<.05, **p<0.01, †p<.10, ^{ns}não significativo.

A análise de correlação foi realizada para investigar a relação entre Ca e os nutrientes nas amostras das folhas 1 e 2. A **tabela 71** resume as correlações de nutrientes para nas folhas 1 e 2 do capim marandu realizadas neste estudo. Nossos resultados indicaram correlações entre: Ca × N na F₁ (r = 0,32†), Ca × K na F₁ (r = 0,30†), Ca × Mg (F₁ e 2) (r=0,36* e 0,53*, respectivamente), Ca × B (F₁ e 2) (r =0,53** e 0,42*** respectivamente), Ca × Cu (F₂) (r = 0,39**), Ca x Fe na F₁ (r = -0,29†). As correlações entre Ca × P, Ca × S, Ca × Mn, Ca × Zn não foram significativamente diferentes, indicando interação zero. Os resultados das correlações nos mostram que as associações entre os nutrientes podem variar em função da folha analisada, sendo a F₁ apresentou maior número de correlações entre a disponibilidade de Ca na solução e os nutrientes.

Tabela 71. Correlação entre o cálcio e os teores de minerais nas folhas em capim marandu

Folha	Nutriente									
	N	P	K	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Coefficiente de correlação										
F1	0,32†	-0,13 ^{ns}	0,30†	0,36*	-0,05 ^{ns}	0,53**	0,02 ^{ns}	-0,29†	0,00 ^{ns}	-
F2	0,04	0,20 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,53*	0,09	0,42**	0,39**	0,11 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,04 ^{ns}

Nível de significância: *p<.05, **p<0.01, †p<.10, ^{ns}não significativo.

Em média, o N acumulado diminuiu em função dos ciclos avaliados, independentemente da folha analisada (**Tabela, 72**). A concentração de minerais na planta

ferrageira é influenciada pelo genótipo, idade, estágio fenológico, ritmo de crescimento, disponibilidade de nutrientes e fração da planta considerada (CORSI e SILVA, 1985)

Tabela 72. Teor de N lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu em função dos ciclos de crescimento

Ciclo de crescimento	Folha	
	F ₁	F ₂
	N (g kg ⁻¹)	
Ciclo 1	22,9 ± 1,12 ^A	23,4 ± 1,08 ^A
Ciclo 2	14,1 ± 0,42 ^B	13,7 ± 0,49 ^B
Ciclo 3	11,2 ± 0,42 ^C	11,7 ± 0,67 ^C

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão (n=12)

Os teores de fósforo nas folhas variaram em função da interação disponibilidade de Ca e ciclo de crescimento (**Tabelas 73 e 74**) Em nosso estudo os teores de P foram superiores aos conjuntos de dados verificados na literatura. Para ambas as folhas, no primeiro ciclo de crescimento, plantas deficientes em Ca apresentaram menores teores de P no tecido vegetal. No segundo e terceiro ciclo não houve influência da disponibilidade de Ca no acúmulo deste. Deve-se lembrar que o foco da produção das pastagens é o fornecimento da ferrageira para os animais. Uma inadequada relação Ca:P pode alterar os requerimentos de manutenção desses minerais, se um deles estiver deficiente na dieta. Hansard & Plumlee (1954) observaram aumento da excreção metabólica de fósforo, quando a ingestão de cálcio foi baixa e sugeriram que, quando há uma quantidade insuficiente de cálcio no sangue para a calcificação óssea, uma parte do excesso de fósforo que seria também utilizado para a deposição óssea é excretado.

Tabela 73. Teor de P nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu em função da interação disponibilidade de cálcio na solução e ciclos de crescimento

Dose de Ca (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
	P (g kg ⁻¹)		
6	3,3 ± 0,10 ^{Bb}	3,9 ± 0,20 ^{Aa}	4,3 ± 0,10 ^{Aa}
20	3,6 ± 0,23 ^{Bb}	4,0 ± 0,09 ^{Aa}	4,3 ± 0,18 ^{Aa}
100	4,5 ± 0,15 ^{Aa}	3,9 ± 0,12 ^{Ab}	3,9 ± 0,06 ^{Ab}
200	4,1 ± 0,23 ^{Aa}	4,0 ± 0,10 ^{Aa}	4,0 ± 0,25 ^{Aa}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3)

Tabela 74. Teor de P nas lâminas foliares F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em função da interação disponibilidade de cálcio na solução e ciclos de crescimento

Dose de Ca (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
		P (g kg ⁻¹)	
6	2,6 ± 0,03 ^{Bb}	4,2 ± 0,09 ^{Aa}	4,0 ± 0,17 ^{Aa}
20	2,5 ± 0,06 ^{Bb}	3,8 ± 0,07 ^{Aa}	4,0 ± 0,07 ^{Aa}
100	4,1 ± 0,19 ^{Aa}	4,0 ± 0,12 ^{Aa}	3,9 ± 0,09 ^{Aa}
200	4,0 ± 0,20 ^{Aa}	4,0 ± 0,19 ^{Aa}	3,9 ± 0,17 ^{Aa}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

Assim como para o fósforo, os teores de K variaram em função da interação entre os fatores estudados (**Tabelas 75 e 76**). Para ambas as folhas, no ciclo 1, O efeito estimulante do cálcio sobre a absorção de potássio é observado quando o mesmo está em baixas concentrações. Com o aumento gradativo na concentração do cálcio na solução, esse efeito diminui até o momento em que ocorre antagonismo entre cátions a níveis mais altos de cálcio e consequente redução na absorção de potássio pelas plantas (SOARES et al., 1983). Esse fenômeno foi verificado no primeiro ciclo de crescimento no presente trabalho, onde as concentrações de K na planta, sofreram reduções pela elevação do nível de fertilidade em Ca deficiente para um nível suficiente ou alto. Há pesquisas indicando ocorrer redução, também, na absorção de cálcio com a elevação do nível de potássio no meio de crescimento (BÜLL et al., 1993) o que foi demonstrado também no experimento avaliando teores de Ca em função da disponibilidade de K. Estes resultados confirmam que a absorção, translocação e talvez a assimilação de cátions e ânions por plantas não dependem apenas das concentrações e da disponibilidade desses íons no meio nutriente, mas também na presença de outros cátions e ânions.

Tabela 75. Teor de K nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu em função da interação disponibilidade de cálcio na solução e ciclos de crescimento

Dose de Ca (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
		K (g kg ⁻¹)	
6	21,8 ± 1,44 ^{Aa}	13,6 ± 0,85 ^{Ab}	13,0 ± 0,33 ^{Ab}
20	21,8 ± 0,33 ^{Aa}	15,9 ± 0,33 ^{Ab}	12,6 ± 0,33 ^{Ac}
100	16,1 ± 0,90 ^{Ba}	14,9 ± 0,33 ^{Aa}	14,0 ± 0,55 ^{Aa}
200	17,5 ± 1,18 ^{Ba}	13,9 ± 0,63 ^{Ab}	14,6 ± 1,78 ^{Aab}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

Tabela 76. Teor de K nas lâminas foliares F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu em função da interação disponibilidade de cálcio na solução e ciclos de crescimento

Dose de Ca (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
	K (g kg ⁻¹)		
6	22,5 ± 0,78 ^{Aa}	12,9 ± 1,43 ^{Ab}	12,9 ± 0,86 ^{Ab}
20	22,7 ± 1,17 ^{Aa}	15,5 ± 0,88 ^{Ab}	13,0 ± 0,33 ^{Ab}
100	16,9 ± 1,97 ^{Ba}	13,9 ± 0,30 ^{Aa}	13,9 ± 0,85 ^{Aa}
200	17,5 ± 1,74 ^{Ba}	14,9 ± 1,18 ^{Aa}	14,9 ± 0,82 ^{Aa}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

Os maiores teores de Ca na F₁ foram observados na dose de 100% de Ca, demonstrando que pode ter ocorrido uma certa limitação no acúmulo deste nutriente na F₁, o que pode estar relacionado as relações deste elemento com os demais cátions (**Tabela 77**). Os resultados do 3 ciclo observados na F₁ e nos 3 ciclos verificados na folha 2 foram semelhantes, demonstrando maiores acúmulos de Ca nas plantas em condições de maior disponibilidade do nutriente, assim como discutido anteriormente para os nutrientes N e K (**Tabela 78**).

Tabela 77. Teor de Ca nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu em função da interação disponibilidade de cálcio na solução e ciclos de crescimento

Dose de Ca (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
	Ca (g kg ⁻¹)		
6	5,3 ± 0,22 ^{Cb}	4,1 ± 0,15 ^{Ca}	2,6 ± 0,21 ^{Bc}
20	6,4 ± 0,11 ^{Bb}	4,9 ± 0,18 ^{Ca}	3,0 ± 0,12 ^{Bc}
100	7,2 ± 0,14 ^{Ab}	9,0 ± 0,11 ^{Aa}	4,9 ± 0,15 ^{Ab}
200	5,4 ± 0,28 ^{Cb}	7,4 ± 0,13 ^{Ba}	4,6 ± 0,15 ^{Ab}

Tabela 78. Teor de Ca nas lâminas foliares F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu em função da interação disponibilidade de cálcio na solução e ciclos de crescimento

Dose de Ca (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
	Ca (g kg ⁻¹)		
6	4,0 ± 0,23 ^{Ba}	5,0 ± 0,11 ^{Ba}	2,7 ± 0,06 ^{Bb}
20	5,1 ± 0,36 ^{Ba}	5,5 ± 0,13 ^{Ba}	2,7 ± 0,07 ^{Bb}
100	6,7 ± 0,21 ^{Ab}	7,6 ± 0,12 ^{Aa}	7,3 ± 0,14 ^{Aa}
200	7,8 ± 0,26 ^{Aa}	7,6 ± 0,19 ^{Aa}	6,1 ± 0,19 ^{Ab}

Os teores de Mg na F₂ aumentaram em função da disponibilidade de Ca na solução (Tabela 79 e 80) Em estudo com *Brachiaria decumbens* avaliando a forma de aplicação e tipos de calcário e os níveis de saturação por bases na recuperação de pastagens OLIVEIRA et al., 2003 estimaram às remoções de Ca e Mg pela forragem no primeiro ano, em torno de 15 e 10 kg ha⁻¹, respectivamente, e em torno de 28 e 19 kg ha⁻¹ no segundo ano. Essas quantidades são bem inferiores às aplicadas (188 e 70 kg ha⁻¹ de Ca e Mg, respectivamente, correspondendo às menores doses de calcário, 1100 kg ha⁻¹ nos dois anos), representando 22% de Ca e 41% de Mg aplicado ao longo dos dois anos. Avaliando-se doses de calcário e gesso sobre componentes nutricionais da *Brachiaria decumbens* MESQUITA et al., 2002 observaram que, a aplicação de gesso apresentou-se como boa alternativa no suprimento de cálcio. A variação nas concentrações de Ca²⁺ na camada de 15-30 cm de profundidade, de 0,3 para 0,9 cmolc/dm³, em resposta às doses de gesso e as variações de Ca na parte aérea das plantas variaram entre 2,8 g kg⁻¹ e 3,7 g kg⁻¹. FORTES et al., 2008 estudando níveis de silicato de cálcio e magnésio na produção das gramíneas marandu e tanzânia cultivadas em um neossolo quartzarênico verificaram ajuste linear nos valores de produção total de matéria seca para as gramíneas, estimando-se incremento de 0,33 g vaso-1 para cada 1% de elevação na saturação por bases do solo. Neste estudo as doses de cálcio fornecidas via silicato foram de 0, 0,2, 0,6, 0,9 e 1,3 t/ha de Ca. Concluem que o efeito positivo observado na produção de matéria seca total pode ser atribuído, principalmente, à elevação do pH, com consequente neutralização do Al trocável e do fornecimento de Ca, Mg e Si. Pelos resultados obtidos neste trabalho o fornecimento de Ca aumenta a absorção do Mg, mesmo que não seja fornecida uma fonte complementar de Mg.

Tabela 79. Teor de Mg lâminas foliares F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em função da interação disponibilidade de cálcio

Dose de Ca (%)	Mg mg kg ⁻¹
6	1,6 ± 0,25 ^B
20	1,9 ± 0,25 ^{AB}
100	2,0 ± 0,30 ^{AB}
200	2,2 ± 0,36 ^A

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão (n=9)

Tabela 80. Teor de Mg nas lâminas foliares em capim marandu em função dos ciclos de crescimento

Ciclo de crescimento	Folha	
	F ₁	F ₂
	Mg (g kg ⁻¹)	
Ciclo 1	1,8 ± 0,14 ^A	2,18 ± 0,13 ^A
Ciclo 2	1,7 ± 0,10 ^A	1,98 ± 0,11 ^B
Ciclo 3	1,5 ± 0,21 ^B	1,70 ± 0,17 ^C

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão (n=12)

Os teores de S variaram em função do ciclo de crescimento, apresentando o mesmo comportamento para as duas folhas analisadas. Os teores médios de S no ciclo 1 foram de 2,1 g kg⁻¹ na F₁ e 2,0 g kg⁻¹, ciclo 2 foram de 2,5 g kg⁻¹ na F₁ e 3,4 g kg⁻¹, na F₂, no ciclo 3 foram de 2,7 g kg⁻¹ na F₁ e 3,4 g kg⁻¹, na F₂ (**Tabela 81**).

Tabela 81. Teor de S lâminas foliares em capim marandu em função dos ciclos de crescimento

Ciclo de crescimento	Folha	
	F ₁	F ₂
	S (g kg ⁻¹)	
Ciclo 1	2,1 ± 0,28 ^B	2,0 ± 0,39 ^B
Ciclo 2	2,5 ± 0,17 ^A	3,4 ± 0,21 ^A
Ciclo 3	2,7 ± 0,26 ^A	3,4 ± 0,32 ^A

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão (n=12)

Houve relação entre os teores de B na parte aérea e os ciclos de crescimento, com diferentes respostas entre os teores verificados e respostas observados na F₁ e F₂ para este nutriente (**Tabela 82 e 83**). Para a F₁ houve diferença entre os ciclos de crescimento, sendo as maiores absorções nos ciclos 2, 1 e 3 com teores foliares de 30,0 mg kg⁻¹, 17,4 mg kg⁻¹ e 11,7 mg kg⁻¹, respectivamente. Em geral, a proporção Ca/B é um bom indicador do status nutricional de B na planta (BLAMEY et al., 1979).

Tabela 82. Teor de nas B lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu em função dos ciclos de crescimento

Ciclo de crescimento	B mg kg ⁻¹
Ciclo 1	17,4 ± 1,43 ^B
Ciclo 2	30,0 ± 2,36 ^A
Ciclo 3	11,7 ± 0,97 ^C

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão (n=12)

Em estudo de Kizilgoz and Sakin, (2010) a aplicação de Ca²⁺ no solo diminuiu a concentração de parte aérea B. Em nosso trabalho, no primeiro ciclo ocorreu o inverso, com maiores teores de B nas doses de Ca mais altas, entretanto no segundo e terceiro ciclos, apesar de não ser constatada diferença estatística significativa, os maiores teores de B foram verificados quando a disponibilidade de Ca era menor.

Tabela 83. Teores de B nas lâminas foliares F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação cálcica e ciclos de corte.

Dose de Ca (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
		B (mg kg ⁻¹)	
6	22,3 ± 1,48 ^{Bb}	29,1 ± 1,88 ^{Aa}	15,3 ± 1,56 ^{Ac}
20	17,8 ± 0,57 ^{Bb}	28,2 ± 1,21 ^{Aa}	14,2 ± 0,89 ^{Ab}
100	29,7 ± 2,31 ^{Aa}	28,1 ± 0,49 ^{Aa}	13,9 ± 1,13 ^{Ab}
200	29,8 ± 2,54 ^{Aa}	27,7 ± 2,08 ^{Aa}	13,8 ± 0,84 ^{Ab}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

Os teores de Cu nas folhas apresentaram interação entre ciclo de crescimento e dose de Ca na F₁ e na F₂ variaram em função das doses e dos ciclos, não havendo interação (**Tabelas 84, 85 e 86**). No primeiro ciclo de crescimento plantas, plantas cultivadas com 20% de Ca na solução apresentaram menores teores de Cu no tecido vegetal. No segundo ciclo, houve um aumento na absorção de Cu em função do aumento da disponibilidade de Ca para as plantas. No terceiro ciclo, os resultados foram semelhantes aos verificados no primeiro, no qual plantas cultivadas com 20% de Ca na solução apresentaram menores teores de Cu no tecido vegetal. PREMAZZI (1991) encontrou efeito de queda nos teores de cobre para *Braquiaria brizantha* (1º corte) até o nível de 42% de saturação por bases, elevando-se em seguida. O teor de ferro na parte aérea no 2º corte da braquiária teve uma diminuição de até V = 34%, a partir de então apresentou tendência de elevação com o aumento da V%. Os teores de zinco e manganês diminuíram em função da elevação da V% para brizantha no 1º e 2º cortes. Para a brizantha no 2º corte ocorreram aumentos no teor de boro. A deficiência de cálcio muitas vezes associada ao excesso relativo de alumínio nas camadas subsuperficiais do solo, reduz o desenvolvimento do sistema radicular, tornando as plantas mais suscetíveis veranicos (PEREIRA et al., 2009).

Tabela 84. Teores de Cu nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação cálcica e ciclos de corte.

Dose de Ca (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
		Cu (mg kg ⁻¹)	
6	6,3 ± 0,60 ^{Ac}	8,8 ± 0,30 ^{Cb}	12,4 ± 0,64 ^{Aa}
20	2,4 ± 0,32 ^{Bc}	11,1 ± 1,02 ^{Ba}	8,1 ± 0,91 ^{Cb}
100	5,8 ± 1,24 ^{Ab}	12,5 ± 0,99 ^{Ba}	10,6 ± 0,62 ^{ABa}
200	7,3 ± 0,09 ^{Ac}	15,1 ± 0,41 ^{Aa}	10,0 ± 0,19 ^{BCb}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

Na F₂ os maiores teores de Cu foram verificados na dose de 200% de Ca. Os teores observados foram de 7,6 g kg⁻¹ na Dose 6%, 8,1 g kg⁻¹ na Dose 20%, 7,6 g kg⁻¹ na Dose 6%, 7,6 g kg⁻¹ na Dose 6%. Para os ciclos os teores médios de Cu foram de 6,5 g kg⁻¹ no ciclo 1, 11,9 g kg⁻¹ no ciclo 2 e de 9,6 g kg⁻¹ no ciclo 3 (**Tabelas 84 e 85**).

Tabela 85. Teor dos nutrientes Cu lâminas foliares F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu nas doses.

Dose de Ca	Cu mg kg ⁻¹
6	7,6 ± 1,25 ^C
20	8,1 ± 1,65 ^B
100	9,8 ± 2,16 ^B
200	11,9 ± 1,70 ^A

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão (n=9)

Tabela 86. Teor dos nutrientes Cu lâminas foliares F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu em função do ciclo de crescimento

Ciclo de crescimento	Cu mg kg ⁻¹
Ciclo 1	6,5 ± 1,53 ^C
Ciclo 2	11,9 ± 1,61 ^A
Ciclo 3	9,6 ± 1,24 ^B

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão (n=12)

Houve efeito da interação entre doses de Ca e o ciclo de crescimento quando se analisou a absorção de Fe na F₁. Para a F₂ os teores foram influenciados pela dose de Ca bem como pelos ciclos de corte, não ocorrendo interação entre estes fatores estudados (**Tabelas 87, 88 e 89**). Para a F₁ no primeiro ciclo, os menores teores de Fe foram observados em condições de deficiência de Ca, para o ciclo 2, os teores foram estatisticamente iguais independentemente da dose de Ca fornecido. No ciclo 3, a deficiência severa de Ca para as plantas (Dose 6%) ocasionou menor absorção de Fe pelas plantas. Os teores variaram entre 69,2 g kg⁻¹ e 132,4 g kg⁻¹ (ciclo 1), 73,6 g kg⁻¹ e 102,2 g kg⁻¹ (ciclo 2) e 92,9 g kg⁻¹ e 162,6 g kg⁻¹ (ciclo 3). Apesar das diferenças verificadas, todos os teores se apresentaram dentro da faixa adequada para este nutriente segundo a literatura.

Tabela 87. Teores de Fe nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação cálcica e ciclos de corte

Dose de Ca (%)	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
		Fe (mg kg ⁻¹)	
6	84,1 ± 8,38 ^{Ba}	102,2 ± 29,54 ^{Aa}	92,9 ± 8,00 ^{Ba}
20	69,2 ± 14,70 ^{Bb}	80,5 ± 2,48 ^{Ab}	137,5 ± 10,49 ^{Aa}
100	130,9 ± 10,67 ^{Aa}	73,6 ± 10,32 ^{Ab}	162,6 ± 16,01 ^{Aa}
200	132,4 ± 11,60 ^{Aa}	92,9 ± 6,13 ^{Ab}	152,5 ± 23,65 ^{Aa}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

Assim como verificado na F₁, os menores teores de Fe foram observados na F₂ quando as plantas foram submetidas a deficiência severa de Ca (94,5 g kg⁻¹). A diferença de acúmulo nas doses de 20% e 100% foi pequena, sendo os teores estatisticamente iguais. Na dose de 200% de Ca verificou-se o maior teor de Fe no limbo foliar, sendo este de 147,3 kg⁻¹. Apesar dos altos teores de Fe na parte aérea, os maiores teores foram verificados nas raízes, como será discutido posteriormente.

Tabela 88. Teor de Fe nas lâminas foliares F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu em função da disponibilidade de cálcio

Dose de Ca (%)	Fe mg kg ⁻¹
6	94,5 ± 13,52 ^C
20	118,3 ± 11,48 ^B
100	123,5 ± 19,08 ^B
200	147,3 ± 12,15 ^A

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão (n=9)

Tabela 89. Teor de Fe nas lâminas foliares F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu em função dos ciclos de crescimento

Ciclo de crescimento	Fe mg kg ⁻¹
Ciclo 1	141,8 ± 23,60 ^A
Ciclo 2	79,3 ± 10,03 ^B
Ciclo 3	141,6 ± 28,6 ^A

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão (n=12)

Para o manganês não houve influência das doses de cálcio sobre sua absorção, com alterações em seu acúmulo apenas em função do ciclo de crescimento. Houve uma redução no acúmulo de Mn nos tecidos em função dos ciclos, com teores variando entre 293 mg kg⁻¹ no

primeiro ciclo, 245,1 mg kg⁻¹ no segundo ciclo e 246,9 g kg⁻¹ no terceiro ciclo. Os teores verificados no 2 e 3 ciclos de crescimento foram estatisticamente iguais (**Tabela 90**).

Tabela 90. Teor de Mn nas lâminas foliares F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu em função dos ciclos de crescimento.

Ciclo de crescimento	Mn mg kg ⁻¹
Ciclo 1	293,0 ± 20,77 ^A
Ciclo 2	245,1 ± 13,24 ^B
Ciclo 3	246,9 ± 8,67 ^B

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão (n=12)

Resultados do acúmulo de Zn na F₁ variaram em função da interação doses de Ca e ciclo de crescimento (**Tabela 91**) e somente em função do ciclo de crescimento na F₂ (**Tabela 92**). Na F₁, resultados verificados nos ciclos 1 e 2 permaneceram dentro da faixa adequada para a cultura, que é de 20 a 50 mg kg⁻¹. No terceiro ciclo, os teores acumulados quando as plantas foram cultivados com 20% e 100% da dose de Ca recomendada resultou em acúmulo de Zn 15,6% acima do recomendado para a dose de 20% e 42,6 % acima do recomendado para a dose de 100%.

Tabela 91. Teor de Zn nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação cálcica e ciclos de corte.

Dose de Ca	Ciclo de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
	Zn (mg kg ⁻¹)		
6	34,0 ± 1,20 ^{Ba}	37,2 ± 0,91 ^{Aa}	39,4 ± 0,54 ^{Ca}
20	36,8 ± 0,70 ^{ABb}	34,3 ± 3,55 ^{Aa}	57,8 ± 3,70 ^{Ba}
100	43,5 ± 1,11 ^{Ab}	37,6 ± 0,50 ^{Ab}	73,1 ± 8,03 ^{Aa}
200	37,9 ± 0,75 ^{ABa}	38,9 ± 0,15 ^{Aa}	33,5 ± 1,94 ^{Da}

Letras maiúsculas comparam as médias nas colunas e letras minúsculas comparam as médias na linha. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão da média (n=3).

Tabela 92. Teor de Zn lâminas foliares F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu em função dos ciclos de crescimento.

Ciclo de crescimento	Zn mg kg ⁻¹
Ciclo 1	39,0 ± 5,15 ^B
Ciclo 2	39,3 ± 3,38 ^B
Ciclo 3	51,1 ± 8,18 ^A

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Erro padrão (n=12)

Os macronutrientes K, Ca, Mg e S variaram em função da alteração dos níveis de cálcio na solução. Os Teores de N e P nas raízes mantiveram-se constantes independentemente do

nível de Ca a que as plantas foram submetidas (**Tabela 93**). Os teores de Ca nas raízes aumentaram significativamente em função do aumento de Ca na solução com teores médios de 1,3 g kg⁻¹ (Dose 6%), 1,7 g kg⁻¹ (Dose 20%), 1,9 g kg⁻¹ (Dose 100%), 2,4 g kg⁻¹ (Dose 200%). Como discutido anteriormente, cátions como Mg²⁺ e K⁺ competem com Ca²⁺ para absorção nas raízes. K e Ca são os cátions envolvidos em mais funções da planta e são indispensáveis na nutrição de plantas, mas K limita o crescimento da planta com mais frequência do que o Ca²⁺ (SARDANS e PENUÉLAS, 2021) Considera-se geralmente que plantas que cresçam em meio com baixo teor de Ca disponível podem apresentar grande proporção do elemento (50%) na parede celular ou na forma de oxalato (MENGEL & KIRKBY, 1987). Em nosso estudo, os maiores teores de K e Mg foram verificados em plantas nutridas com a dose recomendada de Ca, com relação entre K, Ca e Mg nas raízes nesta dose de 1,3: 1,0: 2,0, respectivamente. Os teores de Mg aumentaram em função do aumento das doses de Ca na solução. Domingues et al., 2016 em estudo com feijão verificou que altas concentrações de cálcio não reduziram o acúmulo de cálcio, potássio e magnésio nas folhas e grãos. Plantas de feijão comum cultivadas com alta concentrações de cálcio na solução nutritiva apresentam alta concentração de cálcio no folhos e grãos.

Tabela 93. Teores de macronutrientes nas raízes em função da disponibilidade de Ca na solução nutritiva

Dose de Ca (%)	Nutriente					
	N	P	K	Ca	Mg	S
	g kg ⁻¹					
6	6,1 ± 0,33	0,7 ± 0,07	0,5 ± 0,05 ^D	1,3 ± 0,02 ^D	1,2 ± 0,15 ^C	2,2 ± 0,09 ^A
20	6,1 ± 0,17	0,7 ± 0,07	0,9 ± 0,03 ^C	1,7 ± 0,06 ^C	2,4 ± 0,45 ^B	2,4 ± 0,12 ^A
100	6,0 ± 0,40	0,8 ± 0,04	2,5 ± 0,04 ^A	1,9 ± 0,05 ^B	3,8 ± 0,34 ^A	2,3 ± 0,12 ^A
200	6,0 ± 0,58	0,7 ± 0,05	1,5 ± 0,03 ^B	2,4 ± 0,08 ^A	3,6 ± 0,33 ^A	1,9 ± 0,01 ^B
p-valor	0,0984 ^{ns}	0,6321 ^{ns}	<.0001 ^{**}	<.0001 ^{**}	0,0018 ^{**}	0,0426 [*]

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey. Nível de significância: *p<.05, **p<.01, †p<.10, ^{ns}não significativo. Erro padrão (n=3).

O comportamento do K em função das doses de Ca é descrito pela equação $y = -0,0002x^2 + 0,0388x + 0,1952$ com $p < 0,01$. A equação $y = 0,0048x + 1,4374$ ($p < 0,10$) representa a relação entre o fornecimento de Ca para o capim marandu e o teor de Ca nas raízes das plantas, como esperado houve aumento linear dos teores de Ca nas raízes em função do aumento dos teores de Ca na solução. O comportamento do Mg e Zn em função das doses de Ca são descritos pelas equações $y = -0,0001x^2 + 0,0408x + 1,2478$ ($p < 0,10$) e $y = -0,0011x^2 - 0,3234x + 38,249$ ($p < 0,10$) (**Figura 18**).

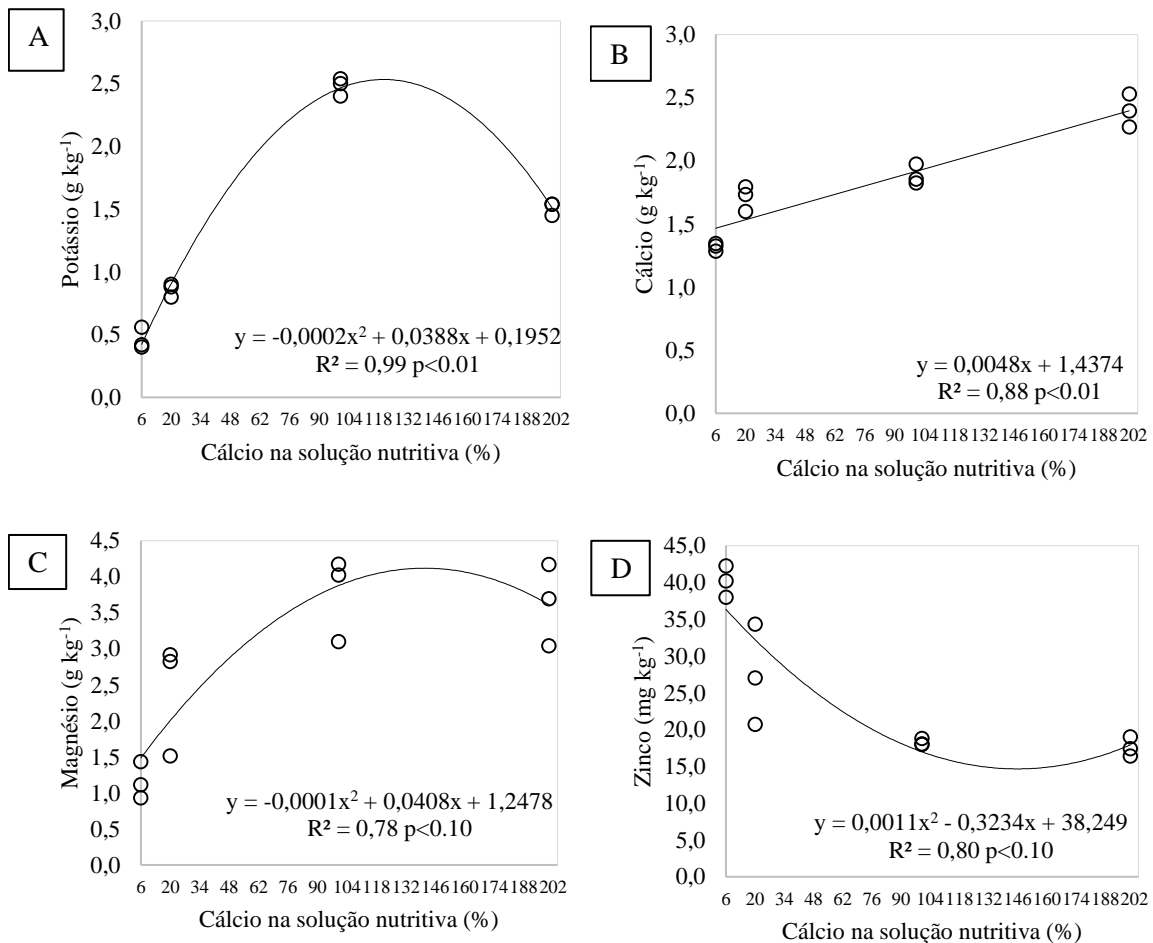


Figura 18. Relação entre a disponibilidade de Ca na solução nutritiva e o teor de nutrientes nas raízes (A) Potássio, (B) Cálcio, (C) Magnésio, (D) Zinco.

Dentre os micronutrientes, constatou-se efeito da disponibilidade de Ca sobre os teores de B, Cu, Mn e Zn. Os teores de Fe nas raízes não foram influenciados pela disponibilidade de Ca na solução, ao contrário do que foi visto na parte aérea. (**Tabela 94**). Os teores de Fe variaram entre 568,0 g kg⁻¹ (Dose 100%) e 656,2 g kg⁻¹ (Dose 20%). Os teores de B variaram entre 4,7 g kg⁻¹ (Dose 6%) e 7,7 g kg⁻¹ (Dose 200%). Em média, plantas cultivadas em condição de deficiência severa de Ca apresentaram uma redução nos teores de B nas raízes de 45%. Os teores de Mn foram estatisticamente iguais para as doses de 20%, 100% e 200%, e estatisticamente superiores na dose de 6% e assim como os teores de Zn, diminuíram com o aumento do fornecimento de Ca para as plantas.

Tabela 94. Teores médios de micronutrientes nas raízes em função da disponibilidade de potássio na solução nutritiva

Dose de K %	B	Cu	Nutriente Fe mg kg ⁻¹	Mn	Zn
6	4,7 ± 0,56 ^C	37,2 ± 7,74 ^B	603,3 ± 38,98	537,1 ± 32,25 ^A	40,2 ± 1,23 ^A

20	6,5 ± 0,91 ^B	29,9 ± 2,28 ^C	656,2 ± 46,03	324,3 ± 24,33 ^B	27,4 ± 3,93 ^B
100	6,8 ± 1,75 ^B	27,0 ± 2,16 ^C	568,0 ± 29,70	287,9 ± 12,14 ^B	18,3 ± 0,27 ^C
200	7,7 ± 1,55 ^A	51,1 ± 6,91 ^A	652,4 ± 49,38	280,0 ± 5,84 ^B	17,6 ± 0,77 ^C
	0,0569 ^{ns}	0,0538[†]	0,7560 ^{ns}	<.0001^{**}	<.0001^{**}

Letras comparam as médias nas colunas. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey. Nível de significância: *p<.05, **p<0.01, †p<.10, ^{ns}não significativo. Erro padrão (n=3).

1.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As variações de dosagem do N implicaram em respostas de N na folha consideradas baixa, adequada e excessiva. A relação N x S foi afetada variando de 6:1 até 22,5:1 em função do fornecimento do N, ficando com relação de 16,7:1,0. A relação N x K evidenciou que há redução nos teores de K à medida que se aumenta as doses de N, com valor de 1,2:1,0 para a dose completa de 100%. Para as relações N/Ca e N/Mg obteve-se os valores de 3,4:1,0 e de 7,4:1,0. As dosagens de K utilizadas geraram teores foliares considerados baixo na dose de 6% sendo os demais na faixa adequada quase atingindo o limite dessa faixa.

Ocorreram as relações clássicas K/Ca, K/Mg e K/(Ca+Mg) havendo redução nos teores de Ca e Mg pro efeito diluição e também por inibição competitiva principalmente entre K e Mg e Ca x Mg. Ocorreram as relações convencionais entre Ca e K, Ca e Mg e K/(Ca+Mg). Notou-se aumento nos teores de K e Mg em função das doses de Ca nas raízes

Deve-se lembrar que à aplicação de fertilizantes em culturas forrageiras diz respeito também às necessidades nutricionais dos animais para os quais os alimentos devem ser fornecidos. A fertilidade do solo no qual o capim se desenvolve altera a composição química da forragem. Este foi um experimento realizado em condições controladas, portanto, os resultados podem ser afetados por mudanças no ambiente de campo até certo ponto.

1.8 CONCLUSÃO

A disponibilidade de N, K e Ca na solução nutritiva afeta a absorção de nutrientes e a produção de matéria seca da parte aérea e de raízes do capim marandu, sendo possível quantificar um padrão de remoção de nutrientes.

1.9 REFERÊNCIAS

- AI, Z. M., XUE, S., WANG, G. L., AND LIU, G. B. Responses of non-structural carbohydrates and C:N:P stoichiometry of *Bothriochloa ischaemum* to nitrogen addition on the loess plateau, China. *J. Plant Growth Regulat.* 1–9. 2017.
- ABREU, J. B. R. DE; MONTEIRO, F. A. Produção e nutrição do capim-marandu em função de adubação nitrogenada e estádios de crescimento. **Boletim de Indústria Animal**, v. 56, n. 2, p. 137–146, 1999.
- ALVES, L. C. et al. Morphogenesis of age groups of Marandu palisade grass tillers deferred and fertilised with nitrogen. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 40, n. 6, p. 2683–2692, 2019.
- ANDRADE, A. C. et al. Produtividade e valor nutritivo do Campim-Elefante cv. Napier sob doses crescentes de nitrogênio e potássio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 29, n. 6, p. 1589–1595, 2000.
- ANDREW, C. S.; ROBINS M. F. The effect of phosphorus on the growth, chemical composition, and critical phosphorus percentages of some tropical pastures grasses. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 22, n. 5, p. 693-706, 1971
- ARRUDA, M. L. R. **Toxidez de alumínio em forrageiras: tolerância e formas de nitrogênio.** [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1982
- BATISTA, K.; MONTEIRO, F. A. Sistema radicular do capim-marandu, considerando as combinações de doses de nitrogênio e de enxofre. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 30, p. 821–828, 2006.
- BATISTA, K.; MONTEIRO, F. A. Variações nos teores de potássio, cálcio e magnésio em capim-marandu adubado com doses de nitrogênio e de enxofre. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 34, n. 1, p. 151–161, 2010.
- BÉLANGER, G.; GASTAL, F. Nitrogen utilization by forage grasses. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 80, n. 1, p. 11–20, 2000.
- BLAMEY, F. P. C.; MOULD, D.; CHAPMAN, J. Critical boron concentrations in plant tissue of two sunflower cultivars. **Agron. Journal.**, v. 71, n. 2, p. 243-247, 1979.
- BRAMBILLA, D. M. et al. Impact of nitrogen fertilization on the forage characteristics and beef calf performance on native pasture overseeded with ryegrass. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 41, n. 3, p. 528–536, 2012.

BRENNAN R. F. (2005). *Zinc Application and Its Availability to Plants*. Ph.D.Tese, Murdoch University, Murdoch, WA.

BÜLL, L. T. Nutrição mineral do milho. In: BÜLL, L. T.; CANTARELLA, H. Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: **POTAFOS**, 1993. p.63-145

CARMEIS FILHO ACA, CRUSCIOL CAC, CASTILHOS AM. Liming demand and plant growth improvements for an Oxisol under long-term no-till cropping. **The Journal of Agricultural Science**, v. 155, n. 7, p. 1093-1112, 2017

CARRIEL, J. M. et al. Limitações nutricionais de um solo podzólico vermelho-amarelo para o cultivo de três gramíneas forrageiras. **Boletim da Indústria Animal**, v. 46, n. 1, p. 61–73, 1989.

CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL **Informe CIAT**. 1982. Cali: CIAT, 1982b. p. 67- 93.

CORSI, M., SILVA, R. T. L. Fatores que afetam a composição mineral de plantas forrageiras. In: SIMPÓSIO SOBRE NUTRIÇÃO DE BOVINOS. 3., Piracicaba, 1985. **Anais... Piracicaba: FEALQ**, 1985. p.1-14.

COSTA, E. M. et al. Viability of Nitrogen Fertilization in Pastures. **Biomedical Journal of Scientific & Technical Research**, v. 16, n. 4, 2019.

COSTA, K. A. D. P. et al. Extração de macronutrientes pela fitomassa do capim-xaraés “xaraés” em função de doses de nitrogênio e potássio. **Ciência Rural**, v. 38, n. 4, p. 1162–1166, 2008.

COSTA, K. A. D. P. et al. Doses E Fontes De Nitrogênio Na Nutrição Mineral Do. **Ciência Animal Brasileira**, v. 10, n. 1, p. 115–123, 2009.

COSTA, K.A.D.P., et al.. Doses e fontes de nitrogênio em pastagem de capim- marandu. i- Alterações nas características químicas do solo. **Rev. Bras. Cienc. Solo** 32:1591–1599. 2008

DA SILVA, S.; SBRISSIA, A.; PEREIRA, L. E. T. Ecophysiology of C4 Forage Grasses— Understanding Plant Growth for Optimising Their Use and Management. **Agriculture**, v. 5, n. 3, p. 598–625, 2015.

DALIPARTHY, J.; BARKER, A. V.; MONDAL, S. S. Potassium fractions with other nutrients in crops. A review focusing on the tropics. **Journal of Plant Nutrition, Philadelphia**, v. 17, n. 1, p. 1859-1886, 1994.

DELEVATTI, L. M. et al. Effect of nitrogen application rate on yield, forage quality, and animal performance in a tropical pasture. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–9, 2019.

- DUPAS, E. et al. Nitrogen recovery, use efficiency, dry matter yield, and chemical composition of palisade grass fertilized with nitrogen sources in the cerrado biome. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n. 9, p. 1330–1338, 2016.
- DURAN, B. E. L. et al. Nitrogen fertilization effects on productivity and nitrogen loss in three grass-based perennial bioenergy cropping systems. **PLoS ONE**, v. 11, n. 3, 1 mar. 2016.
- Fang Y., Xun F., Bai W., Zhang W., Li L. (2012). Long-term nitrogen addition leads to loss of species richness due to litter accumulation and soil acidification in a temperate steppe. **PLoS ONE** 7:e47369 10.1371/journal.pone.0047369
- FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005.
- FORTES, C. A. et al. Níveis de silicato de cálcio e magnésio na produção das gramíneas Marandu e Tanzânia cultivadas em um neossolo quartzarênico. **Ciência Agrotecnológica**, v. 32, n. 1, p. 267–274, 2008.
- FURLANI, P. R. et al. **Cultivo hidropônico de plantas**. 1. ed. [s.l.] Instituto Agronomico de Campinas, 1999.
- GAMA-RODRIGUES, C. A. DA et al. **Produção e partição de matéria seca em brachiaria brizantha em resposta à fertilização potássica e às datas de corte**. **Agronomia**. [s.l: s.n.].
- GARCEZ, T. B. et al. Root system characteristics of Marandu palisadegrass supplied with nitrogen and magnesium rates. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, n. 7, p. 1428–1435, 2011.
- GASTAL, F.; LEMAIRE, G. N uptake and distribution in crops: An agronomical and ecophysiological perspective. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, n. 370, p. 789–799, 2002.
- GUERRA, G. L. et al. Nutritional evaluation of Brachiaria brizantha cv. Marandu cultivated in soils developed from basalt and sandstone in the state of Paraná. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 40, n. 1, p. 469–484, 2019.
- Hamilton E. W., III, Giovannini M. S., Moses S. A., Coleman J. S., McNaughton S. J.. Biomass and mineral element responses of a Serengeti short-grass species to nitrogen supply and defoliation: compensation requires a critical [N]. **Oecologia** . 1998.
- HANSARD, S.L.; COMAR, C.L.; PLUMLEE, M.P. The effects of age upon calcium utilization and maintenance requirements in the bovine. **Journal of Animal Science**, v.13, p.25-36, 1954. DOI: 10.2527/jas1954.13125x.

- HEENAN, D.P.; CAMPBELL, L.C. Influence of potassium and manganese on growth and uptake of magnesium by soybean (*Glycine max* (L.) Merr. cv. Bragg.). **Plant and Soil**, v.61, p.447-456, 1981.
- HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. The water-culture method for growing plants without soil. **Crops and Junior Plant Physiology** in the Experi. n. 347, p. 1884–1949, 1938.
- Kalaji HM, Schansker G, Brestic M et al (2017) Frequently asked questions about chlorophyll fluorescence, the sequel. **Photosynth Res** 132:13–66.
- KENWARD, M. G.; ROGER, J. H. Small sample inference for fixed effects from restricted maximum likelihood. **Biometrics**, v. 53, n. 3, p. 983-997, 1997.
- KIZILGOZ, I, E. SAKIN. The effects of increased phosphorus application on shoot dry matter, shoot P and Zn concentrations in wheat (*Triticum durum* L.) and maize (*Zea mays* L.) grown in a calcareous soil. **African Journal of Biochemistry**. 2010.
- KHOSHGOFTARMANESH, A.H.; SCHULIN, R.; CHANEY, R.L.; DANESHBAKHS, B.; AFYUNI, M. Micronutrient-efficient genotypes for crop yield and nutritional quality in sustainable agriculture. A review. **Agronomy For Sustainable Development**, Paris, v. 30, n. 1, p.83-107, 2010.
- KLIEMANN, H. J. et al. Relações da produção de massa verde de *Brachiaria brizantha* com os índices de disponibilidade de nutrientes em solos sob o sistema barreira de manejo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 33, n. 1, p. 49–56, 2003.
- LAVRES JUNIOR, José. Combinações de doses de nitrogênio e potássio para o capim-mombaça. 2001. **Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)** - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
doi:10.11606/D.11.2002.tde-26042002-095619. Acesso em: 2021-08-29.
- LEE, M. S. et al. Nitrogen fertilization effects on biomass production and yield components of miscanthus × giganteus. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, n. April, p. 1–9, 2017.
- LIMA, S. A. A.; MATTOS, H. B. Nutrição mineral em cinco estilosantes cultivados em um solo de cerrado paulista. II. Teores de cálcio, fósforo, magnésio, potássio, cobre, ferro, zinco e manganês. **Boletim da Indústria Animal**, v. 39, n. 2, p. 93–105, 1982.
- Loide, V. About the effect of the contents and ratios of soil's available calcium, potassium and magnesium in liming of acid soils. **Agron. Res.** 2004, 2, 71–82
- LORETO, R. DI et al. Nitrogen Fertilization of Marandu Palisadegrass under Different Periods of Deferment. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 34, n. 2, p. 1–8, 2019.

- MANARIN, C.A.; MONTEIRO, F.A. Nitrogênio na produção e diagnose foliar do capim-mombaça. **Boletim de Industria Animal**, v.59, n.2, p.115-123, 2002
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. New York: Academic, 1995. 874 p.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants** 3.ed London: Elsevier, 2012. 643p.
- MARTIM, R.A. Doses de nitrogênio e de potássio para produção, composição e digestibilidade dos capins coastcross 1 e tifton 85 em um Latossolo Vermelho- Amarelo. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1997. 109p. **Dissertação (Mestrado em Agronomia)** - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1997.
- MATTOS, W.T. Diagnose nutricional de potássio em duas espécies de braquiária. **Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)**-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.
- MATTOS, W. T. DE; MONTEIRO, F. A. Respostas de braquiária brizantha a doses de potássio. **Scientia Agricola**, v. 55, n. 3, p. 428–437, 1998.
- MATTOS, W.T.; SANTOS, A.R.; ALMEIDA, A.A.S. et al. Aspectos produtivos e diagnose nutricional do capim-Tanzânia submetido a doses de potássio. **Magistra**, v.14, p.37-44, 2002.
- MEGDA, M. M.; MONTEIRO, F. A. Marandu Palisadegrass Mineral Nutrition and Production Related to Nitrogen and Potassium Supply. **Journal of Plant Nutrition**, v. 38, n. 2, p. 277–294, 2015.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition** Dordrechth: Kluwer Academic Publishers, 2001. 849p.
- MESQUITA, E. E. et al. Efeitos de métodos de estabelecimento de Braquiária e Estilosantes e de doses de calcário, fósforo e gesso sobre alguns componentes nutricionais da forragem. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 31, n. 6, p. 2186–2196, 2002.
- MONTEIRO, F. A. et al. Cultivo de Brachiaria brizantha Stapf. cv. Marandu em solução nutritiva com omissões de macronutrientes. **Scientia Agricola**, v. 52, n. 1, p. 135–141, 1995.
- MONTEIRO, F.A.; RAMOS, A.K.B.; CARVALHO, D.D. et al. Cultivo de Brachiaria brizantha Stapf. cv. Marandu em solução nutritiva com omissões de macronutrientes. **Scientia Agricola**, v.52, n.1, p.135-141, 1995
- MORTVEDT, J.J.; KHASAWNEH, F.E. Effects of growth responses on cationic relationships in plants. **Soil Science**, v.141, p.200-207, 1986.

ORTEGA, A. E. & MALAVOLTA, E. Los más recientes micronutrientes vegetales.

Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica, Georgia, 7(1), 16-25. (2012).

[http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.f/0/232B901BB70122F985257A80005228D7/\\$FILE/16.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.f/0/232B901BB70122F985257A80005228D7/$FILE/16.pdf)

OLIVEIRA, P. P. A. et al. **Guia de identificação de deficiências nutricionais em Brachiaria brizantha cv. marandu**. [s.l: 2003.].

OLIVEIRA, P. P. A. et al. Liming and fertilization restore degraded Brachiaria decumbens pastures grown on an entisol. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 1, p. 125–131, 2003.

OLIVEIRA, T. S. DE et al. Yield, chemical composition, and efficiency of use of nitrogen by Marandu grass. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 43, n. 8, p. 440–444, 2014.

PAIVA, A. J. et al. Identification of tiller age categories based on morphogenetic responses of continuously stocked marandu palisade grass fertilised with nitrogen. **Ciência Rural**, v. 45, n. 5, p. 867–870, 2015.

PEREIRA, A. L. et al. Atributos do solo sob pastagens em sistema de sequeiro e irrigado. **Ciência Agrotecnológica**, v. 33, n. 2, p. 377–384, 2009.

PEREIRA, J. P. **Adubação de capins do gênero Brachiaria**. Encontro para discussão dos capins do gênero brachiaria. **Anais...**Nova Odessa: Instituto de Zootecnia, 1986

PEREIRA, L. E. T. et al. Herbage utilisation efficiency of continuously stocked marandu palisade grass subjected to nitrogen fertilisation. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 2, p. 114–123, 2015.

PERSOON, D. P., HANSEN, T. H., LAURSEN, K. H., SCHJOERRING, J. K., AND HUSTED, S. Simultaneous iron, zinc, sulfur and phosphorus speciation analysis of barley grain tissues using SEC-ICP-MS and IP-ICP-MS. **Metallomics** 1, 418–426. (2009).

Petridis, A., Therios, I., Samouris, G., Koundouras, S., Giannakoula, A., 2012. Effect of water deficit on leaf phenolic composition, gas exchange, oxidative damage and antioxidant activity of four Greek olive (*Olea europaea* L.) cultivars. **Plant Physiol. Biochem.** 60, 1–11.

PINHO, K. A. DE et al. Extração de nutrientes pela fitomassa do capim-marandu sob doses e fontes de nitrogênio. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 10, n. 4, p. 801–812, 2009.

PREMAZZI, L. M. Saturação por bases como critério para recomendação de calagem em cinco forrageiras tropicais. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz, (**Dissertação de Mestrado**) 1991. 215 f.

PRIMAVESI, A. C. et al. Nutrientes na fitomassa de capim-marandu em função de fontes e doses de nitrogênio. **Ciência Agrotecnológica**, v. 30, p. 562–568, 2006.

- PRIMAVESI, O. et al. Calagem em pastagem de *Brachiaria decumbens* recuperada com adubação nitrogenada em cobertura. **Circular Técnica EMBRAPA**, v. 37, n. 37, p. 1–32, 2004.
- PRIMAVESI, A.C. et al. Adubação nitrogenada em capim- coastcross: Efeitos na extração de nutrientes e recuperação aparente do nitrogênio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.33, n.1, p.68-78, 2004.
- RAO, I. M.; MILES, J. W.; GRANOBLES, J. C. Differences in tolerance to infertile acid soil stress among germplasm accessions and genetic recombinants of the tropical forage grass genus, *Brachiaria*. **Field Crops Research**, v. 59, n. 1, p. 43–52, 1 out. 1998.
- ROSOLEM, C.A. Interação do potássio com outros íons. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T.L. (Eds.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005. p.239-260
- ROUT, G. R.; SAHOO S. Role of iron in plant growth and metabolism. **Reviews in Agricultural Science**, v. 3, p. 1- 24, 2015.
- ROWE, D. E.; FAIRBROTHER, T. E. **FORAGE PRODUCTION Harvesting Winter Forages to Extract Manure Soil Nutrients**. [s.l: 2003.
- RUAN, J.; WU, X.; HARDTER, R. Effects of potassium and magnesium nutrition on the quality components of diffents types of tea. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.79, p.47-52, 1999.
- SALMON, B. C., AND ARNOLD, P. W. **The magnesium uptake under exhaustive cropping**. *J. Agric. Sci.* 61, 421–425. (1963).
- SARDANS, J.; PEÑUELAS, J. Potassium Control of Plant Functions: Ecological and Agricultural. Implications. *Plants* 10, 419. **2021**,
- SENGER, C.G.D. et al. Teores minerais em pastagens do Rio Grande do Sul. II. Sódio, enxofre, zinco, cobre, ferro e manganês. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.32, n.1, p.101-108, 1997.
- SINKHORN E. R.* Non-Linear Nitrogen Cycling and Ecosystem Calcium Depletion Along a Temperate Forest Soil Nitrogen Gradient. **Tese de doutorado**, Oregon State University, Corvallis, OR. (2007)
- SKERMAN PJ, RIVEROS F. **Gramíneas tropicales**. (2nd Edn.). Roma: FAO, pp. 849. (1992)
- SILVA, D. R. G. et al. Doses e fontes de nitrogênio na recuperação das características

estruturais e produtivas do capim-marandu. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 44, n. 1, p. 184–191, 2013.

SILVA, A. DE A. et al. Absorção de micronutrientes em pastagem de brachiaria decumbens, após aplicação de cama de peru e fontes minerais na fertilização. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 1, p. 41–48, 2011.

SILVA, F.F.. Reconhecimento de padrões de nutrição para nitrogênio e potássio em híbridos de milho por análise de imagens digitais. 2015. **Tese (Doutorado em Qualidade e Produtividade Animal)** - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2015.

SILVEIRA, C. P. et al. Two years of nitrogen and sulfur fertilizations in a signal grass pasture under degradation: Changes in the root system. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, n. 6, p. 1195–1203, 2011.

SIQUEIRA, C. ; et al. **Resposta de três gramíneas forrageiras tropicais à aplicação de calcário e fósforo em um solo ácido**. Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia. **Anais...Congresso Brasileiro de Zootecnia**, 1980

SUTRADHAR A.K, KAISER D.E, BEHNKEN L.M. Agronomy Journal 109 (3), 1048-1059, 2017. 23,

SCOTT, N. M.; WATSON, M. E.; CALDWELL, K. S. Response of grassland to the application of sulphur at two sites in north–east Scotland. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Edinburgh, v. 34, p. 357–361, 1983.

SOARES, E.; LIMA, L. A.; MISCHAN, M. M. et al. Efeito da relação entre teores trocáveis de Ca e Mg do solo na absorção de K por plantas de centeio. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 58, n. 4, p. 315-330, dez. 1983.

STEPIEN, A.; WOJTKOWIAK, K, PIETRZAK-FIECKO, R, ZALEWSKA, M.; GRZYWINSKA-RAPCA, M. Effect of manganese and nitrogen fertilization on the content of some essential micronutrients and composition of fatty acids in winter wheat grain. **Chilean J. Agric. Res.** vol. 79n. 4, 2019.

TAIZ, [et al.] ;**Fisiologia Vegetal** ; revisão técnica: Paulo Luiz de Oliveira. – 6. ed. – Porto Alegre : Artmed, 2017

TELES, T. G. M. et al. **Animal Sciences** Maringá. n. 2, p. 137–143, 2011.

TEITZEL, J. K.; WILSON, R. J. Productive and stable pasture systems for cattle fattening in the humid tropics. 2. Field testing on a naturally infertile site. **Agricultural Systems**, 1991.

TEMPLE, S. J., VANCE, C. P., AND GANTT, J. S. Glutamate synthase and nitrogen assimilation. *Trend. Plant Sci.* 3, 51–56. (1998).

TIAN Q. Y., LIU N. N., BAI W. M., LI L. H., ZHANG W. H. Disruption of metal ion homeostasis in soils is associated with nitrogen deposition-induced species loss in an Inner Mongolia steppe. (2015).

UJWALA RANADE-MALVI. Interaction of micronutrients with major nutrients with special reference to potassium. Karnataka **J. Agric. Sci.**,24 (1) : (106-109) 2011

VICENTE-CHANDLER, J. et al. Potassium Fertilization of Intensively Manage Grasses under Humid Tropical Conditions1. **Agronomy Journal**, v. 54, n. 5, p. 450, 1962

WILLETT, R., P. JAKOBSEN, AND B. A. ZARCINAS. Nitrogen-induced boron deficiency in Lucerne. **Plant and Soil** 86:443–446. 1985.

WERNER, J.C.; PAULINO, V.T.; CANTARELLA, H. et al. Forrageiras. In: RAIJ, B. Van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico, 1997. p. 263-273 (Boletim Técnico, 100).

XU, Y.C.; ZHAO, B.L. The main origin of endogenous NO in higher non-leguminous plants. **Plant Physiology and Biochemistry**. v.41, p.833-838, 2003.

DIAGNOSE DO ESTADO NUTRICIONAL DE NITROGÊNIO, POTÁSSIO E CÁLCIO EM *UROCHLOA BRIZANTHA* CV. MARANDU UTILIZANDO-SE TÉCNICAS DE MACHINE LEARNING

RESUMO

A aquisição de dados por imagens representa uma vantagem significativa na agricultura, pois permite realizar inspeções mais rápidas e baratas em grandes áreas. Na última década, a combinação de imagens digitais e técnicas de aprendizado de máquina aplicados a agricultura tem sido um dos elementos mais estudados da agricultura digital. A princípio, a maior parte das pesquisas foi dedicada à identificação e classificação de doenças e pragas de plantas. Embora um progresso significativo também tenha sido feito no uso de imagens com o propósito de determinar o status de nutricional das plantas esses estudos são poucos e aqueles focados em pastagens ainda mais escassos. Neste sentido o propósito desta pesquisa foi avaliar a eficácia da utilização da análise de imagens e machine learning na identificação do estado nutricional do capim-marandu. A primeira parte da pesquisa foi o cultivo de plantas em solução nutritiva em casa de vegetação com a finalidade da manifestação dos sintomas típicos de deficiência. A segunda etapa da pesquisa consistiu na análise de imagem das folhas diagnóstico do capim F1 (folha mais jovem completamente expandida) e F2 (segunda folha mais jovem completamente expandida) para a detecção do status nutricional das plantas por meio de dois métodos de análise de imagens. É possível detectar o estado nutricional de N, Ca e K em capim-marandu usando técnicas de classificação de aprendizado de máquina a partir de imagens RGB, com diferença de desempenho entre as metodologias e métodos utilizados.

Palavras chave: azul, verde, vermelho, RGB, visão artificial,

DIAGNOSIS OF THE NUTRITIONAL STATUS OF NITROGEN, POTASSIUM AND CALCIUM IN UROCHLOA BRIZANTHA CV. MARANDU USING MACHINE LEARNING TECHNIQUES

ABSTRACT

Image data acquisition represents a significant advantage in agriculture, as it allows for faster and cheaper inspections over large areas. In the last decade, a combination of digital imagery and scientific machine learning techniques agriculture has been one of the most studied elements of digital agriculture. At first, most of the research was devoted to identifying and classifying plant diseases and pests. Although significant progress has also been made in the use of imaging for the purpose of determining the nutritional status of plants, studies are few and those focusing on pastures even more scarce. In this sense, the purpose of this research was to evaluate the effectiveness of using image analysis and machine learning to identify the nutritional status of marandu grass. The first part of the research was the cultivation of plants in nutrient solution in a greenhouse with the manifestation of typical deficiency symptoms. The second stage of the research consisted of image analysis of the diagnostic leaves of grass F1 (youngest fully expanded leaf) and F2 (youngest fully expanded leaf) to detect the nutritional status of plants using two image analysis methods. It is possible to detect the nutritional status of N, Ca and K in marandu grass using machine processing classification techniques from RGB images, with a difference in performance between the methodologies and methods used.

Keyword: blue, green, red, RGB, artificial vision

1.10 INTRODUÇÃO

Atualmente, o desenvolvimento de abordagens de análises de imagens e de técnicas de machine learning fornecem aos pesquisadores alternativas até então inimagináveis em vários campos da ciência. Na agricultura, o processamento digital de imagens tem sido usado com sucesso no manejo e monitoramento de culturas (KOUMPOUROS et al., 2004; PYDIPATI et al., 2006; SKALOUDOVA et al., 2006; BURKS et al. (2005);, ROMUALDO 2014, SILVA 2015, BAESSO et al. 2007) .

A possibilidade de um manejo automatizado da nutrição das plantas trará enormes aumentos de produtividade (SABERIOON et al., 2014), em função disto, para estimar o estado nutricional de plantas usando técnicas de processamento de imagens, diferentes abordagens vêm sendo investigadas. Estudos relataram o uso de análise de imagem digital para determinar o estado nutricional, teor de clorofila ou outros critérios baseados na cor da folha, como a diferenciação entre espécies ou deficiências de nutrientes MOGHADDAM et al., 2010 , PAGOLA et al. , 2009 , VOLLMANN et al., 2011 , WIWART et al., 2009; (SILVA, et al 2014, MOTTA et al 2016, ROMUALDO et al., 2014).

Os nutrientes essenciais são diretamente envolvidos no metabolismo das plantas (MALAVOLTA, 2006), em consequência disto, quando a deficiência de um nutriente atinge um determinado nível, as plantas apresentam sintomas característicos. Como a luz absorvida pelas plantas é uma função do conteúdo de elementos nutrientes (GITELSON et al., 2003) a avaliação dos índices de vegetação permite identificar o estado nutricional das plantas, principalmente em relação ao nitrogênio (SANTOS et al. 2017, HUANG et al. 2018). Um índice de vegetação é resultado de uma certa combinação das propriedades de reflectância medida por sensor com 2 ou mais comprimentos de onda que mostra características particulares da vegetação.

As técnicas de processamento digital de imagens apresentam grande potencial para a obtenção de índices que expressem a cor verde da planta (KARCHER & RICHARDSON, 2003). Os índices de vegetação mais comumente usados utilizam as informações contidas nas refletâncias ou radiâncias do dossel vermelho e infravermelho próximo (NIR). Eles são combinados na forma de razões: índice de vegetação de razão (RVI) ou índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI). O NDVI foi usado por Jordan (1969) e Rouse et al. (1973), respectivamente, para relacionar a razão de refletância no infravermelho próximo (NIR) para determinação de biomassa.

A análise de cores é realizada de diferentes maneiras: alguns autores usam fotografias de áreas homogêneas de folhas destacadas ou outras partes de plantas fotografadas em condições controladas (WIWART et al., 2009, VOLLMANN et al., 2011), outros analisam a cor média do todo área da imagem de um dossel, principalmente no campo (CASADESUS et al., 2007, HIMSTEDT et al., 2009, JENSEN et al., 2007, MOGHADDAM et al., 2010)

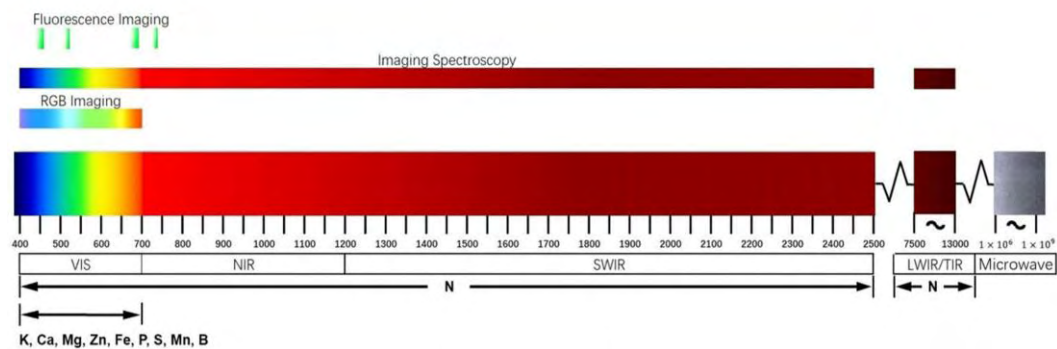


Figura 1. Métodos de imagem existentes para análise nutricional das culturas: imagem RGB, imagem de fluorescência e espectroscopia de imagem. A imagem RGB tem comprimento de onda de 400 a 700 nm (luz visível). Daoliang Li et al, 2020.

A clorofila da folha e o conteúdo de N são intimamente relacionados, portanto, decisões sobre o manejo do fertilizante N têm sido apoiadas usando medidores portáteis de clorofila manuais não destrutivos, como o SPAD-502 (Minolta) para algumas culturas (LE BAIL et al., 2005, ARREGUI et al., 2006; WU et al., 2007; LIU et al., 2006). O clorofilômetro portátil proporciona leituras instantâneas não destrutivas de folhas e é uma alternativa para determinação do índice de clorofila nas folhas (ARGENTA et al., 2002).

Pode-se verificar pela literatura que a detecção de N é atualmente a mais utilizada e os métodos de imagem são diversos, pesquisas para outros elementos nutrientes são relativamente raros e limitados no uso de luz visível portanto, considerando que, até o momento, não foram encontrados na literatura estudos utilizando técnicas de classificação de aprendizado de máquina a partir de imagens RGB para detecção de deficiências nutricionais diferentes de nitrogênio em pastagens, este é o primeiro trabalho, de nosso conhecimento, avaliando o potencial de uso dessas técnicas para detectar deficiências de N, Ca e K em capim-marandu (*Brachiaria brizantha* cv. Marandu Syn. *Urochloa brizantha* cv. Marandu).

Neste estudo, apresentamos um novo método de baixo custo para avaliar o estado nutricional de N, K e Ca através da análise da cor das imagens das folhas por meio de *machine learning* e comparamos com outras metodologias, como o método de análise de imagens

utilizando-se classificadores (SILVA, 2016; ROMUALDO, 2014, MOTTA 2016) e com o uso de medidores portáteis como SPAD-502 e NDVI.

1.11 MATERIAL A MÉTODOS

1.11.1 Cultivo das plantas e análise química do tecido vegetal

A parte experimental do projeto foi constituída de 3 pesquisas independentes: 1) estudo do nitrogênio (N), 2) estudo do potássio (K) e 3) estudo do cálcio. Os experimentos foram conduzidos simultaneamente em casa-de-vegetação localizada na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP), Campus de Pirassununga-SP no setor de Ciências Agrárias sob localização 21 57'S e 47 27'N, e 600 metros de altitude. A cultura estudada foi *Urochloa brizantha* cv. Marandu a qual foi cultivada sob cultivo hidropônico, em vasos de polietileno com capacidade de 3,6 litros de solução nutritiva. Os vasos pintados externamente para evitar a entrada de luz e conseqüentemente a proliferação de algas e musgos.

A semeadura do capim foi feita em bandejas plásticas com vermiculita, onde as plantas foram mantidas durante duas semanas após a emergência e irrigadas com água deionizada. Após esse período, foram transplantadas três plantas para cada vaso, aplicando-se as soluções nutritivas respectivas para cada tratamento de forma diluída, para que não ocorresse estresse salino as raízes. Cada vaso continha uma tampa perfurada na qual foram fixadas três plantas envoltas na altura do colo por uma espuma, proporcionando que raízes permanecessem imersas na solução nutritiva. Após a ambientação das plantas, as soluções nutritivas nas doses estudadas efetivamente aplicadas (**Anexo 65**)

Em cada experimento, as plantas foram submetidas a 4 doses do nutriente estudado: D1= 6% da dose completa do nutriente; D2= 20% da dose completa; D3= 100% (dose completa) e D4= 200% da dose completa (dose excedente), com três repetições. Essas doses de nutrientes correspondem respectivamente a 12,0; 42,0; 210,0 e 420 Mg L⁻¹ de N (para o experimento com doses de N) e 14,1; 46,9; 234,6 e 469,1 g L⁻¹ de K (para o experimento com doses de K) e 12,0; 40,1; 200,4 e 400,8 mg L⁻¹ de Ca (para o experimento com doses de Ca). Todas as soluções nutritivas foram preparadas a partir da solução completa de Hoagland e Arnon (1950), modificada para atender às doses de N, K e Ca estabelecidas nos estudos (**Tabela 1**). Os dados de temperatura do período experimental encontram-se no anexo.

As soluções nutritivas foram trocadas semanalmente, completando-se quando necessário o nível da solução do vaso com água deionizada, obtida pela utilização do sistema de filtros de osmose reversa, e monitorado o valor do pH para permanecer entre 5,0 e 6,0

mediante o uso de HCl 0,1N e NaOH 1N. Cada vaso recebia automaticamente ar comprimido filtrado e borbulhado durante 10 segundos a cada 30 segundos

Tabela 1. Comparativo da concentração dos macronutrientes (mg L^{-1}) nas soluções nutritivas experimentais com a solução proposta por Hoagland & Arnon (1938).

Nutriente	Hoagland & Arnon (1938)	Nível de nutrientes na solução nutritiva (mg L^{-1})			
		6%	20%	100%	200%
Experimento N					
Nitrogênio	210,0	12,0	42,0	210,0	420,0
Fósforo	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0
Potássio	234,6	234,6	234,6	234,6	234,6
Cálcio	200,4	200,4	200,4	200,4	200,4
Magnésio	48,6	48,6	48,6	48,6	48,6
Enxofre	64,2	64,2	64,2	64,2	64,2
Experimento K					
Nitrogênio	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0
Fósforo	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0
Potássio	234,6	14,1	46,9	234,6	469,1
Cálcio	200,4	200,4	200,4	200,4	200,4
Magnésio	48,6	48,6	48,6	48,6	48,6
Enxofre	64,2	64,2	64,2	64,2	64,2
Experimento Ca					
Nitrogênio	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0
Fósforo	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0
Potássio	234,6	234,6	234,6	234,6	234,6
Cálcio	200,4	12,0	40,1	200,4	400,8
Magnésio	48,6	48,6	48,6	48,6	48,6
Enxofre	64,2	64,2	64,2	64,2	64,2

As plantas foram avaliadas em 3 ciclos de crescimento em sequência, com cortes realizados a cada 28 dias. Em cada época de avaliação estabelecida as amostras de folhas F1 (folha mais jovem completamente expandida) e F2 (segunda folha mais jovem completamente expandida) foram coletadas, scaneadas, lavadas com água deionizada, levadas à estufa de circulação forçada, a 65°C até peso constante para a determinação da massa seca. Foram feitas amostragens de vinte e cinco lâminas foliares, por vaso, para análise química e obtenção das imagens de doze lâminas foliares folhas de cada vaso (F1 ou F2). Em seguida as folhas foram pesadas, lavadas em água deionizada de solução de ácido clorídrico ($3,5 \text{ mL.L}^{-1}$) (PERYEA, 2005), As folhas foram moídas em moinho tipo Wiley, identificadas e encaminhadas ao laboratório para determinação da concentração de nitrogênio (N) ou de potássio (K), ou cálcio (Ca) segundo métodos descritos por Bataglia et al. (1983). Aquisição das imagens e índices SPAD e NDVI (**Anexo 66**).

As imagens digitais das lâminas foliares do capim-marandu foram obtidas utilizando scanner de mesa da marca HP®, modelo scanjet 3800. As imagens foram salvas no formato TIFF (tagged image file format) com uma resolução de 1200 dpi (dot per inch – pontos por polegada). As oito lâminas foliares de cada parcela (F₁ ou F₂) foram digitalizadas de uma só vez.

O índice SPAD foi mensurado em todas as lâminas F₁ e F₂ utilizando-se o equipamento que mede os níveis de clorofila em folhas. As medições são efetuadas nas vinte e cinco lâminas foliares as quais foram realizadas as análises químicas do tecido, conforme descrito anteriormente. As medidas de NDVI foram obtidas utilizando o sensor de lavoura portátil Greenseeker™, da Trimble, antes da retirada das lâminas foliares das parcelas. As medições foram efetuadas a uma altura de 30 cm do topo do dossel da planta. Foram realizadas leituras procurando-se amostrar todo do vaso, captando-se pontos seguindo os pontos cardeais e uma captação no centro da parte aérea do dossel. O sensor era acionado por 15 segundos e fornecia o valor médio das leituras realizadas durante o período de tempo. Os valores de NDVI obtidos correspondem a média do dossel de cada vaso.

1.11.2 Métodos de análise das imagens

1.11.2.1 Método utilizando-se machine learning

1.11.2.1.1 Preparo das imagens

As imagens salvas no formato TIFF com resolução de 1200 dpi contendo as oito lâminas foliares de cada parcela (F₁ ou F₂) foram separadas (**Figura 2**). Cada imagem de oito folhas foi segmentada em 8 imagens contendo uma folha cada e salvas uma a uma com identificações referentes ao tipo de folha (F₁ ou F₂) tratamento (doses no nutriente estudado) e ciclo de crescimento (primeiro, segundo ou terceiro).

Essa segmentação foi realizada no programa Adobe Photoshop® (2020). O n do banco de dados foi composto de 288 amostras para cada folha (F₁ ou F₂) considerando-se 4 tratamentos x 8 folhas escaneadas x 3 repetições x 3 ciclos de crescimento. Cada experimento (N, K ou Ca) gerou 576 folhas com um total de 1728 folhas escaneadas nas 3 pesquisas conduzidas.

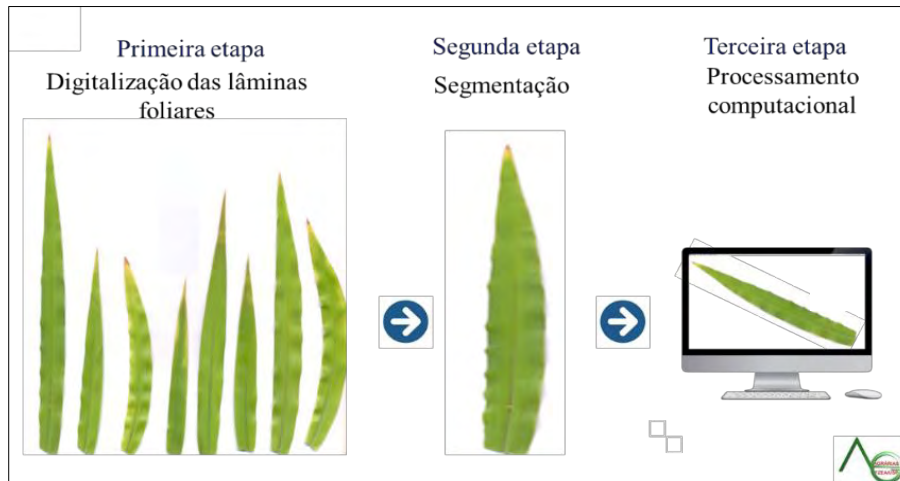


Figura 2. Método de segmentação das folhas antes da extração dos índices para análise computacional. Folhas foram separadas e salvas uma a uma para posterior processamento computacional

1.11.2.1.2 Etapas do processo de análise

Para extração das intensidades RGB, as imagens foram pré-tratadas com a aplicação de um filtro de mediana (Eq. (1) e (2)), a fim de remover ruídos (ZHU; HUANG, 2012; YOUSEFI, 2011). Este filtro não linear aumenta mantém boas características de manutenção de bordas, eliminando linhas e outros detalhes finos que não pertencem à imagem.

$$W_{(s,s)} = f[(x - 1 : x + 1), (y - 1 : y + 1)]; \text{ where } 1 < x < m, 1 < y < n \text{ e } f \quad (1)$$

$$g_{(x,y)} = \text{med}[W(N - k), W(N - k + 1), \dots, W(N), W(N + k - 1), W(N + k)] \quad (2)$$

Onde: **g** é a imagem de saída, **f** é a imagem original, **(x, y)** é a coordenada do ponto; **W** é a máscara bidimensional, de preferência uma matriz ímpar ($s \times s$); **med** é a função que escaneia a imagem original **f** com a Matriz **W**, que contém o ponto **(x, y)** e seus vizinhos adjacentes, retornando após ordenar os números o valor central da Matriz **W**; **N** é o número de elementos na matriz ímpar **W** e é calculado por $2 * k + 1$; **k** é o número de elementos antes e depois do ponto **(x, y)** e **s** é a dimensão da Matriz **W** que corresponde a $k-1$.

A seguir, a imagem foi convertida para tons de cinza (**h**) e as regiões de interesse (ROI), pixels com informações das folhas, foram obtidas pelo método de limiar

$$I_{(x,y)} = \begin{cases} 1 & \text{if } h_{(x,y)} \geq T \\ 0 & \text{if } h_{(x,y)} < T \end{cases} \quad (3)$$

onde: **h** é a imagem em tons de cinza; **I**, imagem segmentada, **(x, y)**, posição do pixel e **T**, valor de limiar obtido usando o método de Otsu.

Aplicando um algoritmo de varredura (pixel a pixel), a ROI foi convertida para a cor correspondente das folhas, tomando os valores RGB originais de cada pixel, e o fundo foi convertido em branco. A imagem processada foi então submetida a uma análise pixel a pixel, a partir da qual foram adquiridas as intensidades RGB. Todas as funções, scripts e interfaces de usuário foram implementados em Python 3.6.9, utilizando a biblioteca OpenCV (Open Source Computer Vision Library) versão 3.4.2. De imagem foram extraídos 18 índices R, G, B, RN, GN, BN, Vari, Matiz, Saturação, Brilho, ExG, ExR, ExGR, MExG, Cive, Veg, COM, DGCI. A fórmula de cálculo destes são demonstrados na **tabela 2**. A análise exploratória utilizando componentes principais (PCA) demonstrou que 92% da variação no conjunto de dados foi explicada por dois componentes, compostos ainda pelos 18 índices analisados. Como todos os índices foram identificados como significativos nesta primeira PCA foram aplicados em nova análise, onde foi confirmado que a variância no conjunto de dados foi explicada por dois componentes principais, sendo todos os índices utilizados no estudo.

Tabela 2. Equações para obtenção índices utilizados no método de análise das imagens por redes neurais.

Variável	Equação	Autor
Brilho	$\max R,G,B / 255$	Wang et al. (2003)
B _N	$B / (R + G + B)$	Yang et al. (2015)
CIVE	$0.441 * RN - 0.811 * GN + 0.385 * BN + 18.78745$	Guijarro et al. (2011) e Yang et al. (2015)
COM	$0.25 * ExG + 0.30 * ExGR + 0.33 * CIVE + 0.12 * VEG$	Yang et al. (2015)
DGCI	$((H - 60)/60 + (1 - S) + (1 - Brilho)) / 3$	Karcher & Richardson (2003)
ExG	$(2 * GN) - RN - BN$	Guijarro et al. (2011) e Yang et al. (2015)
ExR	$(1.4 * RN) - GN$	Guijarro et al. (2011) e Yang et al. (2015)
ExGR	$ExG - ExR$	Guijarro et al. (2011) e Yang et al. (2015)
Matiz	$\text{arctangente} ((2R - G - B) / 30.5) (G - B)$	Escadafal, R.; Huete, A (1991)
Saturação	$(\max(R,G,B) - \min(R,G,B)) / \max(R,G,B)$	Duveiller et. al, 2011
VEG	$GN / (RN0,667) * (BN1-0,667)$	Guijarro et al. (2011) e Yang et al. (2015)
VARIgreen	$(G - R) / (G + R - B)$	Gitelson et al. (2002)
G _N	$G / (R + G + B)$	Yang et al. (2015)
R _N	$R / (R + G + B)$	Yang et al. (2015)

1.11.2.1.3 Redes neurais utilizadas

Para a implementação do software de classificação foi utilizado o software Matlab (versão 2015a), onde foram implementadas as redes neurais do tipo Multilayer Perceptron (MLP). Esta rede apresenta facilidade de treinamento supervisionado e trabalho com múltiplas camadas, tem sido empregada em vários estudos a fim de resolver problemas de classificação e agrupamento (HAYKIN, 2001). Basicamente, esta é uma rede neural que apresenta uma ou mais camadas ocultas com um número indeterminado de neurônios. A camada oculta é assim chamada pelo fato de não ser possível prever a saída desejada nas camadas intermediárias.

Esta rede utiliza um algoritmo de retropropagação do erro (Error Back-Propagation – BP), fazendo sua aprendizagem pela correção do erro, aplicando uma generalização do mínimo quadrado médio (LMS). A retropropagação foca nos desvios (erros) entre as respostas desejadas e as produzidas pelos neurônios de saída, ajustando, então, os pesos e limiares de todos os neurônios para o correto treinamento da rede (HAYKIN, 2003). De forma simples, os valores de entrada se propagam camada por camada a frente, com os pesos sinápticos fixos nos neurônios, gerando uma saída. Em seguida, realiza um passo atrás, ajustando os pesos sinápticos dos neurônios, de acordo com uma regra de correção, objetivando atingir a saída desejada (HAYKIN, 2003).

A estrutura da rede pode ser visualizada através da **Figura 3**. Sua configuração é possível em dois formatos: a FFBP (Feed-Forward Back-Propagation), em que os dados de uma camada passam somente para a camada imediatamente seguinte de forma sequencial e a CFBP (Cascade-Forward Back-Propagation), em que as camadas além de receber os dados da camada imediatamente anterior, também recebem dados de outras camadas antecessoras, incluindo a camada de entrada, realizando o efeito cascata dos dados.

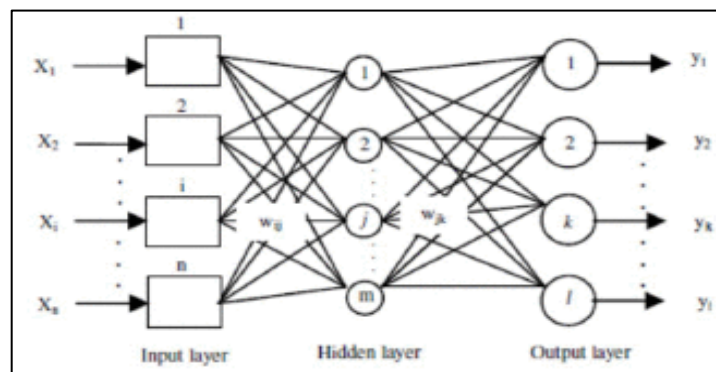


Figura 3. Arquitetura de percepção de múltiplas camadas. Widiyasi, Widyawan, 2017.

Em nosso estudo foram implementadas variações no algoritmo de treinamento, de ativação e no número de neurônios na camada intermediária para a validação da melhor configuração de rede para a classificação da classe correspondente ao teor do nutriente determinado em laboratório. Os tipos de redes implementados para o treinamento foram a Feed-Forward Backpropagation, a Cascade-Forward Backpropagation com uma camada escondida, variando somente a quantidade de neurônios (**Figuras 4 e 5**)

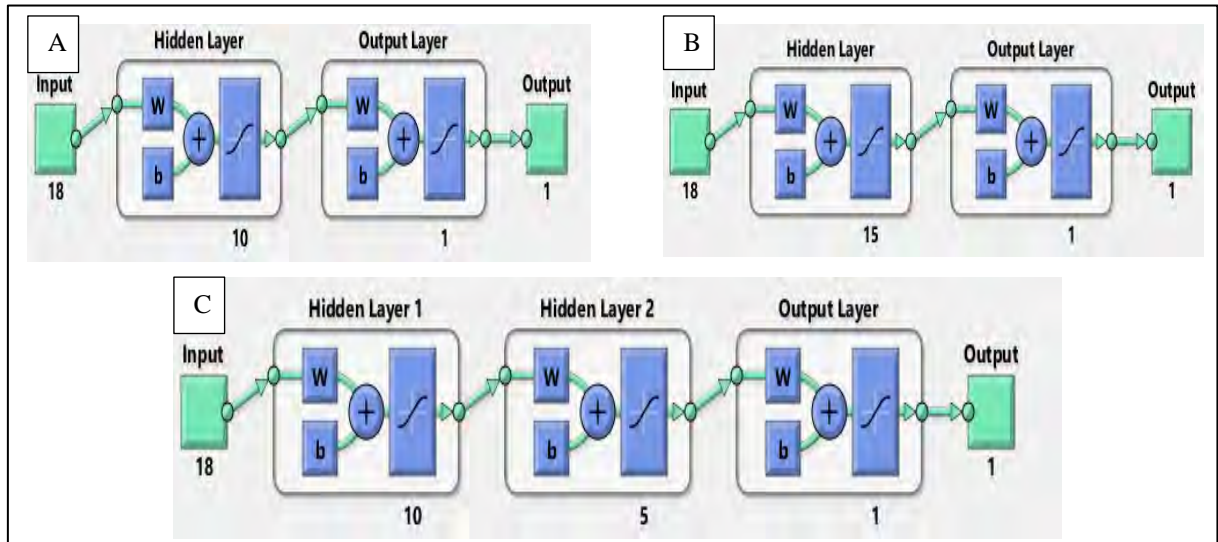


Figura 4. Configuração Feed-Forward Backpropagation. Verifica-se que há conexões entre as próximas camadas porém não há caminho de volta. Estrutura FFBP (A) 18-10-1, (B) 18-15-1, (C) 18-10-5-1.

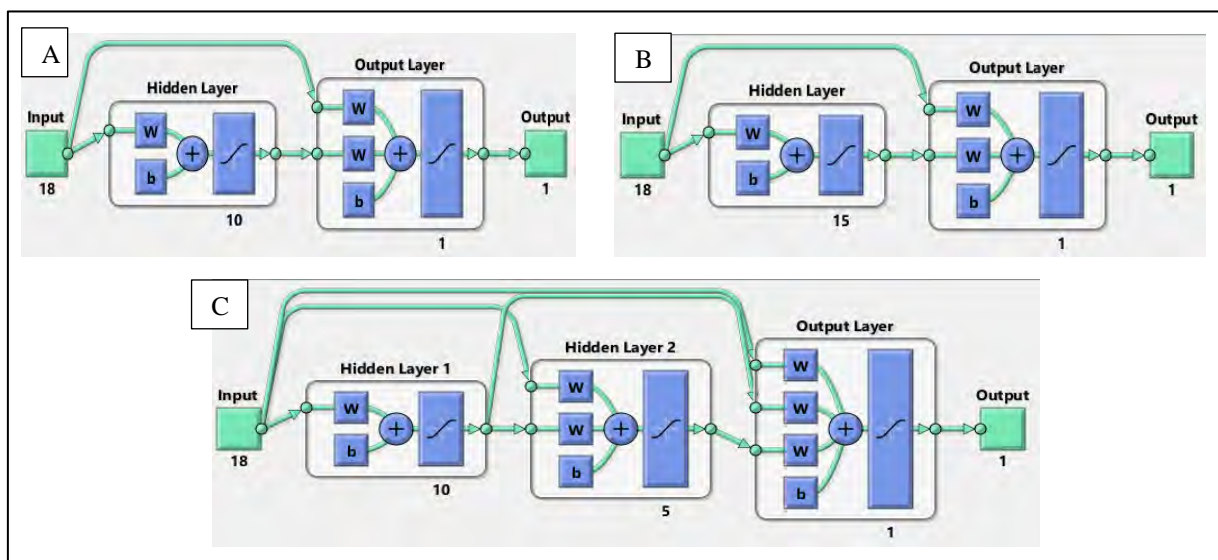


Figura 5. Configuração Cascade-Forward Backpropagation utilizada no estudo. Verifica-se que, em que as camadas além de receber os dados da camada imediatamente anterior, também recebem dados de outras camadas antecessoras, incluindo a camada de entrada, realizando o efeito cascata dos dados. Estrutura CFBP (A) 18-10-1, (B) 18-15-1, (C) 18-10-5-1.

Para a implementação do software de classificação do status nutricional para N, K e Ca utilizou-se o software Matlab (versão 2015a), no qual implementaram-se as redes neurais anteriormente descritas (do tipo Multilayer Perceptron (MLP)), com variações no algoritmo de treinamento, de ativação e no número de neurônios na camada intermediária para a validação da melhor configuração de rede para a classificação da classe correspondente ao teor do nutriente determinado em laboratório por meio da análise química do tecido vegetal. Os tipos de redes implementados para o treinamento foram a Feed-Forward Backpropagation, a Cascade-Forward Backpropagation com uma camada escondida, variando somente a quantidade de neurônios (5, 10 e 15), a função de treinamento utilizada foi a Levenberg Marquardt, a função de aprendizado adaptativo foi a GDM e, as funções de ativação foi a hiperbólica (tansig). Para os treinamentos foram utilizados 70% dos dados, sendo o restante 30% distribuídos entre a validação e o teste, ou seja, 15% para cada um. Ao final das etapas de treinamento, validação e teste, realizou-se uma nova validação das determinações utilizando-se as imagens originalmente escaneadas, as quais continham as 8 lâminas foliares correspondentes a cada repetição de cada unidade experimental em seu ciclo de crescimento correspondente.

1.11.2.2 Método utilizando-se classificadores

As imagens salvas no formato TIFF com resolução de 1200 dpi contendo as oito lâminas foliares de cada parcela (F_1 ou F_2) foram separadas (Figura 2). Após a segmentação, para o processamento das imagens o sistema computacional MATLAB® foi empregado para extração dos blocos das imagens, bem como geração dos índices espectrais e classificação das imagens. Os índices espectrais foram analisados em 80 blocos de cada imagem com oito lâminas foliares, ou seja, o equivalente a 10 blocos de cada folha, representando a refletância das imagens das lâminas.

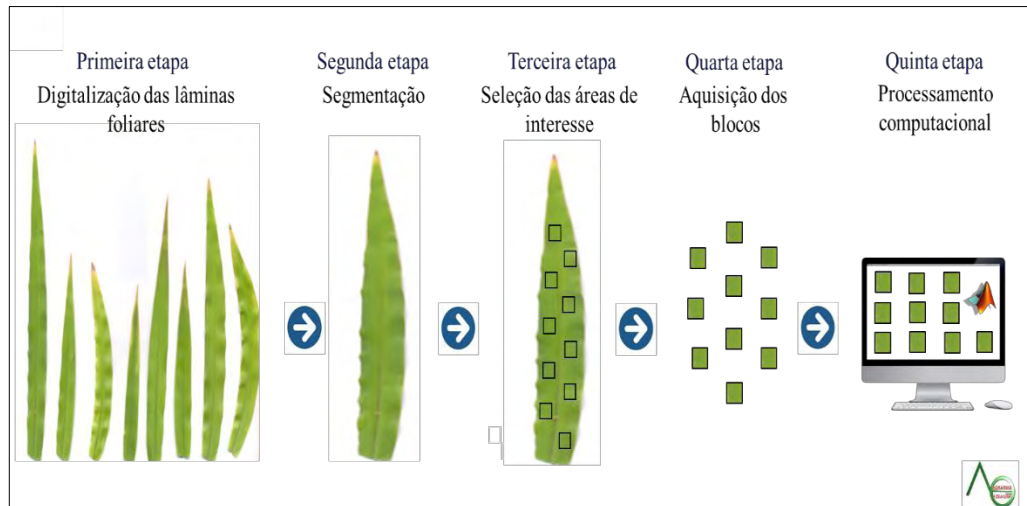


Figura 6. Etapas pré-processamento computacional. Segmentação das folhas > Seleção das áreas de interesse eliminando-se nervuras e bordas > aquisição dos blocos. Após esta etapa procede-se o processamento computacional.

Cada bloco extraído teve a dimensão de 9x9 pixels, sendo que cada pixel tem tamanho de 0,27mm. O N do banco de dados foi composto de 288 amostras para cada folha (F1 ou F2) considerando-se 4 tratamentos x 8 folhas escaneadas x 3 repetições x 3 ciclos de crescimento. Cada experimento (N, K ou Ca) gerou 576 folhas com um total de 1728 folhas escaneadas nas 3 pesquisas conduzidas. Considerando-se que foram retirados 10 blocos por folha para análise, o banco de dados analisado foi de 17.280 (dezesete mil duzentos e oitenta) blocos.

Para cálculo dos índices espectrais foram utilizadas as equações abaixo:

$$Evd = \frac{2.Vd - Vm - Az}{Vm + Vd + Az} \quad (4)$$

$$Vern = \frac{Vm}{Vm + Vd + Az} \quad (5)$$

$$Vn = \frac{Vd}{Vm + Vd + Az} \quad (6)$$

$$Rvv = \frac{Vd}{Vm} \quad (7)$$

(4) *Evd*: excesso de verde; *Vd*: média dos pixels na banda do verde; *Az*: média dos pixels na banda do azul; *Vm*: média dos pixels na banda do vermelho; (5) *Vern*: vermelho normalizado; (6) *Vn*: verde normalizado (6) *Rvv*: razão verde-vermelho.

Os vetores de características utilizados como variável de entrada no classificador, para reconhecimento do estado nutricional para N, K e Ca (**Tabela 3**).

Tabela. 3. Vetores de características (x) que serão utilizados pelos classificadores para discriminar o estado nutricional para N, K e Ca.

Número de índices			
Um	Dois	Três	Quatro
$x = 1$	$x = 1 \text{ e } 2$	$x = 1, 2 \text{ e } 3$	$x = 1, 2, 3 \text{ e } 4$
$x = 2$	$x = 1 \text{ e } 3$	$x = 1, 2 \text{ e } 4$	
$x = 3$	$x = 1 \text{ e } 4$	$x = 1, 3 \text{ e } 4$	
$x = 4$	$x = 2 \text{ e } 3$	$x = 2, 3 \text{ e } 4$	
	$x = 2 \text{ e } 4$		
	$x = 3 \text{ e } 4$		

*1: excesso de verde; 2: razão verde-vermelho; 3: verde normalizado; 4: vermelho normalizado.

Foi utilizado o método de validação cruzada, deixando um de fora, para avaliação do erro de classificação. Após a validação, foi criada uma matriz de erros para que a avaliação do classificador fosse feita através de coeficiente Kappa. Para classificação das imagens utilizando índices espectrais como descritores será utilizado classificador estatístico bayesiano (GONZALEZ e WOODS, 1992), segundo a função:

$$dj(x) = \ln P(W_j) - \frac{1}{2} \ln(\det C_j) - \frac{1}{2} [(x - m_j)^T C_j^{-1} (x - m_j)] \quad (5)$$

(1) dj : função discriminante da classe j ; C_j : matriz de covariância da classe j ; $\det C_j$: determinante da matriz de covariância da classe j ; x : vetor de características, m_j : vetor de médias da classe j ; n : dimensão do vetor de características; $P(W_j)$: probabilidade a priori da classe j e T : símbolo que representa a transposta de uma matriz.

1.11.3 Análise do desempenho dos métodos de análise de imagens

Para cada método estudado os resultados da classificação foram incluídos nas colunas da matriz, sendo que nas linhas correspondentes a diagonal principal pode-se verificar as observações classificadas corretamente e nas demais linhas o número de observações classificadas erroneamente. Ao se realizar a divisão do total de observações classificadas erroneamente da classe pelo total de observações desta, ou seja, pelo total da linha, calcula-se o *erro de omissão* da classe que significa que a classe predita não foi classificada corretamente na classe que ele pertence. O total de observações omitidas dividido pelo total de observações da amostra de referência é o erro global. Na linha, a soma dos valores fora da diagonal principal dividido pelo total da coluna é o *erro de inclusão* da classe, que significa que a classe predita é incluída em uma classe que ele não pertence

Foi utilizado classificador estatístico para definição da melhor rede neural ou vetor de características. A porcentagem de acerto global (PAG) será a medida de desempenho da totalidade de classificação, e pelo índice Kappa de Cohen (\hat{k}).

$$PAG = \frac{cc}{n_t} \times 100 \quad (8)$$

$$\hat{k} = \frac{nt \sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c x_{i\oplus} x_{\oplus i}}{n_t^2 - \sum_{i=1}^c x_{i\oplus} x_{\oplus i}} \quad (9)$$

* cc : número de amostras classificadas corretamente; n_t : número total de amostras; \hat{k} : estimativa do coeficiente Kappa; x_{ii} : valor na linha i e coluna i (diagonal da matriz de erros), $x_{i\oplus}$: total da linha i (erro de omissão); $x_{\oplus i}$: total da coluna i (erro de inclusão), c : total de doses.

A matriz de erro foi elaborada conforme CONGALTON (1991). A matriz de erro possibilitou o emprego de uma ferramenta de avaliação do classificador: o coeficiente Kappa (K). O coeficiente Kappa é uma avaliação bem mais adequada que a PAG, devido ao fato de ser sensível não só à perda de acurácia global como um todo, mas também devido às variações dos erros de omissão e de inclusão (PEDREIRA e SANTOS, 1999). O coeficiente Kappa é uma medida de quanto a classificação das imagens foi diferente de uma classificação aleatória (ROSENFELD e FITZPATRICK, 1986). A avaliação da classificação foi feita de acordo com o critério desenvolvido por (ADAMI et al., 2002): (**Tabela 4**)

Tabela 4. Intervalo de classes e classificação do índice Kappa

Índice Kappa	Classificação
< 0	Péssima
0 - 0,20	Ruim
0,21 - 0,40	Razoável
0,41 - 0,60	Boa
0,61 - 0,80	Muito boa
0,81 - 1,0	Excelente

1.11.4 Análise do conteúdo de nutrientes nas folhas e produção de matéria seca

A análise de variância foi realizada separadamente para cada ciclo de crescimento, e dentro de cada ciclo de crescimento separadamente para a categoria de folhas (F_1 e F_2) usando o procedimento MIXED no software SAS®, versão 9.3 para Windows®. Os níveis de concentração de nutrientes na solução nutritiva, os ciclos de crescimento e suas interações

foram considerados efeitos fixos. O ciclo de crescimento foi considerado uma medida repetida, e a matriz de covariância utilizada para a análise foram os componentes de variância (VC). Para todas as variáveis, a correção dos graus de liberdade foi aplicada de acordo com o método de Kenward e Roger (1997) (DDFM = KR).

Quando detectada uma interação significativa, declarada quando $P < 0,05$, foi feita uma análise de regressão para cada ciclo de rebrota utilizando o procedimento REG do software SAS®, versão 9.3 para Windows®. A equação de regressão de melhor ajuste foi selecionada com base no coeficiente de correlação (R^2). A relação entre o teor de nutrientes (N, K e Ca) e a produção de massa seca (com base no ciclo de rebrota) permitiu estimar o ponto de rendimento máximo e também forneceu os modelos para estimar o nível crítico do nutriente nos tecidos foliares, os valores necessários para atingir 90% da produção máxima de biomassa e a faixa crítica de nutrientes (CNR, Dow e Roberts, 1982). A faixa crítica de nutrientes é a faixa de concentração de um elemento na folha abaixo do qual a produção é limitada e acima do qual a fertilização não seria econômica, separando assim a zona de deficiência da zona de suficiência (Malavolta e Cruz, 1971).

1.12 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.12.1 Nitrogênio

1.12.1.1 Nitrogênio na planta

1.12.1.1.1 Produção de matéria seca, faixa de suficiência e nível crítico

A faixa de suficiência para N obtida pelo cálculo da concentração do elemento na solução nutritiva ou na planta necessária para promover 90% da massa seca máxima da parte aérea da planta variou em função dos ciclos de crescimento, sendo os níveis críticos diferentes para cada ciclo de crescimento e folha avaliada. A concentração máxima de N na solução nutritiva (mg L^{-1}) e a concentração máxima de N foliar (g kg^{-1}) (P_{max}) obtidos a partir da derivada da equação de regressão obtida em cada ciclo também variou em função dos fatores folha (F1 ou F2) e ciclo avaliado (Ciclo de crescimento 1, 2 ou 3) (**Tabela 5**).

Os resultados de matéria seca no ponto de máxima (P_{max}) oscilaram entre 121,1 e 29,6 g vaso^{-1} na F₁ e 125,6 25,4 na F₂ com teores de N variando entre 17,36 e 38,2 g kg^{-1} (F1) e 20,1 e 26,3 g kg^{-1} (F2). Constata-se uma redução na produção de matéria seca no último ciclo de crescimento com conseqüente acúmulo de nutrientes na parte aérea. Isto pode ser explicado em razão do rebaixamento drástico da parte aérea (para a avaliação da matéria seca da parte aérea

de cada ciclo de crescimento, toda a parte aérea das plantas acima de 5 cm do colo das plantas foi considerada.) o que pode ter resultado no corte das gemas apicais do capim proporcionando uma diminuição no perfilhamento aéreo e principalmente do perfilhamento basal das parcelas com reflexos na produção da parte aérea das plantas. O perfilhamento basal foi correlacionado com a PMS da cultura (**Anexo 59**). Segundo Lara et al, 2011 a altura de corte afeta a densidade populacional de perfilhos (DPP), que é uma característica estrutural de grande importância para a persistência e produtividade de pastagens.

Tabela 5. Produção de matéria seca (MS) e parâmetros das equações de regressão da relação MS x teor de nitrogênio nas folhas ao longo dos ciclos de crescimento (ciclos de crescimento a cada 28 dias) do capim-marandu. O nível crítico do nutriente nos tecidos foliares foi calculado considerando o valor necessário para atingir 90% da produção máxima de biomassa.

Dose de nutrientes na solução nutritiva	Ciclos de crescimento					
	F ₁			F ₂		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
	Matéria Seca (MS) (g vaso ⁻¹)					
6%	6,3	20,7	5,2	6,3	20,7	5,2
20%	19,7	36,5	7,4	19,7	36,5	7,4
100%	75,3	114,5	27,8	75,3	114,5	27,8
200%	75,5	52,0	21,8	75,5	52,0	21,8
	Equações dos parâmetros de regressão					
c	-211,46	-285,51	-13,22	-127,83	-260,84	-27,03
b	+33,56	+39,45	+2,23	+20,59	+35,55	+3,99
a	-0,967	-0,957	-0,029	-0,513	-0,818	-0,076
r²	0,98	0,84	0,75	0,97	0,69	0,73
<i>P-valor</i>	<.0001	.0003	.0021	<.0001	.0048	.0028
Matéria seca no P _{Máx}	79,88	121,1	29,6	78,8	125,6	25,4
Teor de nutriente no P _{Máx}	17,36	20,6	38,2	20,1	21,7	26,3
Nível crítico	15,62	18,55	34,4	18,1	19,6	23,7

Em função de seu efeito sobre as forrageiras o nitrogênio é continuamente estudado visando aprimorar as recomendações de adubação nitrogenada. (GUERRA et al., 2019) recomendam realizar a adubação nitrogenada no capim marandu justificando que a baixa disponibilidade deste nutriente pode limitar o desenvolvimento das plantas. (COSTA et al., 2019) ao discutirem a viabilidade financeira da fertilização nitrogenada em pastagens concluem que o desempenho da fertilização nitrogenada é viável a partir do ponto de vista agrônomo, pois favorece o crescimento da forragem. (DELEVATTI et al., 2019) verificaram que fertilização com nitrogênio aumentou produção de matéria seca de maneira imediata, sendo que o rendimento de forragem foi afetado pela taxa de aplicação de nitrogênio que aumentou linearmente. Justificam que a diferença no rendimento da pastagem ocorreu devido à diferença na densidade de perfilhos, pois a altura da pastagem era a mesma e que a densidade do perfilho aumentou com o aumento das taxas de aplicação de nitrogênio

Para o cálculo da faixa crítica de nutrientes que, como comentado anteriormente, é a faixa de concentração de um elemento na folha abaixo do qual a produção é limitada e acima

do qual a fertilização não seria econômica, separando assim a zona de deficiência da zona de suficiência foram utilizados o banco de dados do experimento dos teores após a aquisição das equações dos parâmetros de regressão bem como os níveis críticos e ponto de máxima (P_{max} do nutriente), com base em todos os resultados obtidos o banco de dados foram classificados de tal forma a pertencerem a uma dessas classes: deficiência, faixa de teor adequado e consumo de luxo (**Tabela 6**). Essas classes foram determinadas para a utilização no método de análises de imagens utilizando-se machine learning, o qual será discutido posteriormente.

Tabela. 6. Classes determinadas em função dos resultados dos teores de N no tecido foliar

Classes determinadas	N g kg ⁻¹
Deficiência (CL1)	<15,5
Faixa de teor adequado (CL2)	15,6 a 20,0
Consumo de luxo (CL3)	>20,0

1.12.1.1.2 Alterações provocadas nas plantas pela deficiência ou excesso de N

Ele é um componente-chave de enzimas e outras proteínas essenciais para todas as funções de crescimento da planta (BRUNS e EBELHAR, 2006). Foi possível observar nas plantas sintomas característicos das alterações provocadas pela deficiência e excesso de N no capim marandu, destacando-se redução na altura, folhas amareladas, senescência precoce e a redução no tamanho das folhas, que é resultado do menor número de células presentes (MALAVOLTA, 2006).

Na diagnose visual comparativa entre as características relativas a coloração das folhas avaliadas F_1 (mais jovem completamente expandida) e F_2 (segunda mais jovem completamente expandida) nota-se uma maior alteração nas colorações das folhas F_1 , apesar da já conhecida mobilidade do N e possibilidade do nutriente pelo floema. Nota-se nas folhas que foram escaneadas para as análises de imagem grande diferença no tamanho das folhas, principalmente em comprimento, bem como na tonalidade do verde que possibilita identificar alterações nutricionais nas mesmas. A tonalidade amarelada do limbo foliar é associada com a redução produção de clorofila e com alterações na forma e na degradação de cloroplastos (EPSTEIN E BLOOM 2006; MALAVOLTA 2006). As imagens a seguir são referentes as folhas mais jovens completamente expandidas (F_1) (**Figura 19**) e segunda mais jovem completamente expandida (F_2) (**Figura 20**).

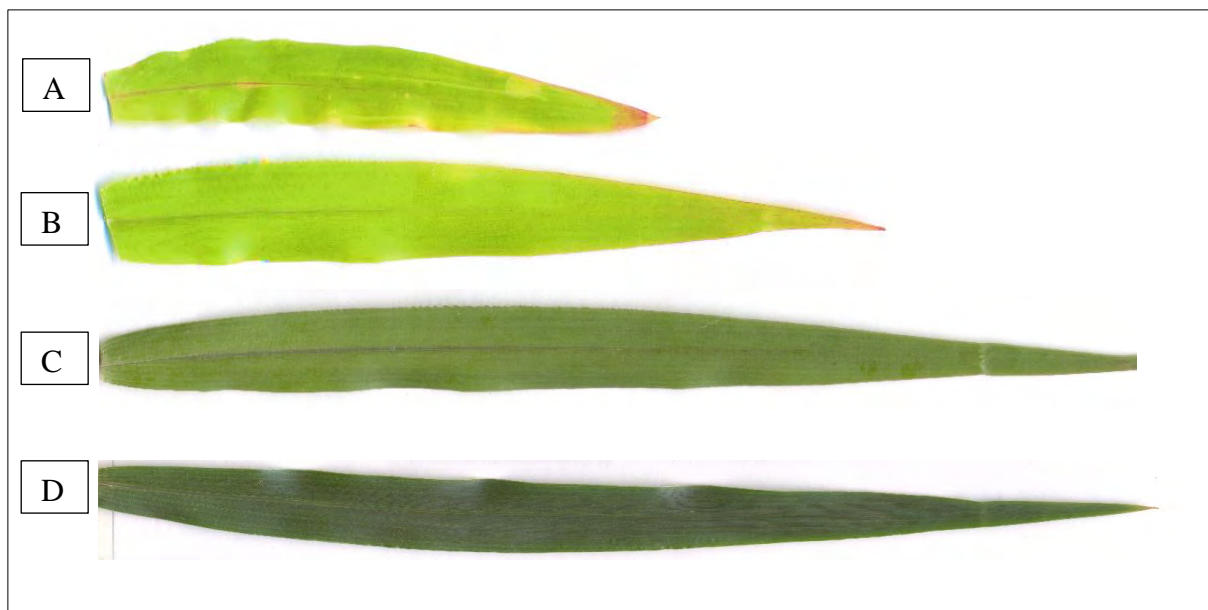


Figura 19. Aspecto da folha mais jovem completamente expandidas (F_1) escaneadas para determinação do status nutricional do capim marandu cultivado sob diferentes doses de nitrogênio na solução nutritiva (A) Dose de 6% de N (B) Dose de 20% de N (C) Dose 100% de N (D) Dose 200% de N.



Figura 20. Aspecto da segunda folha mais jovem completamente expandidas (F_2) escaneadas para determinação do status nutricional do capim marandu cultivado sob diferentes doses de nitrogênio na solução nutritiva (A) Dose de 6% de N (B) Dose de 20% de N (C) Dose 100% de N (D) Dose 200% de N.

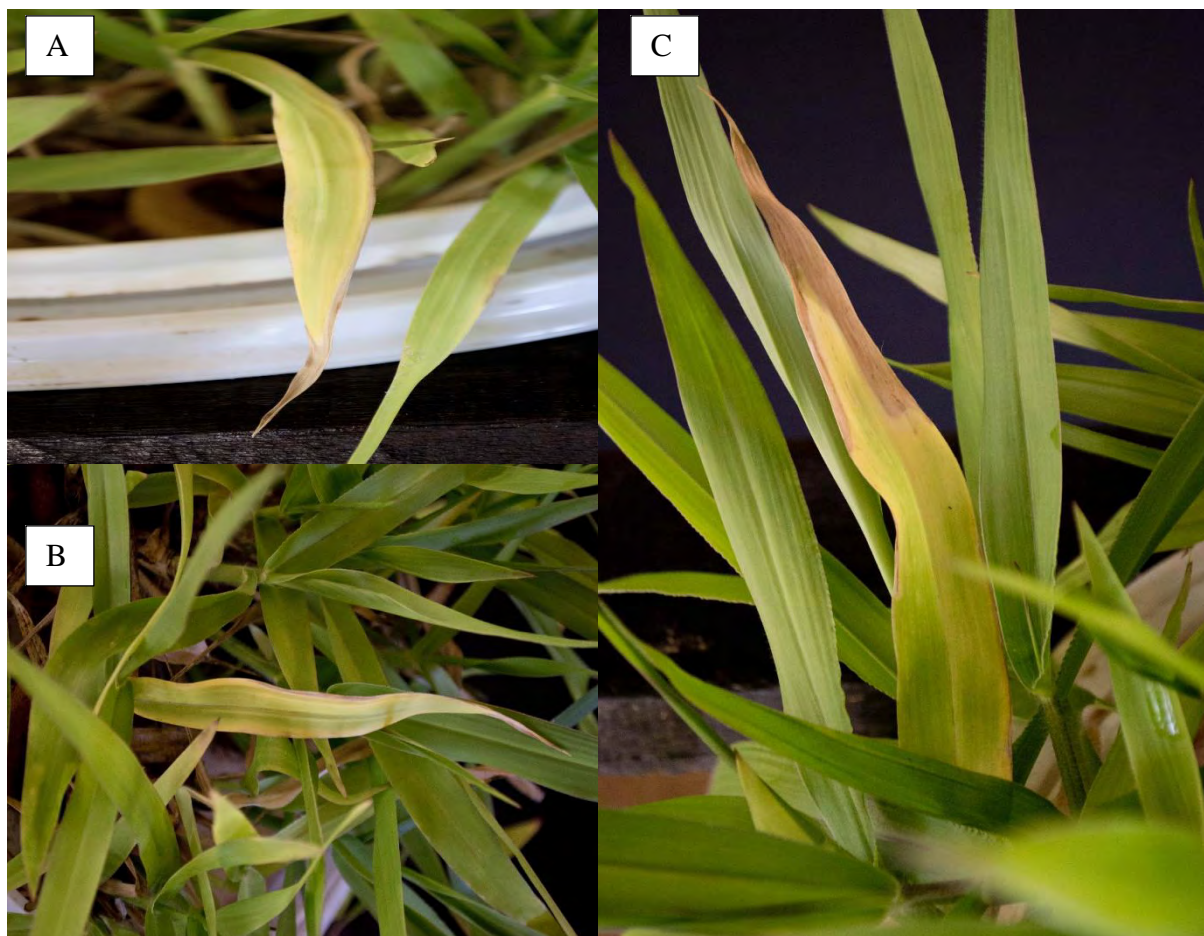


Figura 21. Sintomas de deficiência em capim marandu cultivado sob deficiência de nitrogênio (A) Dose de 6% de N (B) Dose de 6% de N e (C) Dose de 20% de N

Em situações de diminuição na disponibilidade de nutrientes, começam a aparecer os sinais de deficiência dos elementos móveis e pouco móveis nas folhas velhas e dos elementos imóveis nas folhas e nos órgãos mais novos (MALAVOLTA et al., 1997). As deficiências visíveis de deficiência em relação ao crescimento das plantas estiveram relacionadas a uma redução na altura das plantas, com aumento no comprimento das raízes para as doses de deficiência, tanto para o cultivo em deficiência severa de N como no cultivo em deficiência moderada do nutriente (**Anexo 68**). O fornecimento excessivo de N (Dose 200%) resultou na redução da produção das raízes (**Figura 22**). Verificou-se também redução no perfilhamento aéreo e basal das plantas. A análise de correlação demonstrou correlação entre o teor de N em nas folhas (F_1 e F_2) correlacionados com o perfilhamento basal (**Anexos 59 e 63**)

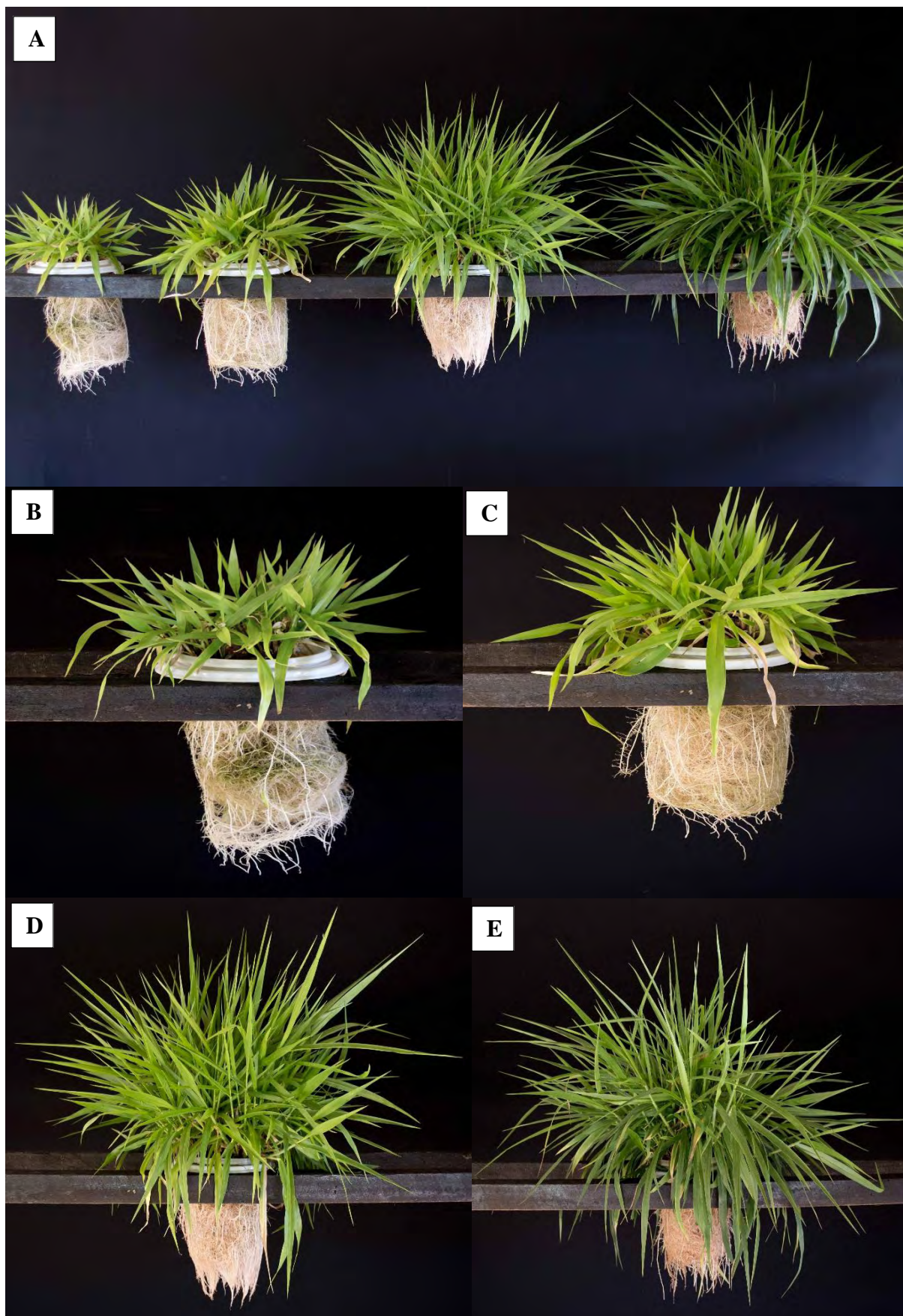


Figura 22. Aspecto do capim marandu cultivado sob diferentes doses de nitrogênio na solução nutritiva (A) Comparativo entre os tratamentos (B) Dose de 6% de N (C) Dose de 20% de N (D) Dose 100% de N (E) Dose 200% de N.

1.12.1.2 Método de análise de imagens utilizando-se machine learning

Os resultados obtidos para a rede Feed-Forward Backpropagation na estrutura 18-15-1 foram superiores os demais quando objetivou-se prever as classes de suficiência de nitrogênio na F_1 (**Tabelas 7, 8 e 9**). Na estrutura FFBP 18-10-1 a porcentagem de acerto na classe 1, ou seja, plantas com teores foliares considerados no nível de deficiência para nitrogênio segundo nosso banco de dados ($<15,0 \text{ g kg}^{-1}$) foi de 95% de acerto, de um total de 168 folhas classificadas nesta faixa, apenas 8 foram classificadas incorretamente. Para a classe 2, que foi considerada a faixa na qual as plantas estavam com teores foliares dentro da faixa adequada para a cultura ($15,6 \text{ a } 20,0 \text{ g kg}^{-1}$) a porcentagem de acerto na predição da classe caiu para 50%. Deve-se salientar que esta classe foi aquela com menor porcentagem de acerto, porém, com um $n=40$, o que vai ao encontro ao princípio de que quanto maior o N mais efetivo é o treinamento para determinada classe, resultando em identificação correta dos indivíduos mais significativa. Para a classe 3, ou seja, plantas nos quais o teor de N estava acima do nível de suficiência, portanto, caracterizando como consumo de luxo, houve um acerto de 76% na classificação das folhas, sendo o erro de omissão maior do que o erro de inclusão neste caso. Na diagonal da matriz tem-se o número de classes total que foi predito corretamente. O índice Kappa das determinações, de 0,71, foi considerado muito bom (**Tabela 7**).

Tabela 7. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede FFBP (18-10-1) na F_1

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto	%Erro
FFBP 18-10-1	CL 1	160	8	0	5	95	5
	CL2	4	20	16	50	50	50
	CL3	3	16	61	24	76	24
Erro de inclusão		4	55	21			

PAG: 83,7. Kappa 0,71. $n=288$. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

MOTTA, 2016 em estudo com capim-marandu, em solução nutritiva, verificou possibilidade de reconhecimento do estado nutricional para fósforo, enxofre e magnésio, trabalhando com índices espectrais obtidos em imagens coloridas de folhas diagnóstico digitalizadas por meio de um scanner. ROMUALDO, 2013 verificou que a omissão dos nutrientes N e K proporcionou deficiências nutricionais características nas folhas de milho cultivados em casa de vegetação o que permitiu a utilização de um sistema de visão artificial para diagnose de estado nutricional. Silva, 2015 em estudo com híbridos de milho constatou que os sintomas de deficiência ou de excesso de N ou K podem ser identificados através de

metodologias de análises de imagens, e que os melhores métodos de extração de características baseados em índices espectrais apresentaram classificações consideradas boas ou muito boas.

Os resultados obtidos para a rede Feed-Forward Backpropagation na estrutura 18-15-1 foram de 98% de acerto na detecção de plantas em estado de deficiência nutricional de N, 50% de acerto para as plantas consideradas no nível adequado e de 91% de plantas com alto teor de N nas folhas. No geral, as classes preditas corretamente corresponderam a 90% do banco de dados, com um índice de exatidão global de 90% e índice Kappa 0,81, considerado excelente. Para a classe 2, os maiores erros foram os de omissão (50%) (**Tabela 8**).

Tabela 8. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede FFBP (18-15-1) na F₁.

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto	%Erro
FFBP 18-15-1	CL 1	165	3	0	2	98	2
	CL2	1	20	19	50	50	50
	CL3	2	5	73	9	91	9
Erro de inclusão		2	29	21			

Exatidão Global: 89,6. Kappa 0,81. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

A rede Feed-Forward Backpropagation na estrutura 18-10-5-1 apresentou o maior índice de acerto na identificação das plantas em condição de deficiência de N, com 99% de acerto, classificando-se incorretamente apenas um indivíduo desta classe. Apesar do excelente desempenho na classe de deficiência, na identificação das plantas com teor adequado de N esta rede apresentou a maior % de erro, que alcançou 68%, com valores de 68% de erro de omissão e 32% de erro de inclusão. Para a classe de consumo de luxo, a porcentagem de acerto foi de 88%. No geral, essa rede conseguiu prever com exatidão 87% dos indivíduos. A exatidão global foi de 86,9% e o índice Kappa de 0,76, considerado muito bom (**Tabela 9**).

Tabela 9. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede FFBP (18-10-5-1) na F₁.

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto	%Erro
FFBP 18-10-5-1	CL 1	167	1	0	1	99	1
	CL2	8	13	19	68	33	68
	CL3	5	5	70	13	88	13
Erro de inclusão		2	29	21			

Exatidão Global: 86,8. Kappa 0,76. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

Os resultados a seguir são correspondentes a predição das classes de para o teor de N na F₁ utilizando-se a rede Cascade-Forward Backpropagation. Na estrutura 18-10-1 esta rede foi capaz de prever corretamente 89% das classes, com uma exatidão global de 89% e índice Kappa considerado muito bom. Dentre as estruturas para esta rede (CFBP) em termos de

predição das classes, esta teve o desempenho entre as estruturas 18-15-1 e 18-10-5-1. A estrutura superior para esta rede foi a mesma verificada para a rede Feed-Forward Backpropagation, indicando que para a F_1 , quando se estuda teores de N no tecido vegetal, esta estrutura é a mais indicada. A maior porcentagem de acerto desta rede corroborou com os demais vistos até aqui, com a maior porcentagem de acerto na classe de deficiência e a menor na classe do nível de suficiência (**Tabela 10**).

Tabela 10. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede CFBP (18-10-1) na F_1 .

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto	%Erro
CFBP 18-10-1	CL 1	165	3	0	2	98	2
	CL2	4	18	18	55	45	55
	CL3	0	7	73	9	91	9
Erro de inclusão		2	36	20			

Exatidão Global: 88,9. Kappa 0,80. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

No geral a estrutura 18-15-1 apresentou a maior exatidão global e índice Kappa classificado como excelente. Para esta rede, foram os melhores resultados obtidos para esta folha. Assim como a tendência observada, a maior porcentagem de acerto se deu na classe de deficiência de N, seguida da classe nas quais as plantas absorveram N acima do nível considerado crítico (consumo de luxo). O erro de omissão variou entre 5% (classe de deficiência) e 35% (teor de N dentro da faixa adequada). O erro de inclusão variou entre 1 e 33% (classe de deficiência e teor de N adequado, respectivamente) (**Tabela 11**). (BAESSO et al., 2007) utilizaram índices espectrais do visível como descritores do estado nutricional do feijoeiro para o nutriente nitrogênio e verificaram que a utilização destes índices, quando associados, nas referidas bandas, possibilitaram a identificação do estado nutricional para este elemento, alcançando índice Kappa de até 0,96, sendo considerado como excelente.

Tabela 11. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede CFBP (18-15-1) na F_1 .

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto	%Erro
CFBP 18-15-1	CL 1	160	8	0	5	95	5
	CL2	2	26	12	35	65	35
	CL3	0	5	75	6	94	6
Erro de inclusão		1	33	14			

Exatidão Global: 90,6. Kappa 0,84. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

Aumentando-se uma camada na rede Cascade-Forward Backpropagation, deixando-a com estrutura 18-10-5-1 os resultados em termos de exatidão global e índice Kappa foram inferiores as demais estruturas, apesar do alto índice de acerto na classe deficiente (96%). A porcentagem de acerto da classe 3 caiu consideravelmente nesta estrutura em comparação as

demais (acerto de 79%). Os erros de omissão e inclusão na classe 2 foram de 45 e 49%. A exatidão global da rede foi de 85,4% e seu índice Kappa de 0,74 sendo considerado muito bom (**Tabela 12**). Pesquisas analisam a possibilidade de avaliar o estado nutricional de N com base na cor da folha (MOGHADDAM et al., 2010, PAGOLA et al., 2009).

Tabela. 12. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede CFBF (18-10-5-1) na F₁.

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto	%Erro
CFBP 18-10-5-1	CL 1	161	7	0	4	96	4
	CL2	3	22	15	45	55	45
	CL3	3	14	63	21	79	21
Erro de inclusão		4	49	19			

Exatidão Global: 85,4. Kappa 0,74. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

Entrando nos resultados da predição de classes de teores de N na F₂ nota-se um aumento no acerto da classe 2 (nível adequado no tecido foliar) em relação a esta mesma rede e estrutura (FFBP 18-10-1) na F₁. A porcentagem de acerto nesta folha nas classe 1, 2 e 3 foram de 93%, 63% e 81% frente a 95%, 50% e 76% na F¹. Percebe-se flutuações entre as melhores redes para cada classe. Nesta estrutura, a exatidão global foi de 85% e o índice Kappa de 0,74. Apesar da mudança da folha, a predição para a classe verdadeira de N em plantas com teor adequado do nutriente na F₂ ainda é baixa (**Tabela 13**). Os resultados obtidos para a rede Feed-Forward Backpropagation variaram em função de suas estruturas (**Tabelas 13, 14 e 15**).

Tabela. 13 Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede FFBP (18-10-1) na F₂.

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto	%Erro
FFBP 18-10-1	CL 1	149	6	5	7	93	7
	CL2	9	25	6	38	63	38
	CL3	4	13	71	19	81	19
Erro de inclusão		8	43	13			

Exatidão Global: 85,1. Kappa 0,74. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

Os melhores índices para a F₂ se repetiram, assim como na F₁, para a rede FFBP 18-15-1 com índice kappa de 0,77 e exatidão global alcançando 87%. Para a classe 1, houve 96% de acerto desta rede e estrutura para a classe deficiente, 58% de acerto para a classe suficiente e 84% de acerto para a classe com alto teor de N (**Tabela 14**). 87 % das classes foram preditas corretamente e 13% preditas incorretamente. SILVA, (2015) trabalhando com milho em condições de campo e casa de vegetação verificou que os sintomas de deficiência ou de excesso de N ou K podem ser identificados pelas metodologias de análise de imagens digitais através da análise de padrões de textura ou índices espectrais. Os métodos de extração de

características baseados em textura de imagem apresentaram melhor desempenho de classificação do que os métodos baseados em índices espectrais. Os melhores métodos de extração de características baseados em índices espectrais apresentaram classificações consideradas boas ou muito boas.

Tabela 14. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede FFBP (18-15-1) na F₂.

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto	%Erro
FFBP 18-15-1	CL 1	154	4	2	4	96	4
	CL2	11	23	6	43	58	43
	CL3	3	11	74	16	84	16
Erro de inclusão		8	39	10			

Exatidão Global: 87,2. Kappa 0,77. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

Na estrutura FFBP 18-10-5-1 a porcentagem de acerto na classe 1, ou seja, plantas com teores foliares considerados no nível de deficiência para nitrogênio segundo nosso banco de dados ($<15,0 \text{ g kg}^{-1}$) foi de 94%, de um total de 170 folhas classificadas nesta faixa, apenas 10 foram classificadas incorretamente. Para a classe 2, que foi considerada a faixa na qual as plantas estavam com teores foliares dentro da faixa adequada para a cultura ($15,6 \text{ a } 20,0 \text{ g kg}^{-1}$) a porcentagem de acerto na predição da classe caiu para 33%, o menor para esta rede. Como dito anteriormente e repetindo-se nesta classe para a F₂, esta classe apresenta o menor número de indivíduos. Com n também igual a 40, dificultando ao sistema a parte de treinamento e validação. Para a classe 3, o acerto foi de 93% na classificação das folhas, sendo o erro de omissão maior do que o erro de inclusão neste caso. Na diagonal da matriz tem-se o número de classes total que foi predito corretamente. O índice Kappa das determinações, de 0,73, foi considerado muito bom. A porcentagem de classes preditas corretamente foi de 85% do banco de dados (**Tabela 15**).

Tabela 15. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede FFBP (18-10-5-1) na F₂.

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto	%Erro
FFBP 18-10-5-1	CL 1	150	6	4	6	94	6
	CL2	16	13	11	68	33	68
	CL3	1	5	82	7	93	7
Erro de inclusão		10	46	15			

Exatidão Global: 85,1. Kappa 0,73. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

Os resultados para a predição das classes por meio da rede Cascade-Forward Backpropagation apresentaram índices Kappa considerados muito bom para todas as estruturas avaliadas, na estrutura 18-10-1 esta rede foi capaz de predizer corretamente 81% das classes, com uma exatidão global de 81% e índice Kappa de 0,67, valores inferiores aos

verificados na F_1 . Comparando-se as estruturas para esta rede (CFBP) em termos de predição das classes, esta apresentou o segundo melhor desempenho para a exatidão global e índice Kappa. A estrutura superior para esta rede foi a mesma verificada para a rede Feed-Forward Backpropagation, a 18-15-1 o que nos mostra que, tanto para a F_1 para a F_2 para se predizer os teores de N no tecido vegetal, esta estrutura é que apresenta melhor desempenho. (**Tabelas 16, 17 e 18**).

Tabela 16. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede CFBP (18-10-1) na F_2 .

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto	%Erro
CFBP 18-10-1	CL 1	142	11	7	11	89	11
	CL2	13	14	13	65	35	65
	CL3	4	6	78	11	89	11
Erro de inclusão		11	55	20			

Exatidão Global: 81,3. Kappa 0,67. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

A estrutura 18-15-1 apresentou a maior exatidão global (82%) e índice Kappa classificado como muito bom (0,69). Para esta rede, também foram os foram os melhores resultados obtidos para esta folha, assim como na F_1 discutida anteriormente. Assim como nas demais redes avaliadas, a maior porcentagem de acerto se deu na classe de deficiência de N, este de 90%, seguida da classe nas quais as plantas absorveram N acima do nível considerado crítico, com 87 % e a classe de suficiência com apenas 40%. O erro de omissão foi alto, variando entre 60% (classe de suficiência) e 10% (teor de N na faixa de deficiência). O erro de inclusão variou entre 7 e 58% (classe de deficiência e teor de N adequado, respectivamente) (**Tabela 17**).

Tabela 17. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede CFBP (18-15-1) na F_2 .

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto	%Erro
CFBP 18-15-1	CL 1	144	11	5	10	90	10
	CL2	11	16	13	60	40	60
	CL3	0	11	75	13	87	13
Erro de inclusão		7	58	19			

Exatidão Global: 81,6. Kappa 0,69. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

A rede Cascade-Forward Backpropagation com uma camada a mais, segundo estrutura 18-10-5-1, resultou em diminuição na exatidão global e índice Kappa foram inferiores as demais estruturas desta rede. A porcentagem de acerto máxima foi verificada na faixa de consumo de luxo (84%), seguida da classe de deficiência (83%) e suficiência (35%). A porcentagem de classes preditas corretamente foi de 77%, com índice Kappa de 0,61, sendo

considerado muito bom. Em todas as classes ocorreram maiores índices de omissão do que de inclusão (**Tabela 18**).

Tabela 18. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede CFBP (18-10-5-1) na F₂.

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto	%Erro
CFBP 18-10-5-1	CL 1	133	20	7	17	83	17
	CL2	12	14	14	65	35	65
	CL3	2	12	74	16	84	16
Erro de inclusão		10	70	22			

Exatidão Global: 76,7. Kappa 0,61. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

Na literatura, a maior parte das pesquisas a respeito dessa forrageira foram conduzidas em solo, em condições de campo ou casa de vegetação, e obtiveram resultados que corroboraram com os verificados nesta pesquisa em relação aos do nitrogênio no capim.

ABREU; MONTEIRO, 1999 cultivaram o capim-marandu em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico e forneceram nitrogênio em quantidades equidistantes, variando de 0 a 300 mg kg⁻¹, via nitrato de amônio. Concluíram que as doses de nitrogênio fizeram variar significativamente a concentração de nitrogênio nas lâminas de folhas novas e teor de clorofila nas folhas. Verificaram que o nível crítico de nitrogênio nas lâminas de folhas novas, aos 28 dias de desenvolvimento, foi de 23,2 g kg⁻¹.

No geral os resultados demonstram que a folha 1 permite uma melhor predição do status nutricional para nitrogênio com a tendência de resposta semelhante para ambas se comparando as redes e estruturas utilizadas. O índice kappa variou entre 0,61 (muito bom) e 0,84 (excelente) com PAGs acima de 76% para todas as redes empregadas (**Tabela 19**).

Tabela 19. Porcentagem de acerto global (PAG) e índice Kappa para cada rede neural para predição de nitrogênio na F₁ (folha mais jovem completamente expandida) e na F₂ (segunda mais jovem completamente expandida).

Rede neural	Folha 1		Folha 2		
	PAG	Kappa	Rede neural	PAG	Kappa
FFBP 18-10-1	83,7	0,71	FFBP 18-10-1	85,1	0,74
FFBP 18-15-1	89,6	0,81	FFBP 18-15-1	87,2	0,77
FFBP 18-10-5-1	86,8	0,76	FFBP 18-10-5-1	85,1	0,73
CFBP 18-10-1	88,9	0,80	CFBP 18-10-1	81,3	0,67
CFBP 18-15-1	90,6	0,84	CFBP 18-15-1	81,6	0,69
CFBP 18-10-5-1	85,4	0,74	CFBP 18-10-5-1	76,7	0,61

FFBP: Feed-Forward Backpropagation. CFBP: Cascade-Forward Backpropagation.

1.12.1.3 Método de análise de imagens utilizando-se classificadores

Os resultados de predição do status nutricional para nitrogênio utilizando-se classificadores estão separados por ciclo de crescimento e índice espectral. Além de também terem sido avaliados nas duas folhas F_1 e F_2 (**Tabelas 20, 21, 22 e 23**). Para fins de comparação entre índices e a demonstração de seus erros e acertos em cada classe, os resultados completos e matrizes de confusão, bem como erros de inclusão e omissão podem ser verificados nos **Anexos 1 a 19**.

Para a F_1 , no primeiro ciclo de crescimento a predição do teor de N no capim marandu foi realizado de forma mais assertiva quando se utilizou a combinação dos índices Evd, Vn, Rvv resultando em um PAG de 50,3% e um índice Kappa considerado razoável. No primeiro ciclo de crescimento, o PAG variou entre 37,1 e 50,3% e o índice Kappa de 0,17 (considerado como ruim) a 0,32 (considerado como razoável). Os índices ou combinações destes que apresentaram melhores valores de PAG e Kappa foram Evd, Vn e Rvv com PAG de 50,31 e Kappa de 0,32 (razoável), Vern e Vn com PAG de 50,21 e Kappa de 0,32 (razoável), Evd, Vern e Vn com PAG de 50,00 e Kappa de 0,32 (razoável), Evd e Vern com PAG de 50,10 e Kappa de 0,32 (razoável), Evd e Rvv com PAG de 50,10 e Kappa de 0,32 (razoável) (**Tabela 22**). Em pesquisa realizada por Sena Júnior et al. (2001) houve o desenvolvimento de um algoritmo de processamento e análise de imagens digitais para identificação de plantas de milho atacadas pela lagarta do cartucho. Na primeira etapa, utilizou-se a técnica de limiarização em blocos de imagens com 60 x 60 pixels de dimensão e, na segunda, empregaram-se redes neurais artificiais em blocos de 3 x 3 pixels de dimensão. A exatidão de cada etapa do algoritmo foi acessada por meio da determinação da matriz de contingência, com base em 80 e 75 blocos, para a classificação grosseira e refinada, respectivamente. O algoritmo apresentou índice de exatidão de 80,74%, resultado superior ao verificado neste trabalho.

No segundo ciclo de crescimento, todos os índices apresentaram maiores PAG e índices Kappa, sendo os melhores resultados verificados nesta pesquisa. Utilizando-se a combinação dos índices Vern, Vn e Rvv foi possível alcançar um PAG de 70,73 e um índice Kappa de 0,62. Os índices Evd, Vn, Rvv que no primeiro ciclo de crescimento apresentaram os melhores resultados também apresentaram um bom desempenho neste ciclo, com PAG de 70,63 e índice Kappa de 0,61. Neste ciclo de crescimento, o PAG variou entre 50,42 e 70,63% e o índice Kappa de 0,32 (considerado como razoável) a 0,62 (muito bom). As combinações de índices que apresentaram melhores valores de PAG e Kappa foram Vern, Vn e Rvv com PAG de 70,73

e Kappa de 0,62 (muito bom) Evd, Vern e Rvv com PAG de 70,63 e Kappa de 0,61 (muito bom), Evd, Vern, Vn e Rvv com PAG de 69,79 e Kappa de 0,62 (muito bom) Vern e Ven com PAG de 67,60 e Kappa de 0,57 (bom) e os índices Evd e Vern e Evd, Vern, Vm ambos com PAG de 67,50 e Kappa de 0,57 (bom) (**Tabela 22**).

No terceiro ciclo, no geral, o desempenho dos índices foi inferior, comparado aos resultados obtidos no segundo ciclo, porém superiores aos verificados no primeiro, com PAG variando entre 50,0 e 69,3 e o índice Kappa entre 0,31 (razoável) e 0,60 (boa). Destaca-se a combinação dos índices Evd, Vern e Rvv com os melhores índices de acerto (PAG 69,3 e Kappa 0,60 - bom). Os outros índices que resultaram em boas classificações foram Vern e Vn (PAG 50,2 e Kappa 0,32 - razoável), Evd e Vern (PAG 50,1 e Kappa 0,32 - razoável), Evd, Vern e Vn (PAG 50,0 e Kappa 0,32 - razoável) e Evd e Rvv (PAG 50,0 e Kappa 0,31 - razoável) (**Tabela 22**).

Analisando-se os 3 ciclos de crescimento, e considerando os 5 melhores resultados de classificação em cada ciclo, nenhum índice ou combinação deles figurou entre os melhores nos 3 ciclos. Os índices combinados Evd e Ver; Evd e Rvv; Vern e Vn; Evd, Vern e Vn; Evd, Vern e Rvv.; Vern, Vn e Rvv; Evd, Vern, Vn e Rvv repetiram-se entre as 5 melhores classificações em 2 ciclos de crescimento e as combinações Vern e Rvv; Vn e Rvv; Evd, Vn e Rvv ficaram entre as 5 melhores classificações em 1 dos ciclos de crescimento (**Tabela 20**). Considerando-se as frequências de ocorrência de classificadores com Kappa igual ou superior a 0,6 para cada combinação de índices espectrais utilizados como vetores de características em cada ciclo de crescimento, nenhum índice apresentou Kappa superior a 0,6 nos três ciclos de crescimento, 2 índices não apresentaram Kappa maior que o 0,6 em nenhum ciclo de crescimento (Vern e Rvv), 3 índices apresentaram Kappa maior que 0,6 em pelo menos um ciclo (Evd, Vn e a combinação Evd e Vn) e 8 índices apresentaram Kappa maior que 0,6.

BAESSO et al., 2007 utilizaram índices espectrais do visível como descritores do estado nutricional do feijoeiro para o nutriente nitrogênio e verificaram que a utilização destes índices, quando associados, nas referidas bandas, possibilitaram a identificação do estado nutricional para este elemento, alcançando índice Kappa de até 0,96, sendo considerado como excelente. SILVA, 2015 trabalhando com milho em condições de campo e casa de vegetação verificou que os sintomas de deficiência ou de excesso de N ou K podem ser identificados pelas metodologias de análise de imagens digitais através da análise de padrões de textura ou índices espectrais. Os métodos de extração de características baseados em textura de imagem apresentaram melhor desempenho de classificação do que os métodos baseados em índices

espectrais. Os melhores métodos de extração de características baseados em índices espectrais apresentaram classificações consideradas boas ou muito boas.

Tabela. 20. Frequências de ocorrência de classificadores com Kappa igual ou superior a 0,6 para cada combinação de índices espectrais utilizados como vetor de características em cada ciclo de crescimento na F₁

Índices espectrais	Primeiro Ciclo	Segundo Ciclo	Terceiro Ciclo	Total*
Evd	0	0	0	0
Vern	0	0	0	0
Vn	0	0	0	0
Rvv	0	0	0	0
Evd e Vern	0	0	0	0
Evd e Vn	0	0	0	0
Evd e Rvv	0	0	0	0
Vern e Vn	0	0	0	0
Vern e Rvv	0	0	0	0
Vn e Rvv	0	0	0	0
Evd, Vern e Vn	0	0	0	0
Evd, Vern e Rvv	0	1	1	2
Evd, Vn, Rvv	0	0	1	1
Vern, Vn e Rvv	0	1	0	1
Evd, Vern, Vn e Rvv	0	1	0	1

Evd - excesso de verde; Vern - vermelho normalizado; Vn - verde normalizado; Rvv - razão verde- vermelho.

*Frequência de ocorrência máxima igual a 3 (3 ciclos de crescimento)

Analisando-se a folha 2, no primeiro ciclo de crescimento a predição do estado nutricional das plantas para o nitrogênio foi determinada de forma mais assertiva nesta folha, a PAG e o índice Kappa de todos os índices foram superiores, demonstrando que a manifestação dos sintomas nesta folha foi mais acentuada, permitindo uma melhor distinção do nível de fertilidade de N que as plantas foram cultivadas. A PAG variou entre 57,3 e 39,7 e o índice Kappa entre 0,43 (bom) e 0,24 (razoável). Os índices ou combinações destes que apresentaram melhores valores de PAG e Kappa foram Evd, Vern e Vn com PAG de 57,3 e Kappa de 0,43 (bom), Evd e Rvv a também Vn e Rvv com PAGs de 57,0 e Kappas de 0,42 (bom), Evd e Vern assim como Vern e Vn com PAG de 56,9 e Kappa de 0,43 (bom), Vern e Rvv com PAG de 56,7 e Kappa de 42,0 (bom), Evd, Vn, Rvv com PAG de 53,9 e Kappa de 0,39 (razoável) (**Tabela 22**).

Para o segundo ciclo de crescimento, assim como verificado na F₁, todos os índices da F₂ apresentaram resultados superiores para o PAG e índice Kappa, em comparação ao primeiro ciclo, com PAG variando entre 57,4 e 48,0 e o índice Kappa entre 0,44 (bom) e 0,32 (razoável), entretanto, quando se compara F₁ e F₂, neste ciclo, a assertividade foi melhor nesta folha pois

os resultados de todos os índices na F_1 foram superiores. As combinações de índices que apresentaram melhores valores de PAG e Kappa foram Evd e Vern assim como Vern e Vn com PAG de 57,4 e Kappa de 0,62 (muito bom) Evd com PAG de 57,3 e Kappa de 0,41 (bom), Vn com PAG de 57,2 e Kappa de 0,41 (bom), Vern e Rvv assim como Vn e Rvv com PAG de 56,5 e Kappa de 0,43 (bom) e a combinação dos índices Evd, Vern e Vn com PAG de 56,3 e Kappa de 0,42 (bom) (**Tabela 23**). Destaca-se neste corte o desempenho dos índices isolados Evd e Vn que apresentaram bons resultados, o que não tinha sido constatado até então.

No terceiro ciclo de crescimento, os índices isolados Evd, Vn e Rvv bem como a combinação Evd e Vn apresentaram resultados inferiores aos observados no ciclo 2, os demais índices apresentaram maiores PAG e índices Kappa, sendo os melhores resultados verificados nesta pesquisa para esta folha. A combinação dos 4 índices Evd, Vern, Vn e Rvv resultou em um PAG de 68,1 e um índice Kappa de 0,59. Os resultados de o PAG variaram entre 47,2 e 68,1% e o índice Kappa de 0,34 (considerado como razoável) a 0,59 (bom). As combinações de índices que apresentaram melhores valores de PAG e Kappa foram Evd, Vern, Vn e Rvv com PAG de 68,1 e Kappa de 0,52 (bom) Evd, Vern e Rvv com PAG de 68,0 e Kappa de 0,59 (bom), Vern, Vn e Rvv com PAG de 67,7 e Kappa de 0,58 (bom), Evd, Vn e Rvv com PAG de 66,1 e Kappa de 0,56 (bom) e os índices Vn e Rvv com PAG de 65,5 e Kappa de 0,55 (bom) (**Tabela 23**).

Ao se avaliar as frequências de ocorrência de classificadores com Kappa iguais ou superiores a 0,6 para cada combinação de índices espectrais utilizados como vetores de características, em cada ciclo de crescimento na F_2 pode-se verificar que nenhum índice apresentou Kappa superior a 0,6 nos três ciclos de crescimento.

Tabela. 21. Porcentagem de acerto global (PAG) e índice Kappa para cada combinação de índices espectrais utilizados como vetor de características da Folha 1 (mais jovem completamente expandida) em função de doses de nitrogênio

Primeiro ciclo de crescimento			Segundo ciclo de crescimento			Terceiro ciclo de crescimento		
Índice espectral	PAG	Kappa	Índice espectral	PAG	Kappa		PAG	Kappa
Evd	46,98	0,27	Evd	62,92	0,52	Evd	51,87	0,35
Vern	37,08	0,17	Vern	50,42	0,35	Vern	50,00	0,31
Vn	46,88	0,27	Vn	62,81	0,52	Vn	51,88	0,35
Rvv	42,81	0,22	Rvv	52,60	0,38	Rvv	48,33	0,33
Evd e Vern	50,10	0,32	Evd e Vern	67,50	0,57	Evd e Vern	66,25	0,56
Evd e Vn	46,46	0,26	Evd e Vn	63,44	0,53	Evd e Vn	54,17	0,40
Evd e Rvv	50,00	0,31	Evd e Rvv	66,88	0,56	Evd e Rvv	66,35	0,56
Vern e Vn	50,21	0,32	Vern e Vn	67,60	0,57	Vern e Vn	66,25	0,56
Vern e Rvv	49,79	0,31	Vern e Rvv	65,52	0,55	Vern e Rvv	66,56	0,56
Vn e Rvv	49,90	0,31	Vn e Rvv	66,88	0,56	Vn e Rvv	66,35	0,56
Evd, Vern e Vn	50,00	0,32	Evd, Vern e Vn	67,50	0,57	Evd, Vern e Vn	66,15	0,55
Evd, Vern e Rvv	48,85	0,28	Evd, Vern e Rvv	70,63	0,61	Evd, Vern e Rvv	69,27	0,60
Evd, Vn, Rvv	50,31	0,32	Evd, Vn, Rvv	67,08	0,57	Evd, Vn, Rvv	65,73	0,55
Vern, Vn e Rvv	49,17	0,28	Vern, Vn e Rvv	70,73	0,62	Vern, Vn e Rvv	69,06	0,59
Evd, Vern, Vn e Rvv	48,85	0,28	Evd, Vern, Vn e Rvv	69,79	0,60	Evd, Vern, Vn e Rvv	68,13	0,58

Evd - excesso de verde; Vern - vermelho normalizado; Vn - verde normalizado; Rvv - razão verde-vermelho. Destaque me negrito para o melhor resultado alcançado no respectivo ciclo de crescimento.

Tabela 22 Porcentagem de acerto global (PAG) e índice Kappa para cada combinação de índices espectrais utilizados como vetor de características da Folha 1 (mais jovem completamente expandida) em função de doses de nitrogênio

Primeiro ciclo de crescimento			Segundo ciclo de crescimento			Terceiro ciclo de crescimento		
Índice espectral	PAG	Kappa	Índice espectral	PAG	Kappa	Índice espectral	PAG	Kappa
Evd	50,0	0,31	Evd	57,3	0,41	Evd	56,6	0,45
Vern	39,7	0,24	Vern	48,4	0,32	Vern	47,2	0,34
Vn	49,9	0,31	Vn	57,2	0,41	Vn	56,6	0,45
Rvv	52,2	0,36	Rvv	47,8	0,31	Rvv	51,5	0,37
Evd e Vern	56,9	0,43	Evd e Vern	57,4	0,44	Evd e Vern	65,2	0,55
Evd e Vn	48,3	0,28	Evd e Vn	56,9	0,41	Evd e Vn	55,7	0,43
Evd e Rvv	57,0	0,43	Evd e Rvv	56,6	0,43	Evd e Rvv	65,5	0,55
Vern e Vn	56,9	0,43	Vern e Vn	57,4	0,44	Vern e Vn	65,2	0,55
Vern e Rvv	56,7	0,42	Vern e Rvv	56,5	0,43	Vern e Rvv	64,5	0,54
Vn e Rvv	57,0	0,43	Vn e Rvv	56,5	0,43	Vn e Rvv	65,5	0,55
Evd, Vern e Vn	57,3	0,43	Evd, Vern e Vn	56,3	0,42	Evd, Vern e Vn	65,4	0,55
Evd, Vern e Rvv	53,9	0,39	Evd, Vern e Rvv	55,2	0,40	Evd, Vern e Rvv	68,0	0,59
Evd, Vn, Rvv	56,9	0,43	Evd, Vn, Rvv	55,8	0,41	Evd, Vn, Rvv	66,1	0,56
Vern, Vn e Rvv	53,5	0,39	Vern, Vn e Rvv	55,0	0,40	Vern, Vn e Rvv	67,7	0,58
Evd, Vern, Vn e Rvv	53,3	0,39	Evd, Vern, Vn e Rvv	55,4	0,41	Evd, Vern, Vn e Rvv	68,1	0,59

Evd - excesso de verde; Vern - vermelho normalizado; Vn - verde normalizado; Rvv - razão verde-vermelho. Destaque em negrito para o melhor resultado alcançado no respectivo ciclo de crescimento.

1.12.1.4 Análise SPAD e NDVI

Para o índice SPAD houve efeito da interação dose de N e ciclo de crescimento para ambas as folhas, com $p < 0,03$ para a F_1 e $p < 0,0001$ para a F_2 . Para o NDVI houve efeito das doses de N bem como dos ciclos de crescimento, com $p < 0,0001$ (**Tabela 23**).

Tabela 23. Resultados da análise de variância para índice SPAD nas lâminas foliares F_1 (mais jovem completamente expandida) e F_2 (segunda mais jovem completamente expandida) e NDVI (parcela) em capim marandu submetido a doses de adubação nitrogenada

Fonte de variação	SPAD		NDVI
	F_1	F_2	parcela
Dose de N (D)	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Ciclo de crescimento (C)	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Interação D*C	0,0371*	<0,0001	0,1067 ^{ns}

Nível de significância: * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, † $p < 0,10$, ^{ns}não significativo.

Para o índice SPAD na F_1 no primeiro ciclo de crescimento não houve diferenciação estatística dos resultados do índice para as doses de 6%, 20% e 100% de N na solução, neste ciclo o índice SPAD variou entre 24,7 e 42,5. Para a segundo ciclo, plantas cultivadas em solução deficiente de N (Doses 6% e 20%) foram estatisticamente iguais, diferindo estatisticamente das doses 100% e 200%, verificando-se um aumento do índice SPAD em função do aumento do fornecimento de N para as plantas. No ciclo de crescimento 3 para esta variável pode-se distinguir dois grupos de resultados: 1 plantas cultivadas em deficiência de N e 2 plantas cultivadas com N adequado ou alto, pois as doses 6% e 20% foram estatisticamente iguais e diferiram das doses 100% e 200%. Quando absorvido em excesso pelas plantas, o N acumula-se como nitrato e não se associa à molécula de clorofila, o que reduz a precisão do medidor de clorofila na estimação do teor foliar de N, em condições de consumo de luxo de N pelas plantas (Dwyer et al., 1995).

Os resultados de SPAD na F_2 apresentaram comportamento parelho aos verificados na F_1 . No primeiro ciclo somente a dose de 200% de N na solução resultou em índice SPAD estatisticamente diferente das demais doses verificadas. No segundo e no terceiro ciclo verifica-se que o acréscimo de N na solução resulta em acréscimo neste índice (**Tabela 25**). Sena Júnior et al. (2008) em avaliação dos estágios nutricionais na cultura do trigo proporcionados por doses de nitrogênio e comparando o sistema de visão artificial com estimativas do teor de clorofila foliar (valores SPAD), concluem que a utilização de imagens digitais para a identificação do estado nutricional de plantas de trigo, aos 14 dias e aos 20 dias após a adubação, foi equivalente à utilização do medidor portátil de clorofila e, com a utilização das características extraídas das imagens das parcelas no campo, foi possível

discriminar os estádios nutricionais oito dias após a primeira adubação nitrogenada em cobertura.

Tabela 24. Índice SPAD nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) e F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de adubação nitrogenada e ciclos de corte.

Dose de N (%)	Ciclos de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
	SPAD em F₁		
6	24,7 ± 3,23 ^{Ba}	29,0 ± 3,01 ^{Ca}	24,8 ± 4,00 ^{Ba}
20	26,5 ± 2,45 ^{Ba}	32,8 ± 3,12 ^{Ca}	33,3 ± 3,19 ^{Ba}
100	32,0 ± 2,22 ^{Bb}	49,5 ± 4,15 ^{Ba}	52,3 ± 4,31 ^{Aa}
200	42,5 ± 2,59 ^{Ab}	61,9 ± 2,87 ^{Aa}	58,6 ± 4,65 ^{Aa}
	SPAD em F₂		
6	23,3 ± 2,22 ^{Ba}	30,1 ± 4,89 ^{Ca}	23,9 ± 3,78 ^{Ca}
20	26,4 ± 3,29 ^{Ba}	32,8 ± 3,65 ^{Ca}	30,5 ± 3,23 ^{Ca}
100	29,9 ± 2,09 ^{Bb}	53,8 ± 2,08 ^{Ba}	50,2 ± 1,54 ^{Ba}
200	35,1 ± 3,22 ^{Ab}	63,8 ± 2,79 ^{Aa}	60,0 ± 2,57 ^{Aa}

Em estudo com nitrogênio em braquiária para avaliação do estado nutricional SILVA JUNIOR et al., 2013 utilizaram bandas do visível e do infravermelho para obtenção de índices de vegetação. Segundo os autores, os índices formados com a banda verde foram os mais eficientes na identificação do estado nutricional da cultura. O teor foliar de N, matéria seca e índice SPAD se correlacionou de melhor forma com o índice de vegetação da diferença de verde normalizado (GNDVI). Vollmann et al. (2011) compararam vários índices de cor com medições realizadas com o medidor de clorofila SPAD e encontraram altas correlações. No entanto, todos esses estudos foram realizados em imagens de folhas soltas sob condições controladas ou a análise foi realizada de forma integral, sem segmentação prévia (PAGOLA et al., 2009, VOLLMANN et al., 2011),

O NDVI aumentou em função do aumento do fornecimento de N para o capim marandu (**Tabela 26**) e variou em função dos ciclos de crescimento (**Tabela 27**). O menor índice NDV foi verificado no capim submetido a deficiência severa de N (Dose 6%). Para as doses de N de 100 e 200% os resultados foram numericamente iguais, com valores de 0,837. Plantas cultivadas na dose de 20% de N apresentaram valor do NDVI intermediário, de 0,729, o qual foi estatisticamente diferente dos demais resultados obtidos no estudo. Dentre os ciclos de crescimento, o maior valor de NDVI foi verificado no segundo ciclo (0,808), seguido dos ciclos 3 (0,749) e do ciclo 1 (0,609).

Tabela 25. Índice NDVI em função das doses de adubação nitrogenada

Dose de N (%)	NDVI
6	0,609 ± 0,0166 ^C
20	0,729 ± 0,0276 ^B
100	0,837 ± 0,0300 ^A
200	0,837 ± 0,0178 ^A

Tabela 26. Índice NDVI em capim Marandu em função do ciclo de crescimento

Ciclo de Crescimento	NDVI
Ciclo 1	0,683 ± 0,0144 ^C
Ciclo 2	0,808 ± 0,0152 ^A
Ciclo 3	0,749 ± 0,0130 ^B

No geral, os resultados de SPAD não possibilitaram diferenciar as doses de 6% e de 20% em nenhuma folha estudada ou ciclo de crescimento, com possibilidade de diferenciação entre a dose 100 e 200% de N em 67% dos casos. Com a utilização do NDVI foi possível diferenciar as doses de 6 e 20% de N, entretanto, plantas nutridas adequadamente ou em excesso de N resultaram em mesmo NDVI.

1.12.2 Potássio

1.12.2.1 Potássio na planta

A relação entre a concentração de K foliar e a produção relativa de massa seca mostrou que o teor de K para atingir o ponto de máxima produção, analisando-se a folha 1, foram de 17,1 g Kg⁻¹ no primeiro ciclo e de 23,7 g Kg⁻¹ no segundo ciclo. No terceiro ciclo, em função do ajuste de regressão dos dados, não foi possível estimar. Na folha 2 os valores foram de 36,9 g Kg⁻¹ no primeiro ciclo e de 36,1 g Kg⁻¹ no segundo ciclo. No terceiro ciclo, em função do ajuste de regressão dos dados, também não foi possível calcular. Nota-se que os valores foram superiores na F₂ (**Tabela 27**). Os teores de potássio nas folhas não se correlacionaram significativamente com o perfilhamento (aéreo ou basal) porém o teor de K na F1 se correlacionou com a altura das plantas (p<0,05) (**Anexo 60**).

Faquin et al. (1995) verificaram incrementos significativos na produção de massa seca da parte aérea das plantas forrageiras com relação quadrática com as doses de potássio, resultados que corroboram com os verificados nesta pesquisa, para os primeiro e segundo ciclo de crescimento. Considerando o total dos cortes, Faquin et al. (1995) relatam que a produção de massa seca em função das doses de potássio aumentou em quase quatro vezes

no capim-Braquiária. Em estudo de Vicente-Chandler et al. (1962) com adubação nitrogenada e potássica em capim-Colonião houve incremento na produção de massa seca até a dose de potássio de 440 kg ha⁻¹. Respostas positivas a adubação potássica são verificadas comumente na literatura, Silva et al. (1995), em estudos com no capim-Tanzânia e doses de potássio (0; 9,75; 39; 78; 156; 234 e 312 mg L⁻¹), verificaram respostas positivas às doses de potássio para a produção de massa seca da parte aérea e do perfilhamento do capim.

Os níveis críticos de potássio na F₁ foram de 15,4 g kg⁻¹ e 21,3 g kg⁻¹ no primeiro e segundo ciclos, respectivamente. Já na F₂, os níveis críticos foram 33,3 g kg⁻¹ e 23,4 g kg⁻¹ no primeiro e segundo ciclos, respectivamente. Mattos (1997) conclue que o nível crítico de potássio nas lâminas de folhas recém-expandidas da *Brachiaria decumbens* foi de 23 e 20 g kg⁻¹, no primeiro e segundo crescimentos, valores próximos dos verificados neste estudo.

Tabela 27. Produção de matéria seca (MS) e parâmetros das equações de regressão da relação MS x teor de potássio nas folhas ao longo dos ciclos de crescimento (RC, a cada 30 dias) do capim-marandu. O nível crítico do potássio nos tecidos foliares foi calculado considerando o valor necessário para atingir 90% da produção máxima de biomassa.

Dose de nutrientes na solução nutritiva	Ciclos de crescimento					
	F ₁		Ciclo 1			
	Ciclo 1		Matéria seca (g vaso ⁻¹)			
6%	13,4	23,4	28,1	13,4	23,4	28,1
20%	21,9	30,8	31,5	21,9	30,8	31,5
100%	30,0	41,8	55,2	30,0	41,8	55,2
200%	31,9	43,3	62,8	31,9	43,3	62,8
	Equações dos parâmetros de regressão					
c	+1,1	+0,58	+23,79	+2,24	+3,19	+23,2
b	+2,04	+3,07	+0,28	+1,69	+3,03	+0,13
a	-0,034	-0,053	+0,048	-0,022	-0,058	+0,055
r²	0,83	0,87	0,83	0,90	0,76	0,83
<i>P-valor</i>	.0004	<.0001	.0003	<.0001	0.0015	0.0004
Matéria seca no P _{Máx}	32,4	47,0	-	29,0	36,0	-
Teor de nutriente no P _{Máx}	17,1	23,7	-	36,9	36,1	-
Nível crítico	15,4	21,3	-	33,3	23,4	-

Utilizando-se todos os resultados obtidos na pesquisa os teores de potássio nas folhas foram classificados de tal forma a pertencerem a uma dessas classes: deficiência, faixa de teor adequado e consumo de luxo (**Tabela 6**). Essas classes foram determinadas para a utilização no método de análises de imagens utilizando-se machine learning, o qual será discutido adiante.

Tabela. 28. Determinação das classes de teores de K no tecido foliar em função do banco de dados

Classificação	K g kg ¹
Deficiência (CL1)	<15,0
Faixa de teor adequado (CL2)	15,1 a 25,0
Consumo de luxo (CL3)	>25,0

Por meio da diagnose visual comparativa relacionada a coloração das folhas avaliadas F1 (mais jovem completamente expandida) e F2 (segunda mais jovem completamente expandida) nota-se manifestações características em ambas as folhas nas quais as plantas foram submetidas a 6% de K na solução nutritiva. Ao se analisar plantas com deficiência de K, a principal manifestação de sintoma característico é a clorose marginal, que evolui para uma necrose, exatamente como os sintomas verificados neste estudo (**Figuras 19 e 20**). No geral, estes sintomas ocorrem nas folhas mais velhas pela mobilidade desse elemento no tecido vegetal (MALAVOLTA et al, 1997). A manifestação dos sintomas se dá por meio das mudanças químicas nas plantas deficientes, dentre estas mudanças temos o aumento no teor de putrescina, no conteúdo de ácidos orgânicos e menor teor de açúcar de amido nos órgãos de reserva (MALAVOLTA, 2006).



Figura 23. Aspecto da folha mais jovem completamente expandidas (F₁) escaneadas para determinação do status nutricional do capim marandu cultivado sob diferentes doses de potássio na solução nutritiva (**A**) Dose de 6% de K (**B**) Dose de 20% de K (**C**) Dose 100% de K (**D**) Dose 200% de K.



Figura 24. Aspecto da segunda folha mais jovem completamente expandidas (F_2) escaneadas para determinação do status nutricional do capim marandu cultivado sob diferentes doses de potássio na solução nutritiva (A) Dose de 6% de K (B) Dose de 20% de K (C) Dose 100% de K (D) Dose 200% de K.

O K desempenha papel importante na regulação do potencial osmótico das células vegetais e ativação de aproximadamente 50 enzimas. Devido a esse fato, sua deficiência acarreta primeiramente redução do crescimento vegetal (FAQUIN, 2005; MALAVOLTA et al., 1997). Nesta pesquisa, as plantas deficientes em potássio apresentaram menor crescimento e menor desenvolvimento radicular (**Anexo 69**). Pode-se notar também uma tendência de acamamento das plantas.

Em experimento com solução nutritiva completa e omissão de nutrientes, França e Haag (1985) verificaram que, na omissão de potássio, o capim-Tobiatã apresentou menor número de perfilhos e redução na produção de massa seca em relação ao tratamento completo. Gramíneas forrageiras deficientes em potássio apresentam folhas pouco desenvolvidas, colmos finos, raquíticos e são pouco resistentes ao tombamento, podendo ocorrer clorose e necrose nas pontas e nas margens das folhas, em casos de grave deficiência, reduzindo a produtividade da forrageira (WERNER, 1986) Nas **figuras 21 e 22** pode-se notar estes sintomas característicos de deficiência que foram observados na pesquisa.



Figura 25. Sintomas de deficiência em capim marandu cultivado sob deficiência de potássio (**A**) Dose de 6% de K (**B**) Dose de 6% de K e (**C**) Dose de 20% de K (**D**) Dose de 6% de K

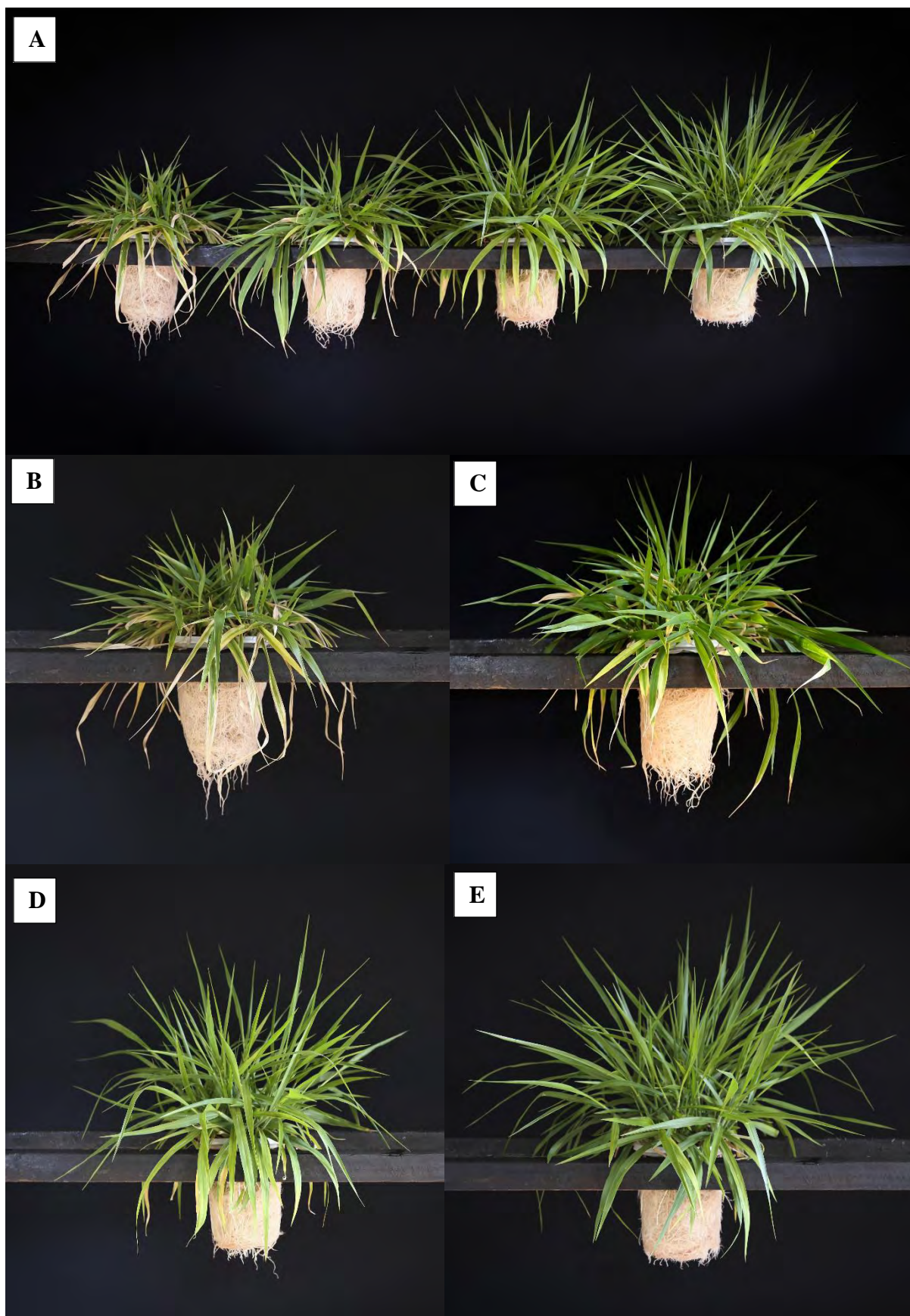


Figura 26. Aspecto do capim marandu cultivado sob diferentes doses de potássio na solução nutritiva (A) Comparativo entre os tratamentos (B) Dose de 6% de K (C) Dose de 20% de K (D) Dose 100% de K (E) Dose 200% de K.

1.12.2.2 Método de análise de imagens utilizando-se machine learning

Para a F_1 os resultados obtidos para a rede Feed-Forward Backpropagation foram superiores aos observados para a rede Cascade-Forward Back-Propagation quando objetivou-se prever as classes de suficiência de potássio (**Tabelas 29, 30 e 31**). Na estrutura FFBP 18-10-1 a porcentagem de acerto na classe 2, ou seja, plantas com teor foliar considerados no nível de adequado para potássio, segundo nosso banco de dados ($15,1 \text{ g kg}^{-1}$ a 25 g kg^{-1}) foi de 85% de acerto, de um total de 89 folhas classificadas nesta faixa, 13 foram classificadas incorretamente. Para a classe 1, que corresponde a plantas em deficiência de K foi considerada plantas estavam com teores foliares menores que $15,1 \text{ g kg}^{-1}$ a porcentagem de acerto na predição foi de 68%, com 98 folhas classificadas corretamente. Para a classe 3, ou seja, plantas nos quais o teor de K se encontrava acima do nível de suficiência (consumo de luxo) houve o menor acerto, correspondendo a apenas 16% na classificação das folhas, sendo o erro de omissão de 84%, observando-se as classificações desta classe nota-se que o sistema considerou 64% dos indivíduos na classe de suficiência (CL2) o que pode demonstrar que até certo ponto, o aumento no teor de K na folha nas resultou em alterações na coloração das mesmas. Como explicado anteriormente para os dados de nitrogênio, deve-se também observar que esta classe continha o menor número de indivíduos do estudo ($n=56$) o que pode nos auxiliar no entendimento da importância de se ter um banco de dados robusto, pois quanto maior o número de representantes de uma classe mais efetivo é o treinamento da rede para identificação da mesma, resultando em um maior acerto na classificação dos dados. Na diagonal da matriz tem-se o número de classes total que foram preditas corretamente: CL1 98, CL2 75 e CL3 9. O índice Kappa das determinações, de 0,41, foi considerado bom (**Tabela 29**).

Tabela 29. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede FFBP (18-10-1) na F_1

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto
FFBP 18-10-1	CL 1	98	45	1	32	68
	CL2	7	75	6	15	85
	CL3	11	36	9	84	16
Erro de inclusão		16	52	44		

PAG: 63,2. Kappa 0,41. $n=288$. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2).. Consumo de luxo (CL3).

A mudança na estrutura da rede Feed-Forward Backpropagation de 18-10-1 para a estrutura 18-15-1 resultou em aumento na porcentagem de acerto global (PAG). Houve aumento no acerto de identificação das classes 1 e 2 e redução no acerto da CL3. Nesta estrutura foi possível atingir 89% de acerto na detecção de plantas em estado de adequado teor

de K nas folhas (CL2), 71% de acerto para as plantas consideradas no nível deficiente e de 7% das plantas com alto teor de K nas folhas. O índice de exatidão global foi de 63,9% e índice Kappa 0,41, considerado bom. O maior erro de inclusão foi verificado na classe 2 e o maior erro de omissão na classe 3 (**Tabela 8**).

Tabela 30. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede FFBP (18-15-1) na F₁

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto
FFBP 18-15-1	CL 1	102	41	1	29	71
	CL2	8	78	2	11	89
	CL3	10	42	4	93	7
Erro de inclusão		15	52	43		

PAG: 63,9. Kappa 0,41. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

Ao se analisar F₁ com a rede Feed-Forward Backpropagation na estrutura 18-10-5-1 obteve-se o maior índice de acerto na diagnose do status nutricional para potássio da pesquisa, com exatidão global foi de 86,5% e o índice Kappa de 0,78, considerado muito bom. Esta rede conseguiu identificar 97% das folhas com baixo teor de K foliar, com erro de omissão de 3% e erro de inclusão de 11%. Para a classe de consumo de luxo, a porcentagem de acerto foi de 80%, com erro de omissão de 20% e erro de inclusão de 9%. No geral, essa rede conseguiu prever com exatidão a classe de teor de K de 245 folhas de um total de 288 indivíduos. (**Tabela 9**).

Tabela 31. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede FFBP (18-10-5-1) na F₁

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto
FFBP 18-10-5-1	CL 1	139	1	4	3	97
	CL2	9	65	14	26	74
	CL3	8	3	45	20	80
Erro de inclusão		11	6	9		

PAG: 86,5. Kappa 0,78. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

Os resultados correspondentes a predição das classes para o teor de K na F₁ foram inferiores utilizando-se a rede Cascade-Forward Backpropagation e variaram em função da estrutura empregada. Quando se utilizou a estrutura 18-10-1 esta rede foi capaz de prever corretamente 92% das classes, com uma exatidão global de 62,8% e índice Kappa considerado razoável (0,40) (**Tabela 10**). A estrutura 18-10-1 para as redes funcionou de forma diferente, na rede FFBP houve maior acerto para as classes 1 e 3 e na rede CFPB para a classe 2. O erro de omissão na CL3 para esta rede foi de 91%, conseguindo identificar o teor de K de apenas 5 folhas.

Tabela 32. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede CFBP (18-10-1) na F_i

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto
CFBP 18-10-1	CL 1	95	49	0	34	66
	CL2	6	81	1	8	92
	CL3	8	43	5	91	9
Erro de inclusão		13	53	17		

PAG: 62,8. Kappa 0,40. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

Para esta rede, a estrutura 18-15-1 apresentou a menor exatidão global (61,5%) e índice Kappa classificado como razoável (0,39). Na diagonal da matriz tem-se o número de classes total que foram preditas corretamente: CL1 94, CL2 78 e CL3 5. O índice Kappa das determinações, de 0,41, foi considerado bom. A maior porcentagem de acerto ocorreu na classe correspondente ao adequado teor de K nas folhas, sendo este de 89%, seguida da classe nas quais as plantas estavam em situação de deficiência de potássio (CL1) com 65 % de acerto, seguido da classe 3, com apenas 10% de classificações corretas. O erro de omissão, variou entre 90% (consumo de luxo) e 35% (teor de K deficiente). O erro de inclusão variou entre 8 e 55% (classe de deficiência e teor de K adequado, respectivamente). (**Tabela 33**).

Tabela 33. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede CFBP (18-15-1) na F_i

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto
CFBP 18-15-1	CL 1	94	50	0	35	65
	CL2	8	78	2	11	89
	CL3	0	44	5	90	10
Erro de inclusão		8	55	29		

PAG: 61,5. Kappa 0,39. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

Com o aumento de uma camada na rede Cascade-Forward Backpropagation, (estrutura 18-10-5-1) os resultados em termos de exatidão global e índice Kappa foram superiores para esta rede, com PAG de 66,3 e índice Kappa bom (0,47). A porcentagem de acerto da classe 3 subiu consideravelmente nesta estrutura em comparação as demais (acerto de 34%). Os erros de omissão e inclusão na classe 3 foram de 63 e 30% (**Tabela 34**). Para a classe 1, plantas estavam com teores foliares menores que 15,1 g kg⁻¹, a porcentagem de acerto na identificação foi de 67%, com 96 folhas classificadas corretamente. Para a classe 3, ou seja, plantas com o teor de K >25,0 g kg⁻¹ houve um acerto de 34%, correspondendo a 19 classificadas corretamente, sendo o erro de omissão de 66%, observando-se as classificações desta classe nota-se que o sistema considerou 29 indivíduos como classe de suficiência (CL2).

Tabela 34. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede CFBP (18-10-5-1) na F₁

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto
CFBP 18-10-5-1	CL 1	96	47	1	33	67
	CL2	5	76	7	14	86
	CL3	8	29	19	66	34
Erro de inclusão		12	50	30		

PAG: 66,3. Kappa 0,47. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

Para a predição de classes de teores de K na F₂ verifica-se uma redução no acerto para a rede FFPP nas estruturas 18-10-1 e 18-15-1 quando comparadas a F₁ e um aumento no acerto quando se utiliza a estrutura 18-10-5-1. Os resultados obtidos na estrutura 18-10-1 foram de 63% de acerto na detecção de plantas em estado de deficiência nutricional de K, 81% de acerto para as plantas consideradas no nível adequado e de 17% de plantas com alto teor de K nas folhas. O índice de exatidão global foi de 59,4% e índice Kappa 0,35, considerado razoável. O erro de omissão variou entre 19% (CL2) e 83% (CL3) (**Tabela 35**).

Tabela 35. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede FFBP (18-10-1) na F₂

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto
FFBP 18-10-1	CL 1	76	44	0	37	63
	CL2	16	84	4	19	81
	CL3	4	49	11	83	17
Erro de inclusão		21	53	27		

PAG: 59,4. Kappa 0,35. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

Na estrutura 18-15-1 os resultados obtidos para a rede Feed-Forward Backpropagation foram de 91% de acerto na detecção de plantas em nível de suficiência de K (CL2), 54% de acerto para as plantas consideradas deficientes e de 13% para as plantas com alto teor de K no limbro foliar. No geral, as classes preditas corretamente corresponderam a 58% do banco de dados, com um índice de exatidão global de 58,3% e índice Kappa razoável (de 0,34). O número de classes totais que foram preditas corretamente foram: CL1 65, CL2 95 e CL3. O índice Kappa das determinações, de 0,34 é considerado razoável (**Tabela 36**).

Tabela 36. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede FFBP (18-15-1) na F₂

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto
FFBP 18-15-1	CL 1	65	55	0	46	54
	CL2	5	95	4	9	91
	CL3	5	51	8	88	13
Erro de inclusão		13	53	33		

PAG: 58,3. Kappa 0,34. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

Ao se utilizar a estrutura 18-10-5-1, assim como para a rede FFBP, obteve-se a maior PAG e índice kappa para esta folha. A PAG foi de 73,3% e o índice Kappa classificado como bom (0,58). Na diagonal da matriz pode-se observar que a classe 1 foi aquela que apresentou maior índice de acerto (83%), seguida da classe 2(73%) e classe 3 (35%). A a maior porcentagem de acerto ocorreu na classe correspondente ao adequado deficiente de K nas folhas. O erro de omissão, variou entre 17% (deficiência de K) e 45% (consumo de luxo). O erro de inclusão variou entre 21 e 34%. (**Tabela 37**).

Tabela 37. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede FFBP (18-10-5-1) na F₂

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto
FFBP 18-10-5-1	CL 1	100	17	3	17	83
	CL2	20	76	8	27	73
	CL3	6	23	35	45	55
Erro de inclusão		21	34	24		

PAG: 73,3. Kappa 0,58. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

A rede CFBP com estrutura 18-15-1 apresentou a maior exatidão global de 66,7% e índice Kappa classificado como bom (0,48). O erro de omissão variou entre 24% (classe de suficiência) e 59% (consumo de luxo). O erro de inclusão variou entre 12 e 46% (classe de deficiência e teor de N acima do adequado, respectivamente). A porcentagem de acerto foi de 73%, 76% e 41% para as classes CL1, CL2 e CL3 (**Tabela 17**).

Tabela 38. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede CFBP (18-10-1) na F₂

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto
CFBP 18-10-1	CL 1	87	32	1	28	73
	CL2	9	79	16	24	76
	CL3	3	35	26	59	41
Erro de inclusão		12	46	40		

PAG: 66,7. Kappa 0,48. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

A estrutura 18-15-1 apresentou resultados semelhantes para a F₁ e F₂. (**Tabela 39**). A porcentagem de acerto na classe 1, ou seja, plantas com teores foliares considerados no nível de deficiência para K foi de 61% de acerto, de um total de 120 folhas pertencentes a essa classe, 47 foram classificadas incorretamente, sendo a maioria classificada como classe 2 (de suficiência). Para a faixa na qual as plantas estavam com teores foliares dentro da faixa adequada para a cultura (15,1 a 25,0 g kg⁻¹) a porcentagem de acerto na predição da classe subiu para 83%. A porcentagem de acerto na de consumo de luxo (CL4) foi de 24% de acerto, de um total de 62 folhas pertencentes a essa classe, 15 foram classificadas corretamente e 47 foram classificadas incorretamente (**Tabela 39**).

Tabela. 39. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede CFBP (18-15-1) na F₂

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto
CFBP 18-15-1	CL 1	73	46	1	39	61
	CL2	9	86	9	17	83
	CL3	0	47	15	76	24
Erro de inclusão		11	52	40		

PAG: 61,4. Kappa 0,38. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

A mudança de estrutura para 18-10-5-1 na rede CFBP não resultou em aumento no índice de acerto das classes para essa folha. Os resultados em termos de exatidão global e índice Kappa foram de 61,5 (PAG) e índice Kappa razoável (0,39). A porcentagem de acerto da CLA 2 foi maior nesta estrutura em comparação as demais para a mesma rede (acerto de 87%). Os erros de omissão e inclusão nesta classe foram de 13 e 51%. Na diagonal da matriz tem-se o número indivíduos que foram classificados corretamente: CL1 73, CL2 90 e CL3 14, totalizando 177 folhas de um total de 288. A maior porcentagem de acerto ocorreu na classe correspondente ao adequado teor de K nas folhas, sendo este de 87%, seguida da classe nas quais as plantas estavam em situação de deficiência de potássio (CL1) com 61% de acerto, seguido da classe 3, com 22% de classificações corretas (**Tabela 34**).

Tabela 40. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede CFBP (18-10-5-1) na F₂

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto
CFBP 18-10-5-1	CL 1	73	46	1	39	61
	CL2	10	90	4	13	87
	CL3	3	47	14	78	22
Erro de inclusão		15	51	26		

PAG: 61,5. Kappa 0,39. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

Assim como o resultado verificado no desempenho das redes para identificação do status nutricional de N, no geral, os resultados obtidos nesta pesquisa demonstram que a folha 1 permite uma melhor predição do status nutricional para potássio através da análise de imagens. O índice kappa variou entre 0,34 (razoável) e 0,78 (muito bom) com PAGs acima de 58% para todas as redes empregadas. Para a F₁, pode-se observar que a classificação foi considerada muito boa em um caso, boa em três casos e razoável em dois casos. Para a F₂, pode-se observar que a classificação foi considerada boa em dois casos e razoável em quatro casos. O melhor resultado da F₁ foi obtido pela FFBP 18-10-5-1 e pra a F₂ pela CFBP 18-10-1 (**Tabela 19**).

Tabela 41. Porcentagem de acerto global (PAG) e índice Kappa para cada rede neural para predição de potássio na F₁ (folha mais jovem completamente expandida) e na F₂ (segunda mais jovem completamente expandida).

Rede neural	Folha 1		Folha 2		
	PAG	Kappa	Rede neural	PAG	Kappa
FFBP 18-10-1	63,2	0,41	FFBP 18-10-1	59,4	0,35
FFBP 18-15-1	63,9	0,41	FFBP 18-15-1	58,3	0,34
FFBP 18-10-5-1	86,5	0,78	FFBP 18-10-5-1	73,3	0,58
CFBP 18-10-1	62,8	0,40	CFBP 18-10-1	66,7	0,48
CFBP 18-15-1	61,5	0,39	CFBP 18-15-1	61,4	0,38
CFBP 18-10-5-1	66,3	0,47	CFBP 18-10-5-1	61,5	0,39

1.12.2.3 Método de análise de imagens utilizando-se classificadores

Para se analisar os resultados de determinação do teor nutricional de potássio nas lâminas foliares do capim marandu utilizando-se classificadores os resultados estão separados por ciclo de crescimento e índice espectral e ademais foram avaliados nas duas folhas diagnóstico F₁ e F₂ (**Tabelas 42 e 43**). Para fins de comparação entre índices e a demonstração de seus erros e acertos em cada classe, os resultados completos e matrizes de confusão, bem como erros de inclusão e omissão podem ser verificados nos **Anexos 20 a 39**. Comparando-se com os resultados obtidos para a predição de N neste mesmo método, discutidos anteriormente, e os resultados obtidos para K notam-se grandes diferenças para a PAG e índice Kappa para os nutrientes. Para K, na F₁, no ciclo 1 a maior porcentagem de acerto global foi de 39,9% com índice kappa de 0,15 (ruim). A predição do teor de K no capim marandu foi realizado de forma mais assertiva quando se utilizou mais de um índice no classificador. A combinação dos índices Evd, Vern, Vn resultando em um PAG de 45,4%, mas com um índice Kappa considerado razoável (0,29). No primeiro ciclo de crescimento, o PAG variou entre 28,2 e 39,9% e o índice Kappa de 0,09 (considerado como ruim) a 0,15 (que também é considerado como ruim). Neste primeiro ciclo, os índices ou combinações destes que apresentaram melhores valores de PAG e Kappa foram Evd, Vern e Rvv com PAG de 39,9 e Kappa de 0,15 (ruim), Vern, Vn, Rvv com PAG de 39,7 e Kappa de 0,15 (ruim), Evd e Vern com PAG de 38,6 e Kappa de 0,13 (ruim), Vern e Vn com PAG de 38,5 e Kappa de 0,13 (ruim), e a combinação dos quatro índices Evd, Vern, VnRvv com PAG de 37,7 e Kappa de 0,13 (ruim) (**Tabela 42**).

No segundo ciclo de crescimento, os resultados foram superiores quando comparados aos primeiro ciclo, com a maioria dos índices apresentando maiores PAG e índices Kappa. O emprego dos quatro índices no classificador Evd, Vern, Vn e Rvv foi possível alcançar um PAG de 43,0 e um índice Kappa de 0,27, um desempenho 7% melhor do que no primeiro ciclo de

crescimento. Os índices Evd, Vern e Rvv que no primeiro ciclo de crescimento apresentaram os melhores resultados neste ciclo apresentaram o segundo maior desempenho, com PAG de 41,5 e índice Kappa de 0,12. Neste ciclo de crescimento, o PAG variou entre 29,0 e 43,0% e o índice Kappa de 0,32 (considerado como ruim) a 0,27 (considerado como razoável). As demais combinações de índices que apresentaram melhores valores de PAG e Kappa foram Vern, Vn e Rvv com PAG de 41,5 e Kappa de 0,35 (razoável), o índice isolado Vern com PAG de 35,8 e Kappa de 0,16 (ruim), Evd e Vern, Vn e Vn, e Vern e Rvv ambos com PAG de 38,5 e Kappa de 0,20 (ruim) e os índices Vn com PAG de 38,4 e Kappa de 0,22 (bom) (**Tabela 42**).

Bons resultados foram obtidos no terceiro ciclo para K na F1, quando comparado com os anteriores. Em média, o desempenho dos índices foi superior, com PAG variando entre 28,1 e 45,4 e o índice Kappa entre 0,05 (ruim) e 0,29 (razoável). Dentre os índices e combinações, a combinação dos índices Evd, Vern e Vn apresentou a melhor estimativa de análise foliar (PAG 45,5 e Kappa 0,29 - razoável). Os outros índices que proporcionaram boas estimativas de teor de K na F2 foram Evd, Vn e Rvv (PAG 44,8 e Kappa 0,28 - razoável), Evd e Vern (PAG 44,6 e Kappa 0,28 - razoável), Vern e Vn (PAG 44,4 e Kappa 0,28 - razoável) e Evd e Rvv e Vn e Rvv (PAG 43,9 e Kappa 0,27 - razoável) (**Tabela 22**). Fazendo-se uma análise conjunta dos 3 ciclos de crescimento, e considerando os 5 melhores resultados de classificação em cada ciclo, os índices combinados Vern e Vn estiveram entre os melhores nos 3 ciclos. Os demais índices combinados Evd e Vern, Vn e Rvv, Evd, Vern e Rvv, Vern, Vn e Rvv e a combinação dos 4 índices Evd, Vern, Vn e Rvv repetiram-se entre as 5 melhores classificações em 2 ciclos de crescimento e as combinações Vn, Vern e Rvv, Evd, Vern e Vn, Evd, Vn, Rvv ficaram entre as 5 melhores classificações em 1 dos ciclos de crescimento (**Tabela 22**).

Diferentemente dos resultados dos índices para N, não foi elaborada uma tabela de frequências de ocorrência de classificadores com Kappa, igual ou superior a 0,6 para os resultados de potássio pois nenhum dos índices alcançou este valor nas duas folhas analisadas. Para a F2, em média, os índices de K apresentaram maior PAG e Kappa. No primeiro ciclo de crescimento, em média, a predição do estado nutricional das plantas para o K foi determinada de forma mais assertiva nesta folha, a PAG e o índice Kappa para a maioria dos índices, demonstrando que as alterações de coloração nesta folha devem ter sido mais acentuadas, permitindo uma melhor distinção do nível de fertilidade de K através dos blocos recortados. No primeiro ciclo, a PAG variou entre 32,6 e 43,1 e o índice Kappa entre 0,11 (ruim) e 0,22 (razoável). Os índices ou combinações destes que apresentaram melhores valores de PAG e Kappa foram Evd, Vern e Rvv com PAG de 43,1 e Kappa de 0,22 (razoável), Vern, Vn e Rvv

com PAG de 42,8 e Kappa de 0,22 (razoável), Evd, Vern, Vn e Rvv com PAG de 41,6 e Kappa de 0,20 (ruim), Evd e Vern com PAG de 39,9 e Kappa de 0,22 (razoável) e por fim Vern e Vn com PAG de 39,8 e Kappa de 0,22 (razoável) (Tabela 43).

Para o segundo ciclo de crescimento o PAG variou entre 27,2 e 47,3 e o índice Kappa entre 0,10 (ruim) e 0,32 (razoável), em média, os resultados foram semelhantes entre as folhas neste ciclo, com pequenas variações nos resultados dos índices. As combinações de índices que apresentaram melhores valores de PAG e Kappa foram Vern, Vn e Rvv com PAG de 47,3 e Kappa de 0,32 (razoável) Evd, Vern e Rvv com PAG de 46,8 e Kappa de 0,32 (razoável), Evd, Vern, Vn e Rvv com PAG de 45,2 e Kappa de 0,30 (razoável), Evd, Vn, Rvv com PAG de 40,0 e Kappa de 0,22 (razoável) e as combinações Evd, Vern e Vn, Evd e Rvv com PAG de 39,5 e Kappa de 0,21 (razoável) (**Tabela 43**). As análises do terceiro ciclo de crescimento, nos mostram que as melhores respostas foram decorrentes da combinação de 2 ou 3 índices. A combinação dos 4 índices Evd, Vern, Vn e Rvv resultou em um PAG de 68,1 e um índice Kappa de 0,59. Os resultados de o PAG variaram entre As combinações de índices que apresentaram melhores valores de PAG e Kappa foram Vern e Rvv com PAG de 45,1 e Kappa de 0,25 (razoável) Vern e Vn, Evd e Vern ambos com PAG de 44,8 e Kappa de 0,24 (razoável), Evd e Rvv com PAG de 44,2 e Kappa de 0,23 (razoável), Evd, Vn, Rvv com PAG de 43,4 e Kappa de 0,22 (razoável), Evd, Vern e Vn com PAG de 43,3 e Kappa de 0,22 (razoável), e (**Tabela 43**).

Os resultados obtidos corroboram com os verificados por Silva, 2015 que conclue que os melhores desempenhos normalmente ocorreram com a utilização de mais de um índice espectral no vetor de características do classificador, dessa maneira, a utilização de mais de um índice espectral facilitou a discriminação das diferentes doses de N ou de K utilizadas em solução nutritiva, e também concordando com os resultados obtidos por Baesso et al. (2007), estudando o uso de índices espectrais, obtidos a partir de imagens digitais, para discriminar feijoeiros submetidos a diferentes doses de N. Esses resultados nos ajudam a entender também o melhor desempenho do método utilizando-se machine learning. Apesar das diferenças de metodologia empregadas nos dois métodos estudados, as redes neurais utilizam os 18 índices extraídos das imagens para treinamento e aprendizagem o que vai de encontro a este resultado de melhores desempenhos quando se utiliza mais de um índice como classificador.

Ao se avaliar as frequências de ocorrência de classificadores com Kappa iguais ou superiores a 0,6 para cada combinação de índices espectrais utilizados como vetores de características, em cada ciclo de crescimento na F₂ pode-se verificar que nenhum índice apresentou Kappa superior a 0,6 nos três ciclos de crescimento.

Tabela. 42. Porcentagem de acerto global (PAG) e índice Kappa para cada combinação de índices espectrais utilizados como vetor de características da Folha 1 (mais jovem completamente expandida) em função de doses de potássio

Primeiro ciclo de crescimento			Segundo ciclo de crescimento			Terceiro ciclo de crescimento		
Índice espectral	PAG	Kappa	Índice espectral	PAG	Kappa	Índice espectral	PAG	Kappa
Evd	36,5	0,10	Evd	38,2	0,22	Evd	38,0	0,17
Vern	37,3	0,09	Vern	35,8	0,16	Vern	42,1	0,26
Vn	36,5	0,10	Vn	38,4	0,22	Vn	38,1	0,17
Rvv	28,2	0,08	Rvv	29,0	0,12	Rvv	28,1	0,05
Evd e Vern	38,6	0,13	Evd e Vern	38,5	0,20	Evd e Vern	44,6	0,28
Evd e Vn	35,9	0,09	Evd e Vn	37,9	0,21	Evd e Vn	37,4	0,16
Evd e Rvv	38,4	0,13	Evd e Rvv	37,9	0,19	Evd e Rvv	43,9	0,27
Vern e Vn	38,5	0,13	Vern e Vn	38,5	0,20	Vern e Vn	44,4	0,28
Vern e Rvv	38,2	0,12	Vern e Rvv	38,5	0,20	Vern e Rvv	43,4	0,26
Vn e Rvv	38,4	0,13	Vn e Rvv	37,8	0,19	Vn e Rvv	43,9	0,27
Evd, Vern e Vn	35,8	0,09	Evd, Vern e Vn	36,9	0,18	Evd, Vern e Vn	45,4	0,29
Evd, Vern e Rvv 1	39,9	0,15	Evd, Vern e Rvv	41,7	0,25	Evd, Vern e Rvv	41,4	0,24
Evd, Vn, Rvv	36,8	0,11	Evd, Vn, Rvv	36,9	0,18	Evd, Vn, Rvv	44,8	0,28
Vern, Vn e Rvv 2	39,7	0,15	Vern, Vn e Rvv	41,5	0,25	Vern, Vn e Rvv	41,4	0,24
Evd, Vern, Vn e Rvv	37,7	0,13	Evd, Vern, Vn e Rvv	43,0	0,27	Evd, Vern, Vn e Rvv	41,0	0,23

Evd - excesso de verde; Vern - vermelho normalizado; Vn - verde normalizado; Rvv - razão verde-vermelho. Destaque me negrito para o melhor resultado alcançado no respectivo ciclo de crescimento

Tabela. 43. Porcentagem de acerto global (PAG) e índice Kappa para cada combinação de índices espectrais utilizados como vetor de características da Folha 1 (mais jovem completamente expandida) em função de doses de potássio

Primeiro ciclo de crescimento			Segundo ciclo de crescimento			Terceiro ciclo de crescimento		
Índice espectral	PAG	Kappa	Índice espectral	PAG	Kappa	Índice espectral	PAG	Kappa
Evd	36,1	0,17	Evd	38,6	0,22	Evd	41,6	0,18
Vern	32,6	0,11	Vern	39,2	0,21	Vern	40,7	0,23
Vn	36,1	0,17	Vn	38,6	0,22	Vn	41,7	0,18
Rvv	34,0	0,14	Rvv	27,2	0,10	Rvv	34,0	0,16
Evd e Vern	39,9	0,22	Evd e Vern	38,1	0,19	Evd e Vern	44,8	0,24
Evd e Vn	36,7	0,17	Evd e Vn	36,6	0,19	Evd e Vn	41,9	0,18
Evd e Rvv	39,6	0,21	Evd e Rvv	39,5	0,21	Evd e Rvv	44,2	0,23
Vern e Vn	39,8	0,22	Vern e Vn	38,3	0,20	Vern e Vn	44,8	0,24
Vern e Rvv	39,2	0,21	Vern e Rvv	37,7	0,19	Vern e Rvv	45,1	0,25
Vn e Rvv	39,6	0,21	Vn e Rvv	39,4	0,21	Vn e Rvv	44,1	0,23
Evd, Vern e Vn	39,1	0,21	Evd, Vern e Vn	39,5	0,21	Evd, Vern e Vn	43,3	0,22
Evd, Vern e Rvv	43,1	0,22	Evd, Vern e Rvv	46,8	0,32	Evd, Vern e Rvv	41,7	0,23
Evd, Vn, Rvv	38,6	0,20	Evd, Vn, Rvv	40,0	0,22	Evd, Vn, Rvv	43,4	0,22
Vern, Vn e Rvv	42,8	0,22	Vern, Vn e Rvv	47,3	0,32	Vern, Vn e Rvv	41,9	0,24
Evd, Vern, Vn e Rvv	41,6	0,20	Evd, Vern, Vn e Rvv	45,2	0,30	Evd, Vern, Vn e Rvv	41,7	0,24

Evd - excesso de verde; Vern - vermelho normalizado; Vn - verde normalizado; Rvv - razão verde-vermelho. Destaque me negrito para o melhor resultado alcançado no respectivo ciclo de crescimento.

1.12.2.4 Análise SPAD e NDVI

No experimento de potássio o índice SPAD variou somente em função do ciclo de crescimento ($<0,0001$) para as duas folhas estudadas (F_1 e F_2). Para o NDVI houve efeito das doses de K bem como dos ciclos de crescimento, com $p < 0,01$ e $p < 0,0001$, respectivamente (**Tabela 23**).

Tabela 44. Resultados da análise de variância para índice SPAD nas lâminas foliares F_1 (mais jovem completamente expandida) e F_2 (segunda mais jovem completamente expandida) e NDVI (parcela) em capim marandu submetido a doses de adubação potássica.

Fonte de variação	SPAD		NDVI
	F_1	F_2	parcela
Dose de K (D)	0,3574	0,2055	0,0088
Ciclo de crescimento (C)	$<0,0001$	$<0,0001$	$<0,0001$
Interação D*C	0,7809	0,2330	0,9427

Plantas cultivadas em condições de deficiência severa de K (6%) apresentaram NDVI estatisticamente inferior as plantas cultivadas em solução nutritiva com 20, 100 e 200% de K (**tabela 45**). Estes resultados corroboram com os verificados por Navarro (2012) que avaliando a relação do NDVI com K foliar diferentes estádios de desenvolvimento na cultura da soja concluiu que houve uma correlação positiva entre os mesmos nos estádios iniciais de desenvolvimento da planta. O índice NDVI utiliza dados de reflectância do vermelho e infravermelho, com os valores desses dados vão de uma escala de -1 a 1. Quanto maiores os valores do NDVI, maiores as diferenças entre a reflectância do infravermelho com o vermelho, o que indica maior quantidade de clorofila e MS e, conseqüentemente, maior o potencial produtivo da planta. Fazendo-se um paralelo com o índice Spad ao qual não houve diferença significativa entre os tratamentos sugere-se que a diferença encontrada possa estar correlacionada a diferença de produção de matéria seca dos tratamentos e não ao teor de clorofila nas folhas.

Tabela. 45. Índice NDVI em função das doses de adubação potássica.

Dose de K (%)	NDVI
6	$0,79 \pm 0,0012^B$
20	$0,82 \pm 0,0009^A$
100	$0,83 \pm 0,0034^A$
200	$0,84 \pm 0,0043^A$

O índice SPAD apresentou o mesmo comportamento nas duas folhas avaliadas,

com redução estatística significativa com o passar dos ciclos de crescimento, o inverso ocorreu para o NDVI que apresentou redução ao longo dos ciclos de rebrota do capim. Os resultados de SPAD corroboram com os verificados por Pereira (2001) que conclui que a variação das unidades SPAD nas lâminas de folhas recém-expandidas capim-Mombaça com relação às doses de potássio em dois ciclos de crescimento não foi significativa. Um resultado semelhante foi verificado por Lavres Júnior (2001), que também trabalhando com Mombaça não obteve variação nas unidades SPAD com emprego de doses de potássio..

Tabela. 46. Variações no índice SPAD e NDVI em função dos ciclos de crescimento do capim Marandu submetido a doses de potássio em solução nutritiva.

Ciclo de Crescimento	SPAD		NDVI
	F ₁	F ₂	
Ciclo 1	53,58 ± 1,657 ^A	49,23 ± 2,233 ^A	0,860 ± 0,0078 ^A
Ciclo 2	41,83 ± 1,657 ^B	39,66 ± 2,233 ^B	0,831 ± 0,0078 ^B
Ciclo 3	30,93 ± 1,657 ^C	30,40 ± 2,233 ^C	0,780 ± 0,0078 ^C

1.12.3 Cálcio

1.12.3.1 Cálcio na planta

A parte aérea das plantas respondeu de forma linear ao fornecimento de cálcio na solução nutritiva na F₁ nos ciclos 1 e 3 e na F₂ em todos os ciclos e de forma quadrática no ciclo 2 considerando-se o teor dos nutrientes na F₁. A produção de matéria seca no ponto de máxima foi de 99,99 g vaso⁻¹ e o teor de Ca no ponto de máxima de 7,4 g kg⁻¹. Esse valor foi calculado segundo a equação $y = -2,415 + 36,21x^2 - 35,789$ ($p < 0.01$) (**Tabela 47**). Os teores de cálcio na folha 1 se correlacionaram significativamente com o perfilhamento basal ($p < 0.05$) (**Anexo 61**).

Tabela 47. Produção de matéria seca (MS) e parâmetros das equações de regressão da relação MS x teor de Ca nas folhas ao longo dos ciclos de crescimento (RC, a cada 28 dias) do capim-marandu. O nível crítico do cálcio nos tecidos foliares foi calculado considerando o valor necessário para atingir 90% da produção máxima de biomassa.

nutrients na solução nutritiva	Ciclo de Crescimento					
	F1			F2		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
	Produção de matéria seca (g vaso ⁻¹)					
6%	97,9	91,6	87,1	97,9	91,6	87,1
20%	99,2	115,1	83,5	99,2	115,1	83,5
100%	108,7	128,3	103,3	108,7	128,3	103,3

200%	109,9	127,5	94,9	109,9	127,5	94,9
Parâmetros das equações de regressão						
c	-	-35,789	-	-	-	-
b	82,7	36,21	52,2	87,294	65,681	78,861
a	3,4	-2,415	3,357	2,823	7,7934	2,8326
r ²	0,2	0,81	0,2	0,45	0,48	0,32
<i>P-value</i>	ns	0,0002	ns	ns	ns	ns
MS P max*	113,99	99,99	100,66	118,38	134,41	111,11
Nutrient P _{Máx} *	7,3	7,4	6,0	8,9	7,8	7,4

*Deve-se salientar que quando o modelo de equação não permitiu calcular o ponto de máxima produção e o teor de nutriente no ponto de máxima o valor foi gerado em função da ocorrência no banco de dados. Isto foi feito para possibilitar criar as classificações para emprego nas redes neurais.

Com base em todos os resultados obtidos na pesquisa dos teores de Ca, os teores foram analisados, comparados com a literatura e classificados de tal forma a pertencerem a uma dessas classes: deficiência, faixa de teor adequado e consumo de luxo (**Tabela 6**). Essas classes foram determinadas para a utilização no método de análises de imagens utilizando-se machine learning, que será apresentado adiante.

Tabela. 48. Determinação das classes de teores de Ca no tecido foliar em função do banco de dados

Classificação	Teor Ca (g kg ⁻¹)
Deficiência	<2,9
Faixa de teor adequado	3,0 a 6,5
Consumo de luxo	>6,5

Sintomas característicos de deficiência de Ca foram registrados. Os sintomas de deficiência de Ca observados nas plantas submetidas a condições restritivas deste nutriente foram amarelecimento nas margens das folhas mais novas, rompimento do limbo foliar, manchas necróticas internervais, crescimento não uniforme da folha, resultando em formas tortas e colapso do pecíolo, resultados que corroboram com os descritos por Malavolta, 20016. Pode-se notar, iniciando-se pelas mais novas, adformação lateral da folha, em um ou em ambos os lados, apresentando laceração com estrias esbranquiçadas, enrolamento e necrose do ápice do limbo. Com a progressão dos sintomas, as folhas apresentam necrose marrom-clara nas bordas. A dilaceração das margens nas folhas verificada também é citada por Anchão, et al, 2007 (**Figuras 27, 28, 29 e 30**).

Em condições de deficiência ou excesso de cálcio houve redução na produção de raízes (**Anexo 70**).



Figura 27. Aspecto da folha mais jovem completamente expandidas (F_1) escaneadas para determinação do status nutricional do capim marandu cultivado sob diferentes doses de cálcio na solução nutritiva (A) Dose de 6% de Ca (B) Dose de 20% de Ca (C) Dose 100% de Ca (D) Dose 200% de Ca.



Figura 28. Aspecto da segunda folha mais jovem completamente expandidas (F_2) escaneadas para determinação do status nutricional do capim marandu cultivado sob diferentes doses de cálcio na solução nutritiva (A) Dose de 6% de Ca (B) Dose de 20% de Ca (C) Dose 100% de Ca (D) Dose 200% de Ca.



Figura 29. Sintomas de deficiência em capim marandu cultivado sob deficiência de cálcio (A) Dose de 6% de Ca (B) Dose de 6% de Ca (C) Dose de 6% de Ca (D) Dose de 20% de Ca (E) Dose de 20% de Ca

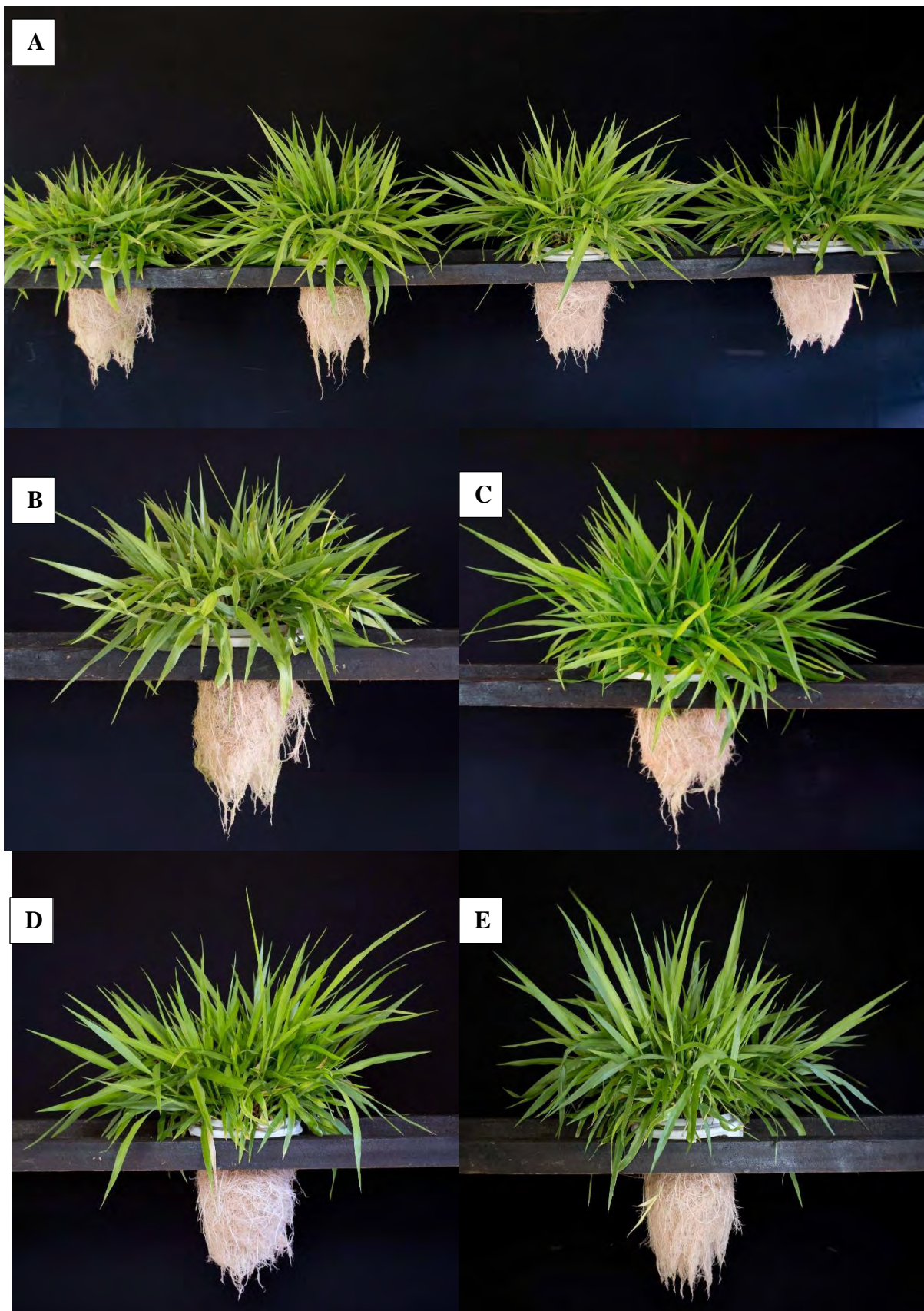


Figura 30. Aspecto do capim marandu cultivado sob diferentes doses de cálcio na solução nutritiva (A) Comparativo entre os tratamentos (B) Dose de 6% de Ca (C) Dose de 20% de Ca (D) Dose 100% de Ca (E) Dose 200% de Ca.

1.12.3.2 Método de análise de imagens utilizando-se machine learning

Os resultados obtidos para a rede Feed-Forward Backpropagation na estrutura 18-10-1 foram superiores os demais quando objetivou-se predizer as classes de suficiência de cálcio na F₁ (**Tabelas 49,50, 51, 52, 53 e 54**). Na estrutura FFBP 18-10-1 a porcentagem de acerto na classe 1, ou seja, plantas com teores foliares de Ca considerados no nível de deficiência segundo em nosso banco de dados (<2,0 g kg⁻¹) foi de 31% de acerto, de um total de 32 folhas que foram classificadas nesta faixa. Verifica-se no geral que os teores de Ca, mesmo quando as plantas foram cultivadas em condições de deficiência severa do nutriente, não foram extremamente baixos, resultando em poucos representantes das classes deficientes no banco de dados. Para a classe 2, que foi considerada a faixa na qual as plantas estavam com teores foliares dentro da faixa adequada para a cultura (3,0 a 6,5 g kg⁻¹) a porcentagem de acerto na predição da classe aumentou para 86%. Deve-se salientar que esta classe foi aquela com maior porcentagem de acerto e também com o maior número de representantes, com um n=184, que corresponde a 64% do banco de dados. Para a classe 3, ou seja, plantas nos quais o teor de Ca estava acima do nível de suficiência, portanto, caracterizando como consumo de luxo, houve um acerto de 54% na classificação das folhas. Na diagonal da matriz tem-se o número de classes totais que foram preditos de forma exata. O índice Kappa das determinações, de 0,41, foi considerado bom. A porcentagem de acerto global foi de 72%. (**Tabela 7**).

Tabela 49. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede FFBP (18-10-1) na F₁

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto
FFBP 18-10-1	CL 1	10	21	1	69	31
	CL2	7	158	19	14	86
	CL3	3	30	39	46	54
Erro de inclusão		50	24	34		

PAG: 71,9. Kappa 0,41. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

Determinações dos teores de Ca por meio da rede FFBP na estrutura 18-15-1 resultaram em 90% de acerto na identificação de plantas dentro da faixa de teor adequado de Ca, com erro de omissão para esta classe de 10% e o erro de inclusão de 32%. No geral, as classes preditas corretamente corresponderam a 64,9% do banco de dados, entretanto com um índice Kappa 0,19, considerado ruim. Para a classe 3, os

maiores erros foram os de omissão (82%), assim como ocorrido para a classe 1, com 69% deste erro (**Tabela 8**).

Tabela 50. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede FFBP (18-15-1) na F₁

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto
FFBP 18-15-1	CL 1	9	20	0	69	31
	CL2	7	165	12	10	90
	CL3	0	59	13	82	18
Erro de inclusão		44	32	48		

PAG: 64,9. Kappa 0,19. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

As análises da F₁ com a rede FFBP com uma camada de neurônios a mais na estrutura (18-10-5-1) resultou no maior índice de acerto na diagnose do status nutricional para calcio no teor adequado do nutriente desta pesquisa, nesta folha. O índice de acerto foi de 95%, com um erro de omissão de 5%. Contudo, esta rede conseguiu identificar apenas 3% das folhas com baixo teor de Ca foliar, com erro de omissão de 97% Para a classe de consumo de luxo, o acerto também foi baixo, com 18% de classificações corretas, erro de omissão de 82% e erro de inclusão de 41%. No geral, essa rede conseguiu predizer com exatidão a classe de teor de Ca de 189 folhas de um total de 288 indivíduos, correspondendo a 66%. (**Tabela 51**). A PAG foi de 65,6% e o índice Kappa de 0,12, considerado muito bom.

Tabela 51. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede FFBP (18-10-5-1) na F₁

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto
FFBP 18-10-5-1	CL 1	1	31	0	97	3
	CL2	0	175	9	5	95
	CL3	0	59	13	82	18
Erro de inclusão		0	34	41		

PAG: 65,6. Kappa 0,12. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

Os resultados para a predição das classes por meio da rede CFBP apresentaram índices Kappa que variaram entre 0,24 e 0,40, considerados razoáveis. Na estrutura 18-10-1 esta rede foi capaz de predizer corretamente 63% das classes, com índice Kappa de 0,40. Comparando-se as estruturas para esta rede (CFBP) em termos de predição das classes, esta apresentou o melhor desempenho para a exatidão global e índice Kappa. A porcentagem de acerto para as classes foi de 34% para a classe 1, 83% para a classe 2 e de 58% para a classe 3 (**Tabela 52**).

Tabela 52. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede CFBP (18-10-1) na F₁

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto
CFBP 18-10-1	CL 1	11	21	0	66	34
	CL2	4	152	28	17	83
	CL3	0	30	41	42	58
Erro de inclusão		27	25	41		

PAG: 62,8. Kappa 0,40. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

Na estrutura 18-15-1 os resultados obtidos para a rede CFPB foram de 89% de acerto na detecção de plantas em nível de suficiência de Ca (CL2), 25% de acerto para as plantas consideradas deficientes e de 29% para as plantas com alto teor de Ca no limbro foliar. No geral, as classes preditas corretamente corresponderam a 61,5% do banco de dados e índice Kappa razoável (de 0,39). O número de classes totais que foram preditas corretamente foram: CL1 8, CL2 164 e CL3 21, que podem ser vistas na diagonal da matriz de erro. Os erros de omissão das classes 1 e 2 ficaram acima de 70% e os erros de inclusão das classes acima de 32% (**Tabela 53**).

Tabela 53. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede CFBP (18-15-1) na F₁

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto
CFBP 18-15-1	CL 1	8	24	0	75	25
	CL2	5	164	15	11	89
	CL3	0	51	21	71	29
Erro de inclusão		38	32	42		

PAG: 61,5. Kappa 0,39. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

O aumento de uma camada na rede CFBP, deixando-a com estrutura 18-10-5-1, resultou em aumento na exatidão global e índice Kappa em comparação as demais estruturas desta rede. A porcentagem de acerto máxima foi verificada na faixa de suficiência de Ca (89%), seguida da classe de consumo de luxo (29%) e deficiência (25%). A porcentagem de classes preditas corretamente foi de 67%, com índice Kappa de 0,24, sendo considerado razoável. Nas classes 1 e 3 ocorreram maiores índices de omissão do que de inclusão (**Tabela 54**).

Tabela 54. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede CFBP (18-10-5-1) na F₁

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto
CFBP 18-10-5-1	CL 1	8	24	0	75	25
	CL2	5	164	15	11	89
	CL3	8	51	21	71	29
Erro de inclusão		38	31	42		

PAG: 67,0. Kappa 0,24. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

Para a F₂ utilizando-se a rede FFBP 18-10-1 a porcentagem de acerto na classe 1, ou seja, plantas com teores foliares considerados no nível de deficiência foi de 40% de acerto, de um total de 40 folhas pertencentes a esta classe. Para a classe 2, a porcentagem de acerto na predição da classe subiu para 81%. Para a classe 3, houve um acerto de 59% na classificação das folhas. O índice Kappa das determinações, de 0,42, considerado bom. Os resultados desta pesquisa estão abaixo dos verificados por

SILVA, 2011 que conclui que a omissão de cálcio na solução nutritiva promove sintomas típicos de deficiência deste nutriente em plantas de milho e que o sistema de visão artificial identifica as imagens das folhas de plantas de milho no estágio V4 submetidas a omissão completa de cálcio e a dose completa com 100% de acerto, porém, apesar dos resultados serem inferiores, são os melhores encontrados até então para este nutriente em capim marand (**Tabela 55**).

Tabela 55. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede FFBP (18-10-1) na F₂

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto
FFBP 18-10-1	CL 1	16	24	0	60	40
	CL2	5	97	18	19	81
	CL3	1	51	76	41	59
Erro de inclusão		27	44	19		

PAG: 65,6. Kappa 0,42. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

Ao se utilizar a rede Feed-Forward Backpropagation na estrutura 18-15-1 resultou em aumento na porcentagem de acerto global (PAG) em relação a rede 18-10-1. Houve aumento no acerto de identificação das classes 1 e 2 e redução no acerto da CL3. O índice de exatidão global foi de 67,4% e índice Kappa 0,46, considerado bom. O maior erro de inclusão foi verificado na classe 2 e o maior erro de omissão na classe 3. Nesta estrutura foi possível atingir 73% de acerto na detecção de plantas em estado de adequado teor de Ca nas folhas (CL2), 53% de acerto para as plantas consideradas no nível deficiente e de 66% das plantas com alto teor de K nas folhas. (**Tabela 56**).

Tabela 56. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede FFBP (18-15-1) na F₂

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto
FFBP 18-15-1	CL 1	21	16	3	48	53
	CL2	6	88	26	27	73
	CL3	3	40	85	34	66
Erro de inclusão		30	29	25		

PAG: 67,4. Kappa 0,46. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

Aumentando-se uma camada na rede, e analisando-se os dados com uma estrutura 18-10-5-1 os resultados em termos de exatidão global e índice Kappa foram superiores as demais estruturas, com bons índices de acerto nas classes: CL1 43%, CL2 75% e CL3 84%. A porcentagem de acerto da classe 3 aumentou consideravelmente nesta estrutura em comparação as demais (acerto de 84%). Os erros de omissão e inclusão na classe 1 foram de 58 e 11%. A exatidão global da rede foi de 74,3% e seu índice Kappa de 0,56 sendo considerado bom, este foi o melhor índice Kappa na determinação do status nutricional para Ca desta pesquisa (**Tabela 12**).

Tabela 57. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede FFBP (18-10-5-1) na F₂

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto
FFBP 18-10-5-1	CL 1	17	19	4	58	43
	CL2	1	90	29	25	75
	CL3	1	20	107	16	84
Erro de inclusão		11	30	24		

PAG: 74,3. Kappa 0,56. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

Os resultados a seguir são correspondentes a predição das classes de para o teor de Ca na F₂ utilizando-se a rede Cascade-Forward Backpropagation. Na estrutura 18-10-1 esta rede foi capaz de predizer corretamente aproximadamente 60% das classes, com um índice Kappa considerado muito razoável (0,31). Dentre as estruturas para esta rede (CFBP) em termos de predição das classes, esta teve o pior desempenho entre as estruturas. (**Tabela 10**). A porcentagem de erro de omissão variou entre 18 e 51% e os erros de inclusão entre 23 e 48%.

Tabela 58. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede CFBP (18-10-1) na F₂

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto
CFBP 18-10-1	CL 1	10	26	4	75	25
	CL2	3	99	18	18	82
	CL3	0	65	63	51	49
Erro de inclusão		23	48	26		

PAG: 59,7. Kappa 0,31. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

A rede CFBP, a estrutura 18-15-1 apresentou a mesma exatidão global que a estrutura 18-10-5-1 (63,2%) Na diagonal da matriz verifica-se o número de folhas que foram preditas corretamente: CL1 10, CL2 86 e CL3 86. O índice Kappa das determinações, de 0,37, foi considerado razoável. A maior porcentagem de acerto ocorreu na classe correspondente ao adequado teor de Ca nas folhas, sendo este de 72%, seguida da classe nas quais as plantas estavam em situação de consumo de luxo

de Ca (CL3) com 67 % de acerto, seguido da classe 1, com 25% de acerto nas classificações. O erro de omissão, variou entre 90% (consumo de luxo) e 35% (teor de N deficiente). O erro de inclusão variou entre 28 e 75% (classe de deficiência e teor de Ca adequados, respectivamente) (**Tabela 59**).

Tabela 59. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede CFBP (18-15-1) na F₂

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto
CFBP 18-15-1	CL 1	10	25	5	75	25
	CL2	2	86	32	28	72
	CL3	0	42	86	33	67
Erro de inclusão		17	44	30		

PAG: 63,2. Kappa 0,37. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

A rede Cascade-Forward Backpropagation com uma camada a mais, segundo estrutura 18-10-5-1, resultou em um índice Kappa de 0,36. A porcentagem de acerto máxima foi verificada na faixa de teor adequado (84%), seguida da classe excesso (66%). Apesar desses aumentos nas classes citadas, para o teor de deficiência de Ca, houve um erro de 100% na classificação, com um erro de 100% de omissão. Nas classes 2 e 3 ocorreram maiores erros de inclusão do que de inclusão (**Tabela 60**).

Tabela 60. Resultados de determinação do status nutricional das plantas para a rede CFBP (18-10-5-1) na F₂

Rede		CL1	CL2	CL3	Erro de omissão	%Acerto
CFBP 18-10-5-1	CL 1	0	36	4	100	0
	CL2	0	97	23	19	81
	CL3	0	43	85	34	66
Erro de inclusão		0	45	24		

PAG: 63,2. Kappa 0,36. n=288. Deficiência (CL1). Faixa de teor adequado (CL2). Consumo de luxo (CL3).

Os resultados obtidos para o método de análise de imagens utilizando-se machine learning para determinação do status de Ca no Marandu variaram em função das redes bem como das folhas utilizadas. Para a F₁ as melhores redes e estruturas foram FFBP 18-10-1, CFBP 18-10-1 e 18-10-5-1. Para a F₂ as melhores redes e estruturas foram FFBP 18-15-1 e 18-10-5-1 e CFBP 18-15-1. O índice Kappa variou entre 0,12 (ruim) e 0,56 (bom) com PAG entre 0,12 e 0,56 as redes empregadas (**Tabela 61**).

Tabela 61. Porcentagem de acerto global (PAG) e índice Kappa para cada rede neural para predição de potássio na F₁ (folha mais jovem completamente expandida) e na F₂ (segunda mais jovem completamente expandida).

Rede neural	Folha 1		Folha 2		
	PAG	Kappa	Rede neural	PAG	Kappa
FFBP 18-10-1	71,9	0,41	FFBP 18-10-1	65,6	0,42
FFBP 18-15-1	64,9	0,19	FFBP 18-15-1	67,4	0,46

FFBP 18-10-5-1	65,6	0,12	FFBP 18-10-5-1	74,3	0,56
CFBP 18-10-1	62,8	0,40	CFBP 18-10-1	59,7	0,31
CFBP 18-15-1	61,5	0,39	CFBP 18-15-1	63,2	0,37
CFBP 18-10-5-1	67,0	0,24	CFBP 18-10-5-1	63,2	0,36

1.12.3.3 Método de análise de imagens utilizando-se classificadores

A determinação do estado nutricional do capim marandu para cálcio utilizando-se classificadores estão separados por ciclo de crescimento e índice espectral. Além de também terem sido avaliados nas duas folhas F₁ e F₂ (**Tabelas 62 e 63**). Para fins de comparação entre índices e a demonstração de seus erros e acertos em cada classe, os resultados completos e matrizes de confusão, bem como erros de inclusão e omissão podem ser verificados nos **Anexos 40 a 58**.

No primeiro ciclo de crescimento os índices Kappa ficaram muito baixos, sendo todos considerados ruins. A determinação do teor de Ca no capim marandu foi realizado de forma mais assertiva quando se utilizou a combinação dos índices Vern, Vn e Rvv resultando em um PAG de 29% e um índice Kappa considerado ruim. No terceiro ciclo de crescimento, todos os índices apresentaram baixos PAGs e índices Kappa com variações entre 25,8 e 33,8 de PAG e 0,06 e 0,16 de índice Kappa. Utilizando-se a combinação dos índices Vern e Rvv foi possível alcançar um PAG de 33,8 e um índice Kappa de 0,16. No terceiro ciclo, no geral, o desempenho dos índices foi superior, comparado aos resultados obtidos no segundo ciclo e primeiro ciclos, porém com valores ainda baixos de PAG e índice Kappa. (**Tabela 62**).

Analisando-se a os resultados da F₂ no primeiro ciclo de crescimento a predição do estado nutricional das plantas para o Ca foi determinada de forma mais assertiva nesta folha, a PAG e o índice Kappa de todos os índices foram superiores, demonstrando que a manifestação dos sintomas nesta folha foi mais acentuado, permitindo uma melhor distinção do nível de fertilidade de Ca que as plantas foram cultivadas. A PAG variou entre 32,8 e 41,5 e o índice Kappa entre 0,16 (ruim) e 0,21 (razoável). Os índices ou combinações destes que, apresentaram melhores valores de PAG e Kappa foram Evd, Vern e Vn e RVV com PAG de 41,5 e Kappa de 0,20 (ruim), Evd, Vn e Rvv com PAG de 41,1 e Kappas de 0,22 (razoável), (**Tabela 63**). No estudo realizado durante o segundo ciclo de crescimento, todos os índices da F₂ apresentaram resultados inferiores para o PAG e índice Kappa, em comparação ao primeiro ciclo, com PAG variando entre 27,0 e

35,9 e o índice Kappa entre 0,09 (ruim) e 0,32 (rruim), Destaca-se que o desempenho dos índices isolados apresentaram os piores resultados observados nesse corte. No terceiro ciclo de crescimento os resultados foram superiores aos verificados no segundo, com Kappa média de 0,19 e PAG de 36,1.

Ao se avaliar as frequências de ocorrência de classificadores com Kappa iguais ou superiores a 0,6 para cada combinação de índices espectrais utilizados como vetores de características, em cada ciclo de crescimento na F₂ pode-se verificar que nenhum índice apresentou Kappa superior a 0,6 nos três ciclos de crescimento.

1.12.3.4 Análise SPAD e NDVI

Para o índice SPAD houve efeito do ciclo de crescimento quando esta variável foi analisada na F₁ ($p < 0.0001$) e efeito da interação dose*ciclo de crescimento para a F₂ $p < 0.01$. Para o NDVI houve efeito somente dos ciclos de crescimento, com $p < 0,0001$ (**Tabela 62**).

Tabela. 62. Resultados da análise de variância para índice SPAD nas lâminas foliares F₁ (mais jovem completamente expandida) e F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) e NDVI (parcela) em capim marandu submetido a doses de cálcio

Fonte de variação	SPAD		NDVI
	F ₁	F ₂	parcela
Dose de N (D)	0,9028	0,3665	0,8080
Ciclo de crescimento (C)	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Interação D*C	0,2093	0,0050	0,9230

O desdobramento da interação do índice SPAD mostra que somente houve diferenciação entre as doses de Ca no último ciclo de crescimento, sendo que os maiores teores foram verificados nas maiores doses de Ca na solução nutritiva. *Morais, et al*, verificou que as leituras efetuadas com o SPAD-502 estimaram com alta significância os teores de Ca e outros como N, P e Mg em folíolos de dendezeiro nos sistemas agroflorestais. O índice SPAD apresentou decréscimo em função do decorrer dos ciclos de crescimento (**Tabela 64**). O teor médio de SPAD na pesquisa foi de 43,7.

Tabela. 63. Índice SPAD nas lâminas foliares F₂ (segunda mais jovem completamente expandida) em capim marandu segundo a interação entre doses de cálcio e ciclos de crescimento

Dose de Ca	Ciclos de crescimento		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
	SPAD em F ₂		
6	54,50 ± 2,16 ^{Aa}	38,50 ± 2,17 ^{Ab}	31,27 ± 2,12 ^{Bc}

20	54,27 ± 2,50 ^{Aa}	40,00 ± 2,49 ^{Ab}	31,80 ± 2,22 ^{Bc}
100	54,43 ± 2,21 ^{Aa}	41,73 ± 2,37 ^{Ab}	39,43 ± 2,39 ^{Ab}
200	57,33 ± 2,81 ^{Aa}	41,77 ± 2,45 ^{Ab}	40,90 ± 2,45 ^{Ab}

Tabela. 64. Índice SPAD nas lâminas foliares F₁ em capim marandu nos ciclos de crescimento.

Ciclo de Crescimento	SPAD
Ciclo 1	56,16 ± 1,50 ^A
Ciclo 2	40,53 ± 1,76 ^B
Ciclo 3	34,48 ± 1,49 ^C

O NDVI apresentou o mesmo comportamento do índice Spad, com redução em função do ciclo de crescimento (**Tabela 65**). Não foi possível identificar as doses de cálcio na pesquisa utilizando-se os dados de NDVI ou índice SPAD. Na literatura não estão disponíveis trabalhos que provem a relação do NDVI com o teor de Ca nas folhas.

Tabela. 65. Índice NDVI em função dos ciclos de crescimento estudados.

Ciclo de Crescimento	NDVI
Ciclo 1	0,867 ± 0,007 ^A
Ciclo 2	0,843 ± 0,007 ^B
Ciclo 3	0,814 ± 0,007 ^C

Tabela. 66. Porcentagem de acerto global (PAG) e índice Kappa para cada combinação de índices espectrais utilizados como vetor de características da Folha 1 (mais jovem completamente expandida) em função de doses de cálcio

Primeiro ciclo de crescimento			Segundo ciclo de crescimento			Terceiro ciclo de crescimento		
Índice espectral	PAG	Kappa	Índice espectral	PAG	Kappa	Índice espectral	PAG	Kappa
Evd	26,6	0,09	Evd	27,0	0,05	Evd	30,2	0,14
Vern	24,9	0,02	Vern	28,3	0,04	Vern	25,8	0,06
Vn	26,6	0,09	Vn	27,0	0,05	Vn	30,5	0,14
Rvv	22,8	0,02	Rvv	28,8	0,07	Rvv	32,9	0,16
Evd e Vern	27,8	0,07	Evd e Vern	30,5	0,08	Evd e Vern	34,2	0,17
Evd e Vn	27,0	0,08	Evd e Vn	26,0	0,04	Evd e Vn	30,4	0,12
Evd e Rvv	27,8	0,06	Evd e Rvv	29,7	0,07	Evd e Rvv	32,8	0,16
Vern e Vn	27,7	0,06	Vern e Vn	30,5	0,08	Vern e Vn	34,1	0,17
Vern e Rvv	27,9	0,06	Vern e Rvv	30,2	0,08	Vern e Rvv	33,8	0,17
Vn e Rvv	27,8	0,06	Vn e Rvv	29,5	0,07	Vn e Rvv	32,8	0,16
Evd, Vern e Vn	26,4	0,04	Evd, Vern e Vn	29,3	0,06	Evd, Vern e Vn	32,8	0,16
Evd, Vern e Rvv	29,0	0,07	Evd, Vern e Rvv	28,3	0,07	Evd, Vern e Rvv	32,5	0,16
Evd, Vn, Rvv	27,2	0,05	Evd, Vn, Rvv	29,2	0,06	Evd, Vn, Rvv	32,1	0,15
Vern, Vn e Rvv	29,0	0,07	Vern, Vn e Rvv	27,8	0,06	Vern, Vn e Rvv	32,5	0,16
Evd, Vern, Vn e Rvv	28,6	0,07	Evd, Vern, Vn e Rvv	28,5	0,07	Evd, Vern, Vn e Rvv	32,4	0,16

Evd - excesso de verde; Vern - vermelho normalizado; Vn - verde normalizado; Rvv - razão verde-vermelho. Destaque me negrito para o melhor resultado alcançado no respectivo ciclo de crescimento.

Tabela. 67. Porcentagem de acerto global (PAG) e índice Kappa para cada combinação de índices espectrais utilizados como vetor de características da Folha 1 (mais jovem completamente expandida) em função de doses de cálcio

Primeiro ciclo de crescimento			Segundo ciclo de crescimento			Terceiro ciclo de crescimento		
Índice espectral	PAG	Kappa	Índice espectral	PAG	Kappa	Índice espectral	PAG	Kappa
Evd	32,8	0,16	Evd	31,0	0,15	Evd	36,5	0,20
Vern	37,4	0,17	Vern	27,0	0,09	Vern	32,3	0,14
Vn	32,8	0,16	Vn	31,0	0,15	Vn	36,4	0,19
Rvv	37,4	0,17	Rvv	34,0	0,18	Rvv	31,5	0,13
Evd e Vern	40,2	0,21	Evd e Vern	35,3	0,20	Evd e Vern	36,3	0,19
Evd e Vn	33,0	0,13	Evd e Vn	30,4	0,10	Evd e Vn	35,7	0,19
Evd e Rvv	40,2	0,22	Evd e Rvv	34,5	0,19	Evd e Rvv	36,4	0,18
Vern e Vn	40,2	0,21	Vern e Vn	35,3	0,20	Vern e Vn	36,3	0,19
Vern e Rvv	40,0	0,21	Vern e Rvv	35,0	0,19	Vern e Rvv	36,9	0,20
Vn e Rvv	40,3	0,22	Vn e Rvv	34,5	0,19	Vn e Rvv	36,4	0,18
Evd, Vern e Vn	40,4	0,21	Evd, Vern e Vn	35,9	0,19	Evd, Vern e Vn	37,2	0,19
Evd, Vern e Rvv	40,4	0,20	Evd, Vern e Rvv	29,6	0,13	Evd, Vern e Rvv	34,5	0,14
Evd, Vn, Rvv	41,1	0,22	Evd, Vn, Rvv	34,8	0,18	Evd, Vn, Rvv	37,7	0,19
Vern, Vn e Rvv	40,6	0,20	Vern, Vn e Rvv	29,8	0,13	Vern, Vn e Rvv	34,2	0,14
Evd, Vern, Vn e Rvv	41,5	0,20	Evd, Vern, Vn e Rvv	30,4	0,14	Evd, Vern, Vn e Rvv	35,0	0,15

Evd - excesso de verde; Vern - vermelho normalizado; Vn - verde normalizado; Rvv - razão verde-vermelho. Destaque me negrito para o melhor resultado alcançado no respectivo ciclo de crescimento.

1.13 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A porcentagem de acerto da identificação do estado nutricional do capim-marandu através da análise de imagens varia em função da metodologia utilizada.

As omissões dos nutrientes N, K e Ca causam alterações morfológicas e sintomas visuais de deficiência no capim-marandu.

Big datas de imagens serão necessárias para aumentar o treinamento de sistemas de análise de imagens possibilitando o aperfeiçoamento destes com consequente melhora nos níveis de identificação do estado nutricional de pastagens e outras culturas cultivadas a campo.

A diagnose do status nutricional através da análise de imagens permite avaliar uma possível desordem nutricional, entretanto, o diagnóstico baseado em sintomas visíveis, deve ser tratado com cautela e embasado por padrões visuais bem definidos para cada espécie.

1.14 CONCLUSÃO

É possível detectar o estado nutricional de N, Ca e K em capim-marandu (*Urochloa brizantha* cv. Marandu) utilizando-se técnicas de aprendizado de máquina e de classificadores a partir de imagens RGB.

REFERÊNCIAS

- ABREU, J. B. R. DE; MONTEIRO, F. A. Produção e nutrição do capim-marandu em função de adubação nitrogenada e estádios de crescimento. **Boletim de Indústria Animal**, v. 56, n. 2, p. 137–146, 1999.
- ADAMI, M.; PINHEIRO, E. S.; MOREIRA, M. A. Aplicação de diferentes algoritmos para a classificação de imagens etm+/landsat- 7 no mapeamento agrícola. in: **Simpósio latino americano de percepción remota y sistemas de Información espacial**, 10., Cochabamba. **Anais...** Bolívia, 2002.
- ARGENTA, G. **Monitoramento do nível de nitrogênio na planta como indicador da adubação nitrogenada em milho** 2001. 112 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- ARREGUI, L.M.; LASA, B.; LAFARGA, A. et al., Evaluation of chlorophyll meters as tools for N fertilization in winter wheat under humid Mediterranean conditions. **European Journal of Agronomy**, v. 24, p. 140-148, 2006.
- BAESSO, M.M., PINTO, F.A.C, QUEIROZ D.M., VIEIRA L.B., ALVES E. Determinação do “status” nutricional de nitrogênio no feijoeiro utilizando imagens digitais coloridas. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v.27, n.2, p.520-528, maio/ago. 2007
- BATAGLIA, O.C.; FURLANI, A.M.C.; TEIXEIRA, J.P.F.; FURLANI, P.R.; GALLO, J.R. Método de análises química de plantas. Campinas: Instituto Agrônomo, 1983. 48p. (Boletim Técnico, 78).
- BRUNS, H.A.; EBELHAR M.W. Nutrient uptake of maize affected by nitrogen and potassium fertility in a humid subtropical environment. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, 37 (1-2) (2006), pp. 275-293
- BURKS, T., SHEARER, S., HEATH, J., DONOUHUE, K., 2005. Evaluation of neural network classifiers for weed species discrimination. **Biosyst. Eng.** 91 (3), 293–304.
- COSTA, E.M.; MENDES, G.R.; VENTURA M.V.A.; FRANCO C.; PEREIRA L.S.; Soares V.M.; Viability of Nitrogen Fertilization in Pastures. **Biomed J Sci & Tech Res**
- CASADESUS J, KAYA Y, BORT J, NACHIT MM, ARAUS JL, AMOR S, FERRAZZANO G, MAALOUF F, MACCAFERRI M, MARTOS M. Using vegetation indices derived from conventional digital cameras as selection criteria for wheat breeding in water-limited environments. **Ann App Bot** 150: 227–236. 2007.
- CONGALTON, R.G. A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. **Remote Sensing of Environment**, 37, 35-46. (1991)
- DELEVATTI, LUTTI M. et al. Effect of nitrogen application ... **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, 2019.
- DOW, A. I.; ROBERTS, S. Proposal: Critical nutrient ranges for crop diagnosis. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, n. 3, p. 401-403, 1982.

DUVEILLER, G., WEISS, M., BARET, F., & DEFOURNY, P. (2011). Retrieving wheat 26 Green Area Index during the growing season from optical time series measure27 ments based on neural network radiative transfer inversion, **Remote Sensing of Environment**, 115 (3), 887–896

DWYER, L.M.; ANDERSON, A.M.; MA, B.L.; STEWART, D.W.; TOLLENAAR, M. e GREGORICH, E. Quantifying the nonlinearity in chlorophyll meter response to corn leaf nitrogen concentration. **Canadian Journal of Plant Science**, 75:179-182, 1995

EPSTEIN, E. & BLOOM, A.J. Nutrição mineral de plantas, princípios e perspectivas. Trad. Maria Edna Tenório Nunes Londrina: Editora Planta, 86p, 2006.

ESCADAFAL, R.; HUETE, A. Improvement in remote sensing of low vegetation cover in arid regions by correcting vegetation indices for soil ‘noise’. **Comptes Rendus**, v. 312, n. 11, p. 1385-1391, 1991.

GITELSON, A.A., A. VIÑA, T.J. ARKEBAUER, D.C. RUNDQUIST, G. KEYDAN, AND B. LEAVITT. Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. **Geophys. Res. Lett.** 30(5):1248, 2003.

GITELSON, A. A. *et al.* Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 1, p. 76–87, apr. 2002

GUERRA G.L.; BECQUER T.; VENDRAME P.R.S ; GALBEIRO S.; BRITO O.R.; SILVA L.D.F; FELIX J.C; LOPES M.R.; HENZ E.L. MIZUBUTI I.Y.; Avaliação nutricional da *Brachiaria brizantha* cv. Marandu cultivada em solos desenvolvidos de basalto e de arenito no estado do Paraná. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 40, n. 1, p. 469-484, jan./fev. 2019

GUIJARRO, M. *et al.* Automatic segmentation of relevant textures in agricultural images. **Com-puters and Electronics in Agriculture**, v. 75, n. 1, p. 75–83, jan. 2011.

HAYKIN, S. Redes neurais: Princípios e prática. **Bookman**. (2008).

HAYKIN, S. Neural Networks—A Comprehensive Foundation. 2nd Edition, **Pearson Education**, New Delhi. (2003)

HIMSTEDT, M., T. FRICKE, AND M. WACHENDORF. Determining the contribution of legumes in legume-grass mixtures using digital image analysis. **Crop Science** 49, 1910-1916. 2009.

HOAGLAND, D.R.; ARNON, D. I. **The water culture method for growing plants without soils** Berkeley: California Agricultural Experimental Station, 347p., 1950.

HUANG S, ZHAO C, ZHANG Y, WANG C. Nitrogen use efficiency in rice. **Nitrogen in agriculture-updates**. (2018)

JENSEN, B. JOHNSON, E. LORENZ, B.A. LUNDEVALL. Forms of knowledge and modes of innovation. **Res. Policy**, 36 (2007), pp. 680-693

- JORDAN, C. F. Derivation of leaf area index from quality of light on the Forest floor. **Ecology**, 50:663-666, 1969.
- KARCHER D.E., RICHARDSON M.D. Quantifying turfgrass color using digital image analysis. **CropSci**. 43:943–951. 2005.
- KOUMPOUROS, Y., MAHAMAN, B.D., MALIAPPIS, M., PASSAM, H.C., SIDERIDIS, A.B., ZORKADIS, V., 2004. Image processing for distance diagnosis in pest management. **Computers and Electronics in Agriculture** 44(2), 121-131.
- LARA, M.A.S; PEDREIRA, C.G.S. Respostas morfogênicas e estruturais de dosséis de espécies de Braquiária à intensidade de desfolhação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.7, p.760-767, 2011.
- LE BAIL M, JEUFFROY MH, BOUCHARD C & BARBOTTIN A. Is it possible to forecast the grain quality and yield of different varieties of winter wheat from Minolta SPAD meter measurements? **European Journal of Agronomy**, 23:379-391. 2005.
- MALAVOLTA, E. **Manual de Nutrição de Plantas**. 6 ed. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006.
- LIU YJ, TONG YP, ZHU YG, DING H, SMITH FA. Leaf chlorophyll readings as an indicator for spinach yield and nutritional quality with different nitrogen fertilizer applications. *Journal of Plant Nutrition* 29(7):1207-1217. 2006.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda, 2006.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira de Potassa e do Fósforo, 1997. 319 p.
- MOGHADDAM, P. A.; DERAFSHI, M. H. ; SHAYESTEH, M. A new method in assessing sugar beet leaf nitrogen status through color image processing and artificial neural network. **Journal of Food, Agriculture & Environment**. Vol.8 No.2 pp.485-489 ref.28. 2010
- MOTTA, T.P. Índices espectrais de imagens coloridas na avaliação do estado nutricional de fósforo, enxofre e magnésio no capim-marandu. 2016. **Tese (Doutorado em Qualidade e Produtividade Animal)** - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2016. doi:10.11606/T.74.2016.tde-03112016-160723. Acesso em: 2021-08-29.
- PAGOLA et al. New method to assess barley nitrogen nutrition status based on image colour analysis: Comparison with SPAD-502. **Computers and Electronics in Agriculture** Volume 65, Issue 2, March 2009, Pages 213-218
- PEDREIRA, B. C.C.G.; SANTOS R. F. dos. Avaliação das escalas de 1:25.000 e 1:100.000 em mapeamentos orientados a planejamentos ambientais. **Caderno de Informações Georreferenciadas**. v.1, n.3, 1999.

PERYEA, F. J. Sample washing procedures influence mineral element concentrations in zinc sprayed apple leaves. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v.36, p.2923-2931,2005

PYDIPATI, R.; BURKS, T.; LEE, W. Identification of citrus disease using color texture features and discriminant analysis. **Computers and Electronics in Agriculture**, Netherlands, v. 52, n. 1-2, p. 49-59, 2006.

SKALOUDOVA B, KRVAN V, ZEMEK R. Computer-assisted estimation of leaf damage caused by spider mites. **Comput Electron Agric**. 2006;53(2):81–91.

ROMUALDO, L.M. Utilização da visão artificial para diagnóstico nutricional de nitrogênio, fósforo, potássio e manganês em milho. 2013. **Tese (Doutorado em Qualidade e Produtividade Animal)** - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2013. doi:10.11606/T.74.2013.tde-10072013-085725. Acesso em: 2021-08-29

ROMUALDO LM, LUZ PHC, DEVECHIO FFS, MARIN MA, ZÚÑIGA AMG, HERLING V.R. Use of artificial vision techniques for diagnostic of nitrogen nutritional status in maize plants. **Computers and electronics in agriculture** 104, 63-70. 2014

ROSENFELD, G. H., & FITZPATRICK-LINS, K. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.52, p.223–227. 1986.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: **Third ERTS Symposium**, Proceedings, NASA SP-351, NASA, Washington, DC, v. 1, p. 309-317, 1973.

SABERIOON, M. M. et al. Assessment of rice leaf chlorophyll content using visible bands at different growth stages at both the leaf and canopy scale. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 32, p. 35–45, oct. 2014.

SANTOS CAG, SILVA RM, SILVA AM, NETO RMB. Estimation of evapotranspiration for different land covers in a Brazilian semi-arid region: A case study of the Brígida River basin, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, 74: 54-66. . 2017.

SILVA F.F, LUZ P.H.C, ROMUALDO L.M., MARIN M.A., V.R. HERLING, A.M.G. ZÚÑIGA AND O.M. BRUNO. Diagnostic Tool for Magnesium Nutrition in Maize Based on Image Analysis of Different Leaf Sections. **Crop Science**, vol. 54, 2014

SILVA, F.F.. Reconhecimento de padrões de nutrição para nitrogênio e potássio em híbridos de milho por análise de imagens digitais. 2015. **Tese (Doutorado em Qualidade e Produtividade Animal)** - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2015.

VOLLMANN J., WALTER H., SATO, T. AND SCHWEIGER, P. Digital image analysis and chlorophyll metering for phenotyping the effects of nodulation in soybean. **Computers and Electronics in Agriculture** 75: 190-195. 2011.

WANG, Z., CHI, Z., FENG, D., Shape based leaf image retrieval. **IEE Proceedings - Vision, Image and Signal Processing**, 150(1): 34 -43. 2003.

WIDIASARI, I.R., NUGROHO, L., & WIDYAWAN. Deep learning multilayer perceptron (MLP) for flood prediction model using wireless sensor network based hydrology time series data mining. **International Conference on Innovative and Creative Information Technology (ICITech)**, 1-5. 2017.

WIWART M, FORDOŃSKI G, ŻUK-GOŁASZEWSKA K & SUCHOWILSKA E. Early diagnostics of macronutrient deficiencies in three legume species by color image analysis. **Computers and Electronics in Agriculture** , 65:125-132. (2009)

WU J; WANG D; ROSEN CJ; BAUER ME. 2007. Comparison of petiole nitrate concentration, SPAD chlorophyll readings, and QuickBird satellite imagery in detecting nitrogen status of potato canopies. **Field Crops Research** 101: 96-103.

YANG, W. *et al.* Greenness identification based on HSV decision tree. **Information Processing in Agriculture**, v. 2, n. 3-4, p. 149-160, out. 2015

YOUSEFI, J. Image binarization using otsu thresholding algorithm. Ontario, Canada: University of Guelph, 2011.

ZHU, Y.; HUANG, C. An improved median filtering algorithm for image noise reduction. **Physics Procedia**, v. 25, p. 609-616, 2012.

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de confusão para os índices em função das classes de nitrogênio na F₁, ciclo 1.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd	CL 1	133	63	37	7	44,6
	CL2	115	63	48	14	73,8
	CL3	64	50	73	53	69,6
	CL4	8	9	41	182	24,2
Erro de inclusão		58,4	65,9	63,3	28,9	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern	CL 1	72	30	77	61	70,0
	CL2	57	43	72	68	82,1
	CL3	64	19	94	63	60,8
	CL4	17	3	73	147	38,8
Erro de inclusão		65,7	54,7	70,3	56,6	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn	CL 1	133	63	37	7	44,6
	CL2	116	62	48	14	74,2
	CL3	64	50	73	53	69,6
	CL4	8	9	41	182	24,2
Erro de inclusão		58,6	66,3	63,3	28,9	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Rvv	CL 1	131	69	6	34	45,4
	CL2	97	90	13	40	62,5
	CL3	63	53	12	112	95,0
	CL4	10	41	11	178	25,8
Erro de inclusão		56,5	64,4	71,4	51,1	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vern	CL 1	134	62	40	4	44,2
	CL2	111	78	39	12	67,5
	CL3	69	42	85	44	64,6
	CL4	6	12	38	184	23,3
Erro de inclusão		58,1	59,8	57,9	24,6	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vn	CL 1	131	66	35	8	45,4
	CL2	126	55	43	16	77,1
	CL3	64	48	77	51	67,9
	CL4	6	9	42	183	23,8
Erro de inclusão		59,9	69,1	60,9	29,1	

Anexo 2. Matriz de confusão para os índices em função das classes de nitrogênio na F₁, ciclo 1.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Rvv	CL 1	134	60	42	4	44,2
	CL2	113	76	39	12	68,3
	CL3	67	43	86	44	64,2
	CL4	6	12	38	184	23,3
Erro de inclusão		58,1	60,2	58,0	24,6	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Vn	CL 1	134	62	40	4	44,2
	CL2	110	79	39	12	67,1
	CL3	69	42	85	44	64,6
	CL4	6	12	38	184	23,3
Erro de inclusão		58,0	59,5	57,9	24,6	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Rvv	CL 1	134	60	42	4	44,2
	CL2	113	75	39	13	68,8
	CL3	68	44	84	44	65,0
	CL4	6	12	37	185	22,9
Erro de inclusão		58,3	60,7	58,4	24,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn e Rvv	CL 1	134	60	42	4	44,2
	CL2	114	75	39	12	68,8
	CL3	67	43	86	44	64,2
	CL4	6	12	38	184	23,3
Erro de inclusão		58,3	60,5	58,0	24,6	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Vn	CL 1	133	66	37	4	44,6
	CL2	105	83	39	13	65,4
	CL3	70	47	79	44	67,1
	CL4	5	13	37	185	22,9
Erro de inclusão		57,5	60,3	58,9	24,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Rvv	CL 1	173	19	44	4	27,9
	CL2	142	34	56	8	85,8
	CL3	85	15	100	40	58,3
	CL4	11	9	58	162	32,5
Erro de inclusão		57,9	55,8	61,2	24,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vn, Rvv	CL 1	132	65	39	4	45,0
	CL2	107	81	39	13	66,3
	CL3	69	42	85	44	64,6
	CL4	6	12	37	185	22,9
Erro de inclusão		58,0	59,5	57,5	24,8	

Anexo 3. Matriz de confusão para os índices em função das classes de nitrogênio na F₁, ciclo 1.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern, Vn e Rvv	CL 1	174	18	44	4	27,5
	CL2	140	35	57	8	85,4
	CL3	84	16	101	39	57,9
	CL4	10	9	59	162	32,5
Erro de inclusão		57,4	55,1	61,3	23,9	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern, Vn e Rvv	CL 1	170	21	45	4	29,2
	CL2	139	38	56	7	84,2
	CL3	86	14	100	40	58,3
	CL4	13	9	57	161	32,9
Erro de inclusão		58,3	53,7	61,2	24,1	

Anexo 4. Matriz de confusão para os índices em função das classes de nitrogênio na F₁, ciclo 2.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd	CL 1	97	120	23	0	59,6
	CL2	54	155	31	0	35,4
	CL3	1	31	155	53	35,4
	CL4	0	3	40	197	17,9
Erro de inclusão		36,2	49,8	37,8	21,2	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern	CL 1	77	110	47	6	67,9
	CL2	67	156	16	1	35,0
	CL3	46	39	91	64	62,1
	CL4	23	3	54	160	33,3
Erro de inclusão		63,8	49,4	56,3	30,7	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn	CL 1	97	120	23	0	59,6
	CL2	54	155	31	0	35,4
	CL3	1	32	154	53	35,8
	CL4	0	3	40	197	17,9
Erro de inclusão		36,2	50,0	37,9	21,2	

Anexo 5. Matriz de confusão para os índices em função das classes de nitrogênio na F₁, ciclo 2.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Rvv	CL 1	137	80	20	3	42,9
	CL2	62	98	73	7	59,2
	CL3	4	43	116	77	51,7
	CL4	2	11	73	154	35,8
Erro de inclusão		33,2	57,8	58,9	36,1	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vern	CL 1	146	77	17	0	39,2
	CL2	58	153	29	0	36,3
	CL3	6	30	152	52	36,7
	CL4	1	2	40	197	17,9
Erro de inclusão		34,2	30,8	41,6	36,1	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vn	CL 1	104	111	25	0	56,7
	CL2	54	155	31	0	35,4
	CL3	0	34	156	50	35,0
	CL4	0	2	44	194	19,2
Erro de inclusão		34,2	48,7	39,1	20,5	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Rvv	CL 1	141	81	18	0	41,3
	CL2	57	154	29	0	35,8
	CL3	7	32	151	50	37,1
	CL4	1	1	42	196	18,3
Erro de inclusão		31,6	42,5	37,1	20,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Vn	CL 1	146	77	17	0	39,2
	CL2	58	154	28	0	35,8
	CL3	6	30	152	52	36,7
	CL4	1	2	40	197	17,9
Erro de inclusão		30,8	41,4	35,9	20,9	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Rvv	CL 1	142	80	18	0	40,8
	CL2	58	151	31	0	37,1
	CL3	6	34	142	58	40,8
	CL4	2	3	41	194	19,2
Erro de inclusão		31,7	43,7	38,8	23,0	

Anexo 6. Matriz de confusão para os índices em função das classes de nitrogênio na F₁, ciclo 2.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn e Rvv	CL 1	141	81	18	0	41,3
	CL 2	57	154	29	0	35,8
	CL 3	7	32	151	50	37,1
	CL 4	1	1	42	196	18,3
Erro de inclusão		31,6	42,5	37,1	20,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Vn	CL 1	146	78	16	0	39,2
	CL 2	54	155	31	0	35,4
	CL 3	6	33	151	50	37,1
	CL 4	1	2	41	196	18,3
Erro de inclusão		29,5	42,2	36,8	20,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Rvv	CL 1	135	98	7	0	43,8
	CL 2	58	167	15	0	30,4
	CL 3	6	26	170	38	29,2
	CL 4	0	0	34	206	14,2
Erro de inclusão		32,2	42,6	24,8	15,6	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vn, Rvv	CL 1	139	82	19	0	42,1
	CL 2	52	158	30	0	34,2
	CL 3	5	34	151	50	37,1
	CL 4	1	1	42	196	18,3
Erro de inclusão		29,4	42,5	37,6	20,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern, Vn e Rvv	CL 1	135	97	8	0	43,8
	CL 2	58	168	14	0	30,0
	CL 3	5	27	171	37	28,8
	CL 4	0	0	35	205	14,6
Erro de inclusão		31,8	42,5	25,0	15,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern, Vn e Rvv	CL 1	131	102	7	0	45,4
	CL 2	56	169	15	0	29,6
	CL 3	5	30	165	40	31,3
	CL 4	0	0	35	205	14,6
Erro de inclusão		31,8	43,9	25,7	16,3	

Anexo 7. Matriz de confusão para os índices em função das classes de nitrogênio na F₁, ciclo 3.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd	CL 1	122	87	31	0	49,2
	CL2	124	93	23	0	61,3
	CL3	22	7	124	87	48,3
	CL4	12	2	67	159	33,8
Erro de inclusão		56,4	50,8	49,4	35,4	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern	CL 1	128	65	19	28	46,7
	CL2	47	188	3	2	21,7
	CL3	110	56	20	54	91,7
	CL4	60	18	18	144	40,0
Erro de inclusão		62,9	42,5	66,7	36,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn	CL 1	122	87	31	0	49,2
	CL2	124	93	23	0	61,3
	CL3	22	7	124	87	48,3
	CL4	12	2	67	159	33,8
Erro de inclusão		56,4	50,8	49,4	35,4	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Rvv	CL 1	126	82	0	32	47,5
	CL2	45	132	4	59	45,0
	CL3	5	22	112	101	53,3
	CL4	5	32	109	94	60,8
Erro de inclusão		30,4	50,7	50,2	67,1	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vern	CL 1	150	65	22	3	37,5
	CL2	33	184	21	2	23,3
	CL3	5	23	153	59	36,3
	CL4	8	7	76	149	37,9
Erro de inclusão		23,5	34,1	43,8	30,0	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vn	CL 1	98	114	28	0	59,2
	CL2	76	141	23	0	41,3
	CL3	15	13	126	86	47,5
	CL4	5	9	71	155	35,4
Erro de inclusão		49,5	49,1	49,2	35,7	

Anexo 8. Matriz de confusão para os índices em função das classes de nitrogênio na F₁, ciclo 3.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Rvv	CL 1	145	71	23	1	39,6
	CL2	33	183	22	2	23,8
	CL3	6	22	162	50	32,5
	CL4	8	9	76	147	38,8
Erro de inclusão		24,5	35,8	42,8	26,5	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Vn	CL 1	150	65	22	3	37,5
	CL2	33	184	21	2	23,3
	CL3	5	23	153	59	36,3
	CL4	8	7	76	149	37,9
Erro de inclusão		23,5	34,1	43,8	30,0	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Rvv	CL 1	150	65	22	3	37,5
	CL2	33	182	23	2	24,2
	CL3	5	23	158	54	34,2
	CL4	8	10	73	149	37,9
Erro de inclusão		23,5	35,0	42,8	28,4	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn e Rvv	CL 1	145	71	23	1	39,6
	CL2	33	183	22	2	23,8
	CL3	6	22	162	50	32,5
	CL4	8	9	76	147	38,8
Erro de inclusão		24,5	35,8	42,8	26,5	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Vn	CL 1	153	64	22	1	36,3
	CL2	34	180	24	2	25,0
	CL3	6	22	154	58	35,8
	CL4	8	8	76	148	38,3
Erro de inclusão		23,9	34,3	44,2	29,2	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Rvv	CL 1	148	80	12	0	38,3
	CL2	33	196	11	0	18,3
	CL3	2	12	183	43	23,8
	CL4	9	4	89	138	42,5
Erro de inclusão		22,9	32,9	38,0	23,8	

Anexo 9. Matriz de confusão para os índices em função das classes de nitrogênio na F₁, ciclo 3.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Rvv	CL 1	144	70	25	1	40,0
	CL2	32	181	25	2	24,6
	CL3	7	22	158	53	34,2
	CL4	8	9	75	148	38,3
Erro de inclusão		24,6	35,8	44,2	27,5	27,5
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern, Vn e Rvv	CL 1	147	80	12	1	38,8
	CL2	33	196	11	0	18,3
	CL3	2	13	182	43	24,2
	CL4	9	4	89	138	42,5
Erro de inclusão		23,0	33,1	38,1	24,2	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern, Vn e Rvv	CL 1	145	81	13	1	39,6
	CL2	33	196	11	0	18,3
	CL3	2	14	179	45	25,4
	CL4	11	4	91	134	44,2
Erro de inclusão		24,1	33,6	39,1	25,6	

Anexo 10. Matriz de confusão para os índices em função das classes de nitrogênio na F₂, ciclo 1.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd	CL 1	156	52	27	5	35,0
	CL2	148	44	45	3	81,7
	CL3	44	53	91	52	62,1
	CL4	2	4	45	189	21,3
Erro de inclusão		55,4	71,2	56,3	24,1	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern	CL 1	22	72	75	71	90,8
	CL2	12	144	47	37	40,0
	CL3	20	81	95	44	60,4
	CL4	28	19	73	120	50,0
Erro de inclusão		73,2	54,4	67,2	55,9	

Anexo 11. Matriz de confusão para os índices em função das classes de nitrogênio na F₂, ciclo 1.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn	CL 1	156	52	27	5	35,0
	CL2	149	43	45	3	82,1
	CL3	44	53	91	52	62,1
	CL4	2	4	45	189	21,3
Erro de inclusão		55,6	71,7	56,3	24,1	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Rvv	CL 1	141	92	6	1	41,3
	CL2	55	125	42	18	47,9
	CL3	27	76	54	83	77,5
	CL4	10	24	25	181	24,6
Erro de inclusão		39,5	60,6	57,5	36,0	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vern	CL 1	141	80	14	5	41,3
	CL2	55	138	43	4	42,5
	CL3	37	70	81	52	66,3
	CL4	5	3	46	186	22,5
Erro de inclusão		40,8	52,6	56,0	24,7	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vn	CL 1	148	60	28	4	38,3
	CL2	154	37	46	3	84,6
	CL3	54	41	92	53	61,7
	CL4	3	4	46	187	22,1
Erro de inclusão		58,8	73,9	56,6	24,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Rvv	CL 1	140	81	14	5	41,7
	CL2	54	139	43	4	42,1
	CL3	33	72	83	52	65,4
	CL4	5	3	47	185	22,9
Erro de inclusão		39,7	52,9	55,6	24,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Vn	CL 1	141	80	14	5	41,3
	CL2	55	138	43	4	42,5
	CL3	37	70	81	52	66,3
	CL4	5	3	46	186	22,5
Erro de inclusão		40,8	52,6	56,0	24,7	

Anexo 12. Matriz de confusão para os índices em função das classes de nitrogênio na F₂, ciclo 1.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Rvv	CL 1	140	81	15	4	41,7
	CL2	54	139	43	4	42,1
	CL3	34	71	82	53	65,8
	CL4	5	3	49	183	23,8
Erro de inclusão		39,9	52,7	56,6	25,0	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn e Rvv	CL 1	140	81	14	5	41,7
	CL2	54	139	43	4	42,1
	CL3	33	72	83	52	65,4
	CL4	5	3	47	185	22,9
Erro de inclusão		39,7	52,9	55,6	24,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Vn	CL 1	144	76	14	6	40,0
	CL2	57	137	43	3	42,9
	CL3	37	67	86	50	64,2
	CL4	5	5	47	183	23,8
Erro de inclusão		40,7	51,9	54,7	24,4	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Rvv	CL 1	121	106	9	4	49,6
	CL2	46	160	32	2	33,3
	CL3	25	103	63	49	73,8
	CL4	8	13	46	173	27,9
Erro de inclusão		39,5	58,1	58,0	24,1	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vn, Rvv	CL 1	138	81	15	6	42,5
	CL2	54	139	43	4	42,1
	CL3	34	70	86	50	64,2
	CL4	5	6	46	183	23,8
Erro de inclusão		40,3	53,0	54,7	24,7	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern, Vn e Rvv	CL 1	120	107	9	4	50,0
	CL2	48	157	33	2	34,6
	CL3	23	105	63	49	73,8
	CL4	8	13	45	174	27,5
Erro de inclusão		39,7	58,9	58,0	24,0	

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern, Vn e Rvv	CL 1	118	112	7	3	50,8
	CL2	48	153	36	3	36,3
	CL3	23	102	66	49	72,5
	CL4	8	12	45	175	27,1
Erro de inclusão		40,1	59,6	57,1	23,9	

Anexo 13. Matriz de confusão para os índices em função das classes de nitrogênio na F₂, ciclo 2.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd	CL 1	171	56	13	0	28,8
	CL2	147	72	20	1	70,0
	CL3	1	14	131	94	45,4
	CL4	0	3	61	176	26,7
Erro de inclusão		46,4	50,3	41,8	35,1	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern	CL 1	79	134	22	5	67,1
	CL2	75	139	24	2	42,1
	CL3	27	7	130	76	45,8
	CL4	17	4	102	117	51,3
Erro de inclusão		60,1	51,1	53,2	41,5	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn	CL 1	171	56	13	0	28,8
	CL2	147	72	20	1	70,0
	CL3	1	14	131	94	45,4
	CL4	0	3	62	175	27,1
Erro de inclusão		46,4	50,3	42,0	35,2	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Rvv	CL 1	121	72	38	9	49,6
	CL2	93	81	45	21	66,3
	CL3	9	31	100	100	58,3
	CL4	5	19	59	157	34,6
Erro de inclusão		46,9	60,1	58,7	45,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vern	CL 1	108	120	12	0	55,0
	CL2	90	128	21	1	46,7
	CL3	3	13	137	87	42,9
	CL4	3	2	57	178	25,8
Erro de inclusão		47,1	51,3	39,6	33,1	

Anexo 14. Matriz de confusão para os índices em função das classes de nitrogênio na F₂, ciclo 2.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vn	CL 1	163	64	13	0	32,1
	CL2	139	78	22	1	67,5
	CL3	1	14	131	94	45,4
	CL4	0	3	63	174	27,5
Erro de inclusão		46,2	50,9	42,8	35,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Rvv	CL 1	100	129	11	0	58,3
	CL2	81	137	21	1	42,9
	CL3	3	13	132	92	45,0
	CL4	3	1	62	174	27,5
Erro de inclusão		46,5	51,1	41,6	34,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Vn	CL 1	108	120	12	0	55,0
	CL2	90	128	21	1	46,7
	CL3	3	13	137	87	42,9
	CL4	3	2	57	178	25,8
Erro de inclusão		47,1	51,3	39,6	33,1	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Rvv	CL 1	106	121	12	1	55,8
	CL2	82	136	21	1	43,3
	CL3	4	14	134	88	44,2
	CL4	4	3	67	166	30,8
Erro de inclusão		45,9	50,4	42,7	35,2	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn e Rvv	CL 1	100	129	11	0	58,3
	CL2	81	137	21	1	42,9
	CL3	3	13	131	93	45,4
	CL4	3	1	62	174	27,5
Erro de inclusão		46,5	51,1	41,8	35,1	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Vn	CL 1	115	113	12	0	52,1
	CL2	103	115	21	1	52,1
	CL3	4	12	135	89	43,8
	CL4	3	3	59	175	27,1
Erro de inclusão		40,7	48,9	52,7	40,5	

Anexo 15. Matriz de confusão para os índices em função das classes de nitrogênio na F₂, ciclo 2.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Rvv	CL 1	123	106	11	0	48,8
	CL2	108	119	13	0	50,4
	CL3	2	8	214	16	10,8
	CL4	0	0	166	74	69,2
Erro de inclusão		47,2	48,9	47,0	17,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vn, Rvv	CL 1	114	114	12	0	52,5
	CL2	100	118	21	1	50,8
	CL3	5	13	129	93	46,3
	CL4	3	1	61	175	27,1
Erro de inclusão		48,6	52,0	42,2	34,9	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern, Vn e Rvv	CL 1	122	108	10	0	49,2
	CL2	109	118	13	0	50,8
	CL3	2	8	214	16	10,8
	CL4	0	0	166	74	69,2
Erro de inclusão		47,6	49,6	46,9	17,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern, Vn e Rvv	CL 1	123	106	11	0	48,8
	CL2	109	119	12	0	50,4
	CL3	2	8	214	16	10,8
	CL4	0	0	164	76	68,3
Erro de inclusão		47,4	48,9	46,6	17,4	

Anexo 16. Matriz de confusão para os índices em função das classes de nitrogênio na F₂, ciclo 3.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd	CL 1	60	155	25	0	35,0
	CL2	49	160	31	0	81,7
	CL3	0	17	172	51	62,1
	CL4	1	11	77	151	21,3
Erro de inclusão		45,5	53,4	43,6	25,2	

Anexo 17. Matriz de confusão para os índices em função das classes de nitrogênio na F₂, ciclo 3.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern	CL 1	13	111	84	32	94,6
	CL2	7	185	44	4	22,9
	CL3	17	47	130	46	45,8
	CL4	4	28	83	125	47,9
Erro de inclusão		68,3	50,1	61,9	39,6	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn	CL 1	60	155	25	0	75,0
	CL2	49	160	31	0	33,3
	CL3	0	17	172	51	28,3
	CL4	1	11	77	151	37,1
Erro de inclusão		45,5	53,4	43,6	25,2	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Rvv	CL 1	122	91	22	5	49,2
	CL2	44	139	50	7	42,1
	CL3	4	38	95	103	60,4
	CL4	2	26	74	138	42,5
Erro de inclusão		29,1	52,7	60,6	45,5	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vern	CL 1	128	93	17	2	46,7
	CL2	39	172	29	0	28,3
	CL3	9	12	171	48	28,8
	CL4	3	8	74	155	35,4
Erro de inclusão		28,5	39,6	41,2	24,4	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vn	CL 1	66	148	26	0	72,5
	CL2	67	144	29	0	40,0
	CL3	3	14	174	49	27,5
	CL4	3	10	76	151	37,1
Erro de inclusão		52,5	54,4	43,0	24,5	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Rvv	CL 1	125	96	17	2	47,9
	CL2	34	177	29	0	26,3
	CL3	8	12	174	46	27,5
	CL4	5	8	74	153	36,3
Erro de inclusão		27,3	39,6	40,8	23,9	

Anexo 18. Matriz de confusão para os índices em função das classes de nitrogênio na F₂, ciclo 3.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Vn	CL 1	128	93	17	2	46,7
	CL2	39	172	29	0	28,3
	CL3	9	12	171	48	28,8
	CL4	3	8	74	155	35,4
Erro de inclusão		28,5	39,6	41,2	24,4	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Rvv	CL 1	126	95	17	2	47,5
	CL2	36	174	30	0	27,5
	CL3	8	12	172	48	28,3
	CL4	5	8	80	147	38,8
Erro de inclusão		39,9	28,0	39,8	42,5	25,4
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn e Rvv	CL 1	125	96	17	2	47,9
	CL2	34	177	29	0	26,3
	CL3	8	12	174	46	27,5
	CL4	5	8	74	153	36,3
Erro de inclusão		27,3	39,6	40,8	23,9	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Vn	CL 1	127	94	19	0	47,1
	CL2	39	172	29	0	28,3
	CL3	8	12	175	45	27,1
	CL4	5	8	73	154	35,8
Erro de inclusão		29,1	39,9	40,9	22,6	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Rvv	CL 1	117	108	14	1	51,3
	CL2	31	186	20	3	22,5
	CL3	9	12	189	30	21,3
	CL4	2	8	69	161	32,9
Erro de inclusão		26,4	40,8	35,3	17,4	17,4
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vn, Rvv	CL 1	124	96	19	1	48,3
	CL2	34	177	29	0	26,3
	CL3	7	12	179	42	25,4
	CL4	5	8	72	155	35,4
Erro de inclusão		27,1	39,6	40,1	21,7	

Anexo 19. Matriz de confusão para os índices em função das classes de nitrogênio na F₂, ciclo 3.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern, Vn e Rvv	CL 1	118	107	14	1	50,8
	CL 2	32	185	20	3	22,9
	CL 3	9	13	187	31	22,1
	CL 4	2	8	70	160	33,3
Erro de inclusão		26,7	40,9	35,7	17,9	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern, Vn e Rvv	CL 1	116	112	11	1	51,7
	CL 2	32	185	20	3	22,9
	CL 3	8	10	195	27	18,8
	CL 4	2	9	71	158	34,2
Erro de inclusão		26,6	41,5	34,3	16,4	

Anexo 20. Matriz de confusão para os índices em função das classes de potássio na F₁, ciclo 1.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd	CL 1	171	3	39	27	28,8
	CL2	97	10	91	42	95,8
	CL3	61	12	112	55	53,3
	CL4	89	5	89	57	76,3
Erro de inclusão		59,1	66,7	66,2	68,5	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern	CL 1	179	0	33	28	25,4
	CL2	130	0	86	24	100,0
	CL3	66	0	146	28	39,2
	CL4	100	1	106	33	86,3
Erro de inclusão		62,3	100,0	60,6	70,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn	CL 1	171	3	39	27	28,8
	CL2	97	10	91	42	95,8
	CL3	61	12	113	54	52,9
	CL4	90	5	89	56	76,7
Erro de inclusão		59,2	66,7	66,0	68,7	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Rvv	CL 1	32	65	132	11	86,7
	CL2	19	107	107	7	55,4
	CL3	35	75	120	10	50,0
	CL4	30	75	123	12	95,0
Erro de inclusão		72,4	66,8	75,1	70,0	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vern	CL 1	167	26	20	27	30,4
	CL2	103	45	67	25	81,3
	CL3	62	23	126	29	47,5
	CL4	87	33	87	33	86,3
Erro de inclusão		60,1	64,6	58,0	71,1	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vn	CL 1	171	3	35	31	28,8
	CL2	98	8	85	49	96,7
	CL3	58	14	94	74	60,8
	CL4	89	5	74	72	70,0
Erro de inclusão		58,9	73,3	67,4	68,1	

Anexo 21. Matriz de confusão para os índices em função das classes de potássio na F₁, ciclo 1.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Rvv	CL 1	169	26	23	22	29,6
	CL2	98	41	72	29	82,9
	CL3	59	24	130	27	45,8
	CL4	87	30	94	29	87,9
Erro de inclusão		59,1	66,1	59,2	72,9	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Vn	CL 1	167	26	21	26	30,4
	CL2	103	44	67	26	81,7
	CL3	62	23	126	29	47,5
	CL4	87	33	87	33	86,3
Erro de inclusão		60,1	65,1	58,1	71,1	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Rvv	CL 1	167	27	21	25	30,4
	CL2	98	44	67	31	81,7
	CL3	60	24	124	32	48,3
	CL4	85	31	92	32	86,7
Erro de inclusão		59,3	65,1	59,2	73,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn e Rvv	CL 1	169	26	23	22	29,6
	CL2	98	41	72	29	82,9
	CL3	59	24	130	27	45,8
	CL4	87	30	94	29	87,9
Erro de inclusão		59,1	66,1	59,2	72,9	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Vn	CL 1	161	32	15	32	32,9
	CL2	105	36	65	34	85,0
	CL3	57	28	97	58	59,6
	CL4	87	34	69	50	79,2
Erro de inclusão		60,7	72,3	60,6	71,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Rvv	CL 1	166	25	31	18	30,8
	CL2	89	47	73	31	80,4
	CL3	55	18	139	28	42,1
	CL4	84	28	97	31	87,1
Erro de inclusão		57,9	60,2	59,1	71,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vn, Rvv	CL 1	161	32	17	30	32,9
	CL2	94	43	66	37	82,1
	CL3	55	27	102	56	57,5
	CL4	89	30	74	47	80,4
Erro de inclusão		59,6	67,4	60,6	72,4	

Anexo 22. Matriz de confusão para os índices em função das classes de potássio na F₁, ciclo 1.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern, Vn e Rvv	CL 1	165	27	30	18	31,3
	CL2	89	47	73	31	80,4
	CL3	55	18	138	29	42,5
	CL4	84	28	97	31	87,1
Erro de inclusão		58,0	60,8	59,2	71,6	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern, Vn e Rvv	CL 1	160	29	25	26	33,3
	CL2	84	45	67	44	81,3
	CL3	55	20	106	59	55,8
	CL4	86	28	75	51	78,8
Erro de inclusão		58,4	63,1	61,2	71,7	

Anexo 23. Matriz de confusão para os índices em função das classes de potássio na F₁, ciclo 2.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd	CL 1	48	111	44	37	80,0
	CL2	32	132	37	39	45,0
	CL3	3	49	141	47	41,3
	CL4	12	75	107	46	80,8
Erro de inclusão		49,5	64,0	57,1	72,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern	CL 1	92	72	42	34	61,7
	CL2	66	74	51	49	69,2
	CL3	16	40	133	51	44,6
	CL4	24	46	125	45	81,3
Erro de inclusão		53,5	68,1	62,1	74,9	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn	CL 1	49	110	44	37	79,6
	CL2	32	132	37	39	45,0
	CL3	3	49	141	47	41,3
	CL4	12	74	107	47	80,4
Erro de inclusão		49,0	63,8	57,1	72,4	

Anexo 24. Matriz de confusão para os índices em função das classes de potássio na F₁, ciclo 2.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Rvv	CL 1	2	115	101	22	99,2
	CL2	2	156	59	23	35,0
	CL3	15	100	97	28	59,6
	CL4	8	137	72	23	90,4
Erro de inclusão		92,6	69,3	70,5	76,0	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vern	CL 1	81	76	43	40	66,3
	CL2	56	98	29	57	59,2
	CL3	23	29	114	74	52,5
	CL4	23	55	85	77	67,9
Erro de inclusão		55,7	62,0	57,9	69,0	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vn	CL 1	44	113	51	32	81,7
	CL2	32	133	40	35	44,6
	CL3	2	51	140	47	41,7
	CL4	9	78	106	47	80,4
Erro de inclusão		49,4	64,5	58,5	70,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Rvv	CL 1	82	78	44	36	65,8
	CL2	56	98	25	61	59,2
	CL3	20	29	111	80	53,8
	CL4	19	60	88	73	69,6
Erro de inclusão		53,7	63,0	58,6	70,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Vn	CL 1	81	76	43	40	66,3
	CL2	56	98	29	57	59,2
	CL3	23	29	114	74	52,5
	CL4	24	54	85	77	67,9
Erro de inclusão		56,0	61,9	57,9	69,0	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Rvv	CL 1	82	75	46	37	65,8
	CL2	55	101	26	58	57,9
	CL3	24	28	113	75	52,9
	CL4	23	55	88	74	69,2
Erro de inclusão		55,4	61,0	58,6	69,7	

Anexo 25. Matriz de confusão para os índices em função das classes de potássio na F₁, ciclo 2.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn e Rvv	CL 1	82	78	44	36	65,8
	CL2	56	98	25	61	59,2
	CL3	21	29	110	80	54,2
	CL4	19	60	88	73	69,6
Erro de inclusão		53,9	63,0	58,8	70,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Vn	CL 1	75	84	41	40	68,8
	CL2	54	95	29	62	60,4
	CL3	21	31	116	72	51,7
	CL4	22	60	90	68	71,7
Erro de inclusão		56,4	64,8	58,0	71,9	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Rvv	CL 1	70	104	45	21	70,8
	CL2	30	130	47	33	45,8
	CL3	6	40	169	25	29,6
	CL4	16	71	122	31	87,1
Erro de inclusão		42,6	62,3	55,9	71,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vn, Rvv	CL 1	76	85	40	39	68,3
	CL2	56	96	28	60	60,0
	CL3	22	30	114	74	52,5
	CL4	19	61	92	68	71,7
Erro de inclusão		56,1	64,7	58,4	71,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern, Vn e Rvv	CL 1	70	103	46	21	70,8
	CL2	29	130	48	33	45,8
	CL3	6	40	168	26	30,0
	CL4	16	72	122	30	87,5
Erro de inclusão		42,1	62,3	56,3	72,7	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern, Vn e Rvv	CL 1	71	100	48	21	70,4
	CL2	27	134	46	33	44,2
	CL3	7	39	169	25	29,6
	CL4	16	72	113	39	83,8
Erro de inclusão		41,3	61,2	55,1	66,9	

Anexo 26. Matriz de confusão para os índices em função das classes de potássio na F₁, ciclo 3.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd	CL 1	117	88	0	35	51,3
	CL2	89	85	0	66	64,6
	CL3	35	48	12	145	95,0
	CL4	16	63	10	151	37,1
Erro de inclusão		54,5	70,1	45,5	62,0	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern	CL 1	83	90	61	6	65,4
	CL2	43	93	94	10	61,3
	CL3	4	30	131	75	45,4
	CL4	0	34	109	97	59,6
Erro de inclusão		36,2	62,3	66,8	48,4	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn	CL 1	117	88	0	35	51,3
	CL2	89	85	0	66	64,6
	CL3	35	48	12	145	95,0
	CL4	16	63	9	152	36,7
Erro de inclusão		54,5	70,1	42,9	61,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Rvv	CL 1	72	34	133	1	70,0
	CL2	33	29	175	3	87,9
	CL3	41	30	165	4	31,3
	CL4	56	32	148	4	98,3
Erro de inclusão		64,4	76,8	73,4	66,7	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vern	CL 1	105	70	51	14	56,3
	CL2	50	94	69	27	60,8
	CL3	15	27	124	74	48,3
	CL4	5	24	106	105	56,3
Erro de inclusão		40,0	56,3	64,6	52,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vn	CL 1	115	88	1	36	52,1
	CL2	91	84	0	65	65,0
	CL3	36	46	9	149	96,3
	CL4	14	63	12	151	37,1
Erro de inclusão		55,1	70,1	59,1	62,3	

Anexo 27. Matriz de confusão para os índices em função das classes de potássio na F₁, ciclo 3.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Rvv	CL 1	100	72	55	13	58,3
	CL2	50	87	76	27	63,8
	CL3	15	22	129	74	46,3
	CL4	3	20	112	105	56,3
Erro de inclusão		40,5	56,7	65,3	52,1	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Vn	CL 1	103	72	51	14	57,1
	CL2	50	94	69	27	60,8
	CL3	15	27	124	74	48,3
	CL4	5	24	106	105	56,3
Erro de inclusão		40,5	56,7	64,6	52,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Rvv	CL 1	102	75	51	12	57,5
	CL2	51	89	72	28	62,9
	CL3	15	29	121	75	49,6
	CL4	5	25	105	105	56,3
Erro de inclusão		41,0	59,2	65,3	52,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn e Rvv	CL 1	100	72	55	13	58,3
	CL2	50	87	76	27	63,8
	CL3	15	22	129	74	46,3
	CL4	3	20	112	105	56,3
Erro de inclusão		40,5	56,7	65,3	52,1	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Vn	CL 1	101	77	50	12	57,9
	CL2	51	98	65	26	59,2
	CL3	14	30	131	65	45,4
	CL4	3	29	102	106	55,8
Erro de inclusão		40,2	58,1	62,4	49,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Rvv	CL 1	102	26	93	19	57,5
	CL2	58	22	136	24	90,8
	CL3	11	0	180	49	25,0
	CL4	2	6	139	93	61,3
Erro de inclusão		41,0	59,3	67,2	49,7	

Anexo 28. Matriz de confusão para os índices em função das classes de potássio na F₁, ciclo 3.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Rvv	CL 1	97	75	57	11	59,6
	CL2	50	95	69	26	60,4
	CL3	14	27	134	65	44,2
	CL4	2	29	105	104	56,7
Erro de inclusão		40,5	58,0	63,3	49,5	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern, Vn e Rvv	CL 1	102	25	94	19	57,5
	CL2	59	22	133	26	90,8
	CL3	11	0	181	48	24,6
	CL4	3	5	140	92	61,7
Erro de inclusão		41,7	57,7	67,0	50,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern, Vn e Rvv	CL 1	99	28	96	17	58,8
	CL2	57	23	128	32	90,4
	CL3	11	0	177	52	26,3
	CL4	3	4	138	95	60,4
Erro de inclusão		41,8	58,2	67,2	51,5	

Anexo 29. Matriz de confusão para os índices em função das classes de potássio na F₂, ciclo 1.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd	CL 1	91	91	37	21	62,1
	CL2	51	110	28	51	54,2
	CL3	11	65	101	63	57,9
	CL4	25	96	74	45	81,3
Erro de inclusão		48,9	69,6	57,9	75,0	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern	CL 1	71	0	64	105	70,4
	CL2	62	0	83	95	100,0
	CL3	27	0	127	86	47,1
	CL4	51	0	74	115	52,1
Erro de inclusão		66,4	0	63,5	71,3	71,3

Anexo 30. Matriz de confusão para os índices em função das classes de potássio na F₂, ciclo 1.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn	CL 1	91	91	37	21	62,1
	CL2	51	110	28	51	54,2
	CL3	11	65	100	64	58,3
	CL4	25	96	73	46	80,8
Erro de inclusão		48,9	69,6	58,0	74,7	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Rvv	CL 1	87	102	9	42	63,8
	CL2	47	124	2	67	48,3
	CL3	29	111	6	94	97,5
	CL4	21	98	12	109	54,6
Erro de inclusão		52,7	71,5	79,3	65,1	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vern	CL 1	93	90	31	26	61,3
	CL2	42	144	23	31	40,0
	CL3	10	82	83	65	65,4
	CL4	14	100	63	63	73,8
Erro de inclusão		41,5	65,4	58,5	65,9	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vn	CL 1	97	84	41	18	59,6
	CL2	52	109	29	50	54,6
	CL3	11	63	101	65	57,9
	CL4	26	95	74	45	81,3
Erro de inclusão		47,8	68,9	58,8	74,7	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Rvv	CL 1	96	90	33	21	60,0
	CL2	42	136	29	33	43,3
	CL3	13	81	88	58	63,3
	CL4	15	101	64	60	75,0
Erro de inclusão		42,2	66,7	58,9	65,1	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Vn	CL 1	91	92	31	26	62,1
	CL2	42	145	23	30	39,6
	CL3	10	82	83	65	65,4
	CL4	14	100	63	63	73,8
Erro de inclusão		42,0	65,4	58,5	65,8	

Anexo 31. Matriz de confusão para os índices em função das classes de potássio na F₂, ciclo 1.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Rvv	CL 1	97	88	33	22	59,6
	CL2	40	131	31	38	45,4
	CL3	13	84	86	57	64,2
	CL4	16	103	59	62	74,2
Erro de inclusão		41,6	67,7	58,9	65,4	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn e Rvv	CL 1	96	90	33	21	60,0
	CL2	43	136	28	33	43,3
	CL3	13	80	88	59	63,3
	CL4	15	100	65	60	75,0
Erro de inclusão		42,5	66,5	58,9	65,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Vn	CL 1	93	92	34	21	61,3
	CL2	46	141	20	33	41,3
	CL3	10	77	81	72	66,3
	CL4	15	100	65	60	75,0
Erro de inclusão		43,3	65,6	59,5	67,7	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Rvv	CL 1	143	29	40	28	40,4
	CL2	79	70	29	62	70,8
	CL3	36	21	102	81	57,5
	CL4	44	34	63	99	58,8
Erro de inclusão		52,6	54,5	56,4	63,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vn, Rvv	CL 1	93	91	37	19	61,3
	CL2	45	134	28	33	44,2
	CL3	15	77	84	64	65,0
	CL4	17	100	63	60	75,0
Erro de inclusão		45,3	66,7	60,4	65,9	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern, Vn e Rvv	CL 1	142	29	40	29	40,8
	CL2	79	70	29	62	70,8
	CL3	36	21	101	82	57,9
	CL4	44	35	63	98	59,2
Erro de inclusão		52,8	54,8	56,7	63,8	

Anexo 32. Matriz de confusão para os índices em função das classes de potássio na F₂, ciclo 1.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern, Vn e Rvv	CL 1	143	31	43	23	40,4
	CL2	81	66	30	63	72,5
	CL3	39	20	102	79	57,5
	CL4	50	34	68	88	63,3
Erro de inclusão		54,3	56,3	58,0	65,2	

Anexo 33. Matriz de confusão para os índices em função das classes de potássio na F₂, ciclo 2.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd	CL 1	55	118	58	9	77,1
	CL2	48	131	53	8	45,4
	CL3	4	61	114	61	52,5
	CL4	5	64	100	71	70,4
Erro de inclusão		50,9	65,0	64,9	52,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern	CL 1	90	80	51	19	62,5
	CL2	55	107	51	27	55,4
	CL3	9	52	56	123	76,7
	CL4	9	42	66	123	48,8
Erro de inclusão		44,8	61,9	75,0	57,9	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn	CL 1	54	119	58	9	77,5
	CL2	48	132	52	8	45,0
	CL3	4	61	114	61	52,5
	CL4	5	65	99	71	70,4
Erro de inclusão		51,4	65,0	64,7	52,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Rvv	CL 1	0	115	60	65	100,0
	CL2	3	157	27	53	34,6
	CL3	20	115	35	70	85,4
	CL4	2	108	61	69	71,3
Erro de inclusão		100,0	68,3	80,9	73,2	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vern	CL 1	88	90	42	20	63,3
	CL2	63	113	34	30	52,9
	CL3	15	47	60	118	75,0
	CL4	9	48	78	105	56,3
Erro de inclusão		49,7	62,1	72,0	61,5	

Anexo 34. Matriz de confusão para os índices em função das classes de potássio na F₂, ciclo 2.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vn	CL 1	56	119	55	10	76,7
	CL2	58	121	53	8	49,6
	CL3	7	60	107	66	55,4
	CL4	8	61	104	67	72,1
Erro de inclusão		56,6	66,5	66,5	55,6	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Rvv	CL 1	86	94	46	14	64,2
	CL2	56	121	48	15	49,6
	CL3	17	50	76	97	68,3
	CL4	8	48	88	96	60,0
Erro de inclusão		48,5	61,3	70,5	56,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Vn	CL 1	88	90	42	20	63,3
	CL2	63	113	34	30	52,9
	CL3	15	47	61	117	74,6
	CL4	9	47	78	106	55,8
Erro de inclusão		49,7	62,0	71,6	61,2	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Rvv	CL 1	87	89	46	18	63,8
	CL2	58	115	41	26	52,1
	CL3	20	47	57	116	76,3
	CL4	9	45	83	103	57,1
Erro de inclusão		50,0	61,1	74,9	60,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn e Rvv	CL 1	86	94	46	14	64,2
	CL2	57	120	48	15	50,0
	CL3	17	50	76	97	68,3
	CL4	8	48	88	96	60,0
Erro de inclusão		48,8	61,5	70,5	56,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Vn	CL 1	85	92	43	20	64,6
	CL2	63	115	35	27	52,1
	CL3	19	41	69	111	71,3
	CL4	8	48	74	110	54,2
Erro de inclusão		51,4	61,1	68,8	59,0	

Anexo 35. Matriz de confusão para os índices em função das classes de potássio na F₂, ciclo 2.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Rvv	CL 1	84	85	51	20	65,0
	CL2	26	138	57	19	42,5
	CL3	5	30	167	38	30,4
	CL4	13	35	132	60	75,0
Erro de inclusão		34,4	52,1	59,0	56,2	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vn, Rvv	CL 1	83	92	49	16	65,4
	CL2	54	123	38	25	48,8
	CL3	18	41	75	106	68,8
	CL4	9	48	80	103	57,1
Erro de inclusão		49,4	59,5	69,0	58,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern, Vn e Rvv	CL 1	85	85	51	19	64,6
	CL2	27	138	55	20	42,5
	CL3	5	30	169	36	29,6
	CL4	13	36	129	62	74,2
Erro de inclusão		34,6	52,2	58,2	54,7	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern, Vn e Rvv	CL 1	84	89	48	19	65,0
	CL2	32	127	61	20	47,1
	CL3	4	28	165	43	31,3
	CL4	14	36	132	58	75,8
Erro de inclusão		37,3	54,6	59,4	58,6	

Anexo 36. Matriz de confusão para os índices em função das classes de potássio na F₂, ciclo 3.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd	CL 1	175	21	19	25	27,1
	CL2	124	28	65	23	88,3
	CL3	33	11	172	24	28,3
	CL4	68	18	130	24	90,0
Erro de inclusão		56,3	64,1	55,4	75,0	56,3

Anexo 37. Matriz de confusão para os índices em função das classes de potássio na F₂, ciclo 3.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern	CL 1	89	101	50	0	62,9
	CL2	67	106	67	0	55,8
	CL3	2	34	187	17	22,1
	CL4	14	20	197	9	96,3
Erro de inclusão		48,3	59,4	62,7	65,4	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn	CL 1	176	20	19	25	26,7
	CL2	124	28	65	23	88,3
	CL3	33	11	172	24	28,3
	CL4	68	18	130	24	90,0
Erro de inclusão		56,1	63,6	55,4	75,0	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Rvv	CL 1	46	44	117	33	80,8
	CL2	26	78	115	21	67,5
	CL3	11	50	148	31	38,3
	CL4	18	17	151	54	77,5
Erro de inclusão		54,5	58,7	72,1	61,2	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vern	CL 1	154	49	26	11	35,8
	CL2	113	60	60	7	75,0
	CL3	15	23	180	22	25,0
	CL4	37	12	155	36	85,0
Erro de inclusão		54,5	58,7	72,1	61,2	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vn	CL 1	174	24	16	26	27,5
	CL2	123	28	62	27	88,3
	CL3	32	15	173	20	27,9
	CL4	64	24	125	27	88,8
Erro de inclusão		55,7	69,2	54,0	73,0	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Rvv	CL 1	155	47	34	4	35,4
	CL2	114	57	67	2	76,3
	CL3	20	19	188	13	21,7
	CL4	41	8	167	24	90,0
Erro de inclusão		53,0	56,5	58,8	44,2	

Anexo 38. Matriz de confusão para os índices em função das classes de potássio na F₂, ciclo 3.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Vn	CL 1	154	49	26	11	35,8
	CL2	113	60	60	7	75,0
	CL3	15	23	180	22	25,0
	CL4	37	12	155	36	85,0
Erro de inclusão		51,7	58,3	57,2	52,6	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Rvv	CL 1	158	46	28	8	34,2
	CL2	114	53	60	13	77,9
	CL3	17	20	183	20	23,8
	CL4	37	6	158	39	83,8
Erro de inclusão		51,5	57,6	57,3	51,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn e Rvv	CL 1	154	48	34	4	35,8
	CL2	114	57	67	2	76,3
	CL3	20	19	188	13	21,7
	CL4	41	8	167	24	90,0
Erro de inclusão		53,2	56,8	58,8	44,2	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Vn	CL 1	154	47	25	14	35,8
	CL2	117	52	62	9	78,3
	CL3	21	16	177	26	26,3
	CL4	34	14	159	33	86,3
Erro de inclusão		52,8	59,7	58,2	59,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Rvv	CL 1	99	89	47	5	58,8
	CL2	81	73	81	5	69,6
	CL3	8	17	213	2	11,3
	CL4	11	17	197	15	93,8
Erro de inclusão		50,3	62,8	60,4	44,4	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vn, Rvv	CL 1	155	48	32	5	35,4
	CL2	118	54	64	4	77,5
	CL3	24	13	182	21	24,2
	CL4	35	11	168	26	89,2
Erro de inclusão		53,3	57,1	59,2	53,6	

Anexo 39. Matriz de confusão para os índices em função das classes de potássio na F₂, ciclo 3.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern, Vn e Rvv	CL 1	99	89	47	5	58,8
	CL 2	79	75	81	5	68,8
	CL 3	8	18	212	2	11,7
	CL 4	10	17	197	16	93,3
Erro de inclusão		49,5	62,3	60,5	42,9	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern, Vn e Rvv	CL 1	94	93	48	5	60,8
	CL 2	78	76	81	5	68,3
	CL 3	8	16	214	2	10,8
	CL 4	10	18	196	16	93,3
Erro de inclusão		50,5	62,6	60,3	42,9	

Anexo 40. Matriz de confusão para os índices em função das classes de cálculo na F₁, ciclo 1.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd	CL 1	0	126	27	87	100,0
	CL2	6	152	17	65	36,7
	CL3	18	140	3	79	98,8
	CL4	7	124	9	100	58,3
Erro de inclusão		100,0	72,0	94,6	69,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern	CL 1	42	111	23	64	82,5
	CL2	52	115	35	38	52,1
	CL3	41	132	27	40	88,8
	CL4	52	109	24	55	77,1
Erro de inclusão		77,5	75,4	75,2	72,1	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn	CL 1	0	126	27	87	100,0
	CL2	6	152	17	65	36,7
	CL3	18	140	3	79	98,8
	CL4	7	123	10	100	58,3
Erro de inclusão		100,0	71,9	94,7	69,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Rvv	CL 1	65	29	37	109	72,9
	CL2	60	31	44	105	87,1
	CL3	46	31	34	129	85,8
	CL4	42	46	63	89	62,9
Erro de inclusão		69,5	77,4	80,9	79,4	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vern	CL 1	49	90	30	71	79,6
	CL2	46	106	33	55	55,8
	CL3	28	121	26	65	89,2
	CL4	29	98	27	86	64,2
Erro de inclusão		67,8	74,5	77,6	69,0	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vn	CL 1	10	120	37	73	95,8
	CL2	19	142	25	54	40,8
	CL3	19	126	24	71	90,0
	CL4	20	110	27	83	65,4
Erro de inclusão		85,3	71,5	78,8	70,5	

Anexo 41. Matriz de confusão para os índices em função das classes de cálculo na F1, ciclo 1.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Rvv	CL 1	10	120	37	73	95,8
	CL2	19	142	25	54	40,8
	CL3	19	126	24	71	90,0
	CL4	20	110	27	83	65,4
Erro de inclusão		85,3	71,5	78,8	70,5	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Vn	CL 1	53	88	28	71	77,9
	CL2	51	107	29	53	55,4
	CL3	29	117	25	69	89,6
	CL4	36	96	26	82	65,8
Erro de inclusão		68,6	73,8	76,9	70,2	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Rvv	CL 1	49	90	30	71	79,6
	CL2	46	106	33	55	55,8
	CL3	28	120	26	66	89,2
	CL4	30	98	27	85	64,6
Erro de inclusão		68,0	74,4	77,6	69,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn e Rvv	CL 1	53	88	28	71	77,9
	CL2	51	107	29	53	55,4
	CL3	29	117	25	69	89,6
	CL4	36	96	26	82	65,8
Erro de inclusão		68,6	73,8	76,9	70,2	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Vn	CL 1	49	85	46	60	79,6
	CL2	45	97	47	51	59,6
	CL3	34	107	35	64	85,4
	CL4	31	83	54	72	70,0
Erro de inclusão		69,2	73,9	80,8	70,9	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Rvv	CL 1	57	73	21	89	76,3
	CL2	46	89	36	69	62,9
	CL3	45	85	32	78	86,7
	CL4	44	59	37	100	58,3
Erro de inclusão		70,3	70,9	74,6	70,2	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vn, Rvv	CL 1	50	86	44	60	79,2
	CL2	48	102	39	51	57,5
	CL3	35	99	39	67	83,8
	CL4	34	86	50	70	70,8
Erro de inclusão		70,1	72,7	77,3	71,8	

Anexo 42. Matriz de confusão para os índices em função das classes de cálculo na F₁, ciclo 1.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern, Vn e Rvv	CL 1	58	73	20	89	75,8
	CL2	46	87	37	70	63,8
	CL3	45	83	32	80	86,7
	CL4	44	58	37	101	57,9
Erro de inclusão		69,9	71,1	74,6	70,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern, Vn e Rvv	CL 1	54	65	25	96	77,5
	CL2	46	86	28	80	64,2
	CL3	39	85	26	90	89,2
	CL4	44	50	37	109	54,6
Erro de inclusão		70,5	69,9	77,6	70,9	

Anexo 43. Matriz de confusão para os índices em função das classes de cálculo na F₁, ciclo 2.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd	CL 1	47	0	100	93	80,4
	CL2	38	0	101	101	100,0
	CL3	41	0	105	94	56,3
	CL4	35	0	98	107	55,4
Erro de inclusão		70,8	0	74,0	72,9	72,9
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern	CL 1	86	41	113	0	64,2
	CL2	54	54	132	0	77,5
	CL3	54	52	132	2	45,0
	CL4	55	51	134	0	100,0
Erro de inclusão		65,5	72,7	74,2	100,0	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn	CL 1	47	0	100	93	80,4
	CL2	38	0	101	101	100,0
	CL3	41	0	105	94	56,3
	CL4	35	0	98	107	55,4
Erro de inclusão		70,8	0,0	74,0	72,9	

Anexo 44. Matriz de confusão para os índices em função das classes de cálculo na F1, ciclo 2.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Rvv	CL 1	58	16	45	121	75,8
	CL2	46	26	38	130	89,2
	CL3	50	17	40	133	83,3
	CL4	29	21	38	152	36,7
Erro de inclusão		68,3	67,5	75,2	71,6	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vern	CL 1	79	23	44	94	67,1
	CL2	47	39	48	106	83,8
	CL3	53	32	47	108	80,4
	CL4	41	32	39	128	46,7
Erro de inclusão		64,1	69,0	73,6	70,6	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vn	CL 1	49	0	113	78	79,6
	CL2	40	0	113	87	100,0
	CL3	44	1	125	70	47,9
	CL4	43	0	121	76	68,3
Erro de inclusão		72,2	100,0	73,5	75,6	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Rvv	CL 1	72	22	46	100	70,0
	CL2	47	40	46	107	83,3
	CL3	52	35	42	111	82,5
	CL4	41	31	37	131	45,4
Erro de inclusão		66,0	68,8	75,4	70,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Vn	CL 1	79	23	44	94	67,1
	CL2	47	39	48	106	83,8
	CL3	53	33	47	107	80,4
	CL4	41	32	39	128	46,7
Erro de inclusão		64,1	69,3	73,6	70,6	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Rvv	CL 1	76	23	44	97	68,3
	CL2	47	41	46	106	82,9
	CL3	53	34	45	108	81,3
	CL4	41	33	38	128	46,7
Erro de inclusão		65,0	68,7	74,0	70,8	

Anexo 45. Matriz de confusão para os índices em função das classes de cálculo na F1, ciclo 2.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn e Rvv	CL 1	72	22	46	100	70,0
	CL2	47	40	46	107	83,3
	CL3	52	35	42	111	82,5
	CL4	41	33	37	129	46,3
Erro de inclusão		66,0	69,2	75,4	71,1	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Vn	CL 1	76	24	51	89	68,3
	CL2	49	40	49	102	83,3
	CL3	54	30	48	108	80,0
	CL4	41	33	49	117	51,3
Erro de inclusão		65,5	68,5	75,6	71,9	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Rvv	CL 1	59	13	86	82	75,4
	CL2	34	23	100	83	90,4
	CL3	41	21	107	71	55,4
	CL4	29	28	100	83	65,4
Erro de inclusão		63,8	72,9	72,8	74,0	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vn, Rvv	CL 1	74	25	49	92	69,2
	CL2	47	43	48	102	82,1
	CL3	56	32	40	112	83,3
	CL4	40	32	45	123	48,8
Erro de inclusão		65,9	67,4	78,0	71,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern, Vn e Rvv	CL 1	58	13	87	82	75,8
	CL2	36	22	98	84	90,8
	CL3	41	20	106	73	55,8
	CL4	30	29	100	81	66,3
Erro de inclusão		64,8	73,8	72,9	74,7	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern, Vn e Rvv	CL 1	60	14	93	73	75,0
	CL2	36	20	106	78	91,7
	CL3	38	20	121	61	49,6
	CL4	31	25	111	73	69,6
Erro de inclusão		63,6	74,7	71,9	74,4	

Anexo 46. Matriz de confusão para os índices em função das classes de cálculo na F₁, ciclo 3.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd	CL 1	0	125	12	103	100,0
	CL2	1	142	2	95	40,8
	CL3	0	100	19	121	92,1
	CL4	0	95	16	129	46,3
Erro de inclusão		100,0	69,3	61,2	71,2	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern	CL 1	22	38	145	35	90,8
	CL2	18	57	132	33	76,3
	CL3	19	63	133	25	44,6
	CL4	37	42	125	36	85,0
Erro de inclusão		77,1	71,5	75,1	72,1	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn	CL 1	0	125	12	103	100,0
	CL2	1	143	2	94	40,4
	CL3	0	100	19	121	92,1
	CL4	0	93	16	131	45,4
Erro de inclusão		100,0	69,0	61,2	70,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Rvv	CL 1	15	150	52	23	93,8
	CL2	16	156	55	13	35,0
	CL3	5	99	109	27	54,6
	CL4	8	104	92	36	85,0
Erro de inclusão		65,9	69,4	64,6	63,6	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vern	CL 1	23	124	60	33	90,4
	CL2	16	138	56	30	42,5
	CL3	4	94	114	28	52,5
	CL4	17	78	92	53	77,9
Erro de inclusão		61,7	68,2	64,6	63,2	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vn	CL 1	23	111	13	93	90,4
	CL2	30	120	5	85	50,0
	CL3	29	80	23	108	90,4
	CL4	18	79	17	126	47,5
Erro de inclusão		77,0	69,2	60,3	69,4	

Anexo 47. Matriz de confusão para os índices em função das classes de cálculo na F₁, ciclo 3.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Rvv	CL 1	14	131	63	32	94,2
	CL2	15	138	61	26	42,5
	CL3	5	97	112	26	53,3
	CL4	14	80	95	51	78,8
Erro de inclusão		70,8	69,1	66,2	62,2	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Vn	CL 1	23	124	60	33	90,4
	CL2	16	138	56	30	42,5
	CL3	4	95	113	28	52,9
	CL4	17	78	92	53	77,9
Erro de inclusão		61,7	68,3	64,8	63,2	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Rvv	CL 1	15	127	62	36	37,5
	CL2	13	139	57	31	24,2
	CL3	3	93	117	27	34,2
	CL4	14	77	96	53	37,9
Erro de inclusão		66,7	68,1	64,8	63,9	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn e Rvv	CL 1	14	131	63	32	94,2
	CL2	15	138	61	26	42,5
	CL3	5	97	112	26	53,3
	CL4	14	80	95	51	78,8
Erro de inclusão		70,8	69,1	66,2	62,2	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Vn	CL 1	20	120	66	34	91,7
	CL2	18	131	60	31	45,4
	CL3	9	90	112	29	53,3
	CL4	17	74	97	52	78,3
Erro de inclusão		68,8	68,4	66,6	64,4	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Rvv	CL 1	9	144	73	14	96,3
	CL2	6	142	86	6	40,8
	CL3	2	86	144	8	40,0
	CL4	12	77	134	17	92,9
Erro de inclusão		69,0	68,4	67,0	62,2	

Anexo 48. Matriz de confusão para os índices em função das classes de cálculo na F₁, ciclo 3.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Rvv	CL 1	11	128	67	34	95,4
	CL2	13	135	63	29	43,8
	CL3	7	90	114	29	52,5
	CL4	15	77	100	48	80,0
Erro de inclusão		76,1	68,6	66,9	65,7	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern, Vn e Rvv	CL 1	10	147	69	14	38,8
	CL2	6	142	86	6	18,3
	CL3	2	88	143	7	24,2
	CL4	12	76	135	17	42,5
Erro de inclusão		66,7	68,7	67,0	61,4	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern, Vn e Rvv	CL 1	9	141	75	15	96,3
	CL2	6	138	88	8	42,5
	CL3	2	84	146	8	39,2
	CL4	11	80	131	18	92,5
Erro de inclusão		67,9	68,8	66,8	63,3	

Anexo 49. Matriz de confusão para os índices em função das classes de cálculo na F₂, ciclo 1.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd	CL 1	12	7	78	143	95,0
	CL2	11	7	83	139	97,1
	CL3	2	7	140	91	41,7
	CL4	13	10	61	156	35,0
Erro de inclusão		68,4	77,4	61,3	70,5	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern	CL 1	83	9	37	111	65,4
	CL2	67	14	64	95	94,2
	CL3	18	15	154	53	35,8
	CL4	72	15	45	108	55,0
Erro de inclusão		65,4	73,6	48,7	70,6	

Anexo 50. Matriz de confusão para os índices em função das classes de cálcio na F₂, ciclo 1.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn	CL 1	12	7	78	143	95,0
	CL2	11	8	83	138	96,7
	CL3	2	8	139	91	42,1
	CL4	13	11	60	156	35,0
Erro de inclusão		68,4	76,5	61,4	70,5	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Rvv	CL 1	87	0	68	85	63,8
	CL2	59	0	84	97	100,0
	CL3	20	0	153	67	36,3
	CL4	42	0	79	119	50,4
Erro de inclusão		58,2	#DIV/0!	60,2	67,7	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vern	CL 1	90	15	30	105	62,5
	CL2	59	13	63	105	94,6
	CL3	15	12	151	62	37,1
	CL4	49	7	52	132	45,0
Erro de inclusão		57,7	72,3	49,0	67,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vn	CL 1	56	14	76	94	76,7
	CL2	46	20	78	96	91,7
	CL3	27	19	133	61	44,6
	CL4	47	28	57	108	55,0
Erro de inclusão		68,2	75,3	61,3	69,9	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Rvv	CL 1	82	19	32	107	65,8
	CL2	53	13	63	111	94,6
	CL3	13	15	153	59	36,3
	CL4	45	5	52	138	42,5
Erro de inclusão		57,5	75,0	49,0	66,7	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Vn	CL 1	90	15	30	105	62,5
	CL2	59	13	63	105	94,6
	CL3	15	12	151	62	37,1
	CL4	49	7	52	132	45,0
Erro de inclusão		57,7	72,3	49,0	67,3	

Anexo 51. Matriz de confusão para os índices em função das classes de cálcio na F₂, ciclo 1.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Rvv	CL 1	85	15	32	108	64,6
	CL2	58	10	63	109	95,8
	CL3	15	14	153	58	36,3
	CL4	48	5	51	136	43,3
Erro de inclusão		58,7	77,3	48,8	66,9	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn e Rvv	CL 1	82	19	32	107	65,8
	CL2	53	14	63	110	94,2
	CL3	13	15	153	59	36,3
	CL4	45	5	52	138	42,5
Erro de inclusão		57,5	73,6	49,0	66,7	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Vn	CL 1	102	17	28	93	57,5
	CL2	65	10	62	103	95,8
	CL3	15	16	149	60	37,9
	CL4	56	7	50	127	47,1
Erro de inclusão		57,1	80,0	48,4	66,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Rvv	CL 1	106	33	31	70	55,8
	CL2	74	24	54	88	90,0
	CL3	20	26	149	45	37,9
	CL4	59	28	44	109	54,6
Erro de inclusão		59,1	78,4	46,4	65,1	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vn, Rvv	CL 1	98	17	30	95	59,2
	CL2	58	14	65	103	94,2
	CL3	14	17	151	58	37,1
	CL4	51	4	53	132	45,0
Erro de inclusão		55,7	73,1	49,5	66,0	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern, Vn e Rvv	CL 1	106	35	31	68	55,8
	CL2	74	25	54	87	89,6
	CL3	20	26	149	45	37,9
	CL4	58	28	44	110	54,2
Erro de inclusão		58,9	78,1	46,4	64,5	

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern, Vn e Rvv	CL 1	118	32	27	63	50,8
	CL2	83	28	54	75	88,3
	CL3	24	27	147	42	38,8
	CL4	68	23	44	105	56,3
Erro de inclusão		59,7	74,5	46,0	63,2	

Anexo 52. Matriz de confusão para os índices em função das classes de cálcio na F₂, ciclo 2.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd	CL 1	0	122	12	106	100,0
	CL2	0	148	5	87	38,3
	CL3	0	105	23	112	90,4
	CL4	0	96	17	127	47,1
Erro de inclusão		#DIV/0!	68,6	59,6	70,6	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern	CL 1	4	35	159	42	98,3
	CL2	9	50	143	38	79,2
	CL3	8	56	138	38	42,5
	CL4	8	32	133	67	72,1
Erro de inclusão		86,2	71,1	75,9	63,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn	CL 1	0	122	12	106	100,0
	CL2	0	148	5	87	38,3
	CL3	0	105	23	112	90,4
	CL4	0	96	17	127	47,1
Erro de inclusão		#DIV/0!	68,6	59,6	70,6	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Rvv	CL 1	11	125	80	24	49,6
	CL2	7	160	62	11	66,3
	CL3	3	87	118	32	58,3
	CL4	10	91	102	37	34,6
Erro de inclusão		64,5	65,4	67,4	64,4	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vern	CL 1	10	112	84	34	95,8
	CL2	9	145	65	21	39,6
	CL3	2	87	125	26	47,9
	CL4	12	72	97	59	75,4
Erro de inclusão		69,7	65,1	66,3	57,9	

Anexo 53. Matriz de confusão para os índices em função das classes de cálculo na F₂, ciclo 2.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vn	CL 1	46	109	14	71	80,8
	CL2	34	129	8	69	46,3
	CL3	35	97	21	87	91,3
	CL4	40	82	22	96	60,0
Erro de inclusão		70,3	69,1	67,7	70,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Rvv	CL 1	7	115	86	32	97,1
	CL2	4	145	71	20	39,6
	CL3	2	86	126	26	47,5
	CL4	14	72	101	53	77,9
Erro de inclusão		74,1	65,3	67,2	59,5	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Vn	CL 1	10	112	84	34	95,8
	CL2	9	145	65	21	39,6
	CL3	2	87	125	26	47,9
	CL4	12	72	97	59	75,4
Erro de inclusão		69,7	65,1	66,3	57,9	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Rvv	CL 1	7	112	85	36	97,1
	CL2	6	142	69	23	40,8
	CL3	1	86	127	26	47,1
	CL4	12	68	100	60	75,0
Erro de inclusão		73,1	65,2	66,7	58,6	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn e Rvv	CL 1	7	115	86	32	97,1
	CL2	4	145	71	20	39,6
	CL3	2	86	126	26	47,5
	CL4	14	72	101	53	77,9
Erro de inclusão		74,1	65,3	67,2	59,5	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Vn	CL 1	29	101	82	28	87,9
	CL2	21	134	62	23	44,2
	CL3	11	87	121	21	49,6
	CL4	17	70	92	61	74,6
Erro de inclusão		40,7	48,9	52,7	40,5	

Anexo 54. Matriz de confusão para os índices em função das classes de cálculo na F₂, ciclo 2.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Rvv	CL 1	4	79	137	20	98,3
	CL2	1	68	159	12	71,7
	CL3	0	51	181	8	24,6
	CL4	7	45	157	31	87,1
Erro de inclusão		66,7	72,0	71,5	56,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vn, Rvv	CL 1	21	107	85	27	91,3
	CL2	17	133	72	18	44,6
	CL3	9	88	125	18	47,9
	CL4	16	70	99	55	77,1
Erro de inclusão		66,7	66,6	67,2	53,4	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern, Vn e Rvv	CL 1	4	79	137	20	98,3
	CL2	1	67	160	12	72,1
	CL3	0	48	184	8	23,3
	CL4	7	45	157	31	87,1
Erro de inclusão		66,7	72,0	71,2	56,3	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern, Vn e Rvv	CL 1	6	79	137	18	97,5
	CL2	4	71	155	10	70,4
	CL3	0	49	183	8	23,8
	CL4	6	45	157	32	86,7
Erro de inclusão		62,5	70,9	71,0	52,9	

Anexo 55. Matriz de confusão para os índices em função das classes de cálculo na F₂, ciclo 3.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd	CL 1	34	124	40	42	85,8
	CL2	25	130	59	26	45,8
	CL3	14	92	66	68	72,5
	CL4	11	54	55	120	50,0
Erro de inclusão		59,5	67,5	70,0	53,1	

Anexo 56. Matriz de confusão para os índices em função das classes de cálculo na F₂, ciclo 3.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern	CL 1	32	158	23	27	86,7
	CL2	23	174	18	25	27,5
	CL3	19	146	22	53	90,8
	CL4	15	116	27	82	65,8
Erro de inclusão		64,0	70,7	75,6	56,1	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn	CL 1	34	124	40	42	85,8
	CL2	25	130	59	26	45,8
	CL3	14	93	65	68	72,9
	CL4	11	54	55	120	50,0
Erro de inclusão		59,5	67,6	70,3	53,1	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Rvv	CL 1	26	172	3	39	49,2
	CL2	32	177	1	30	42,1
	CL3	30	136	4	70	60,4
	CL4	19	117	9	95	42,5
Erro de inclusão		75,7	70,6	76,5	59,4	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vern	CL 1	30	153	20	37	87,5
	CL2	35	160	22	23	33,3
	CL3	21	116	43	60	82,1
	CL4	12	65	48	115	52,1
Erro de inclusão		69,4	67,6	67,7	51,1	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Vn	CL 1	28	129	41	42	88,3
	CL2	31	119	65	25	50,4
	CL3	16	82	74	68	69,2
	CL4	12	54	52	122	49,2
Erro de inclusão		67,8	69,0	68,1	52,5	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd e Rvv	CL 1	35	152	17	36	85,4
	CL2	40	164	18	18	31,7
	CL3	34	117	37	52	84,6
	CL4	14	65	48	113	52,9
Erro de inclusão		71,5	67,1	69,2	48,4	

Anexo 57. Matriz de confusão para os índices em função das classes de cálculo na F₂, ciclo 3.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Vn	CL 1	30	153	20	37	87,5
	CL2	35	160	22	23	33,3
	CL3	21	116	43	60	82,1
	CL4	12	65	48	115	52,1
Erro de inclusão		28,5	69,4	67,6	67,7	51,1
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern e Rvv	CL 1	30	154	20	36	87,5
	CL2	40	160	18	22	33,3
	CL3	24	115	46	55	80,8
	CL4	13	65	44	118	50,8
Erro de inclusão		72,0	67,6	64,1	48,9	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vn e Rvv	CL 1	35	152	17	36	85,4
	CL2	40	164	18	18	31,7
	CL3	34	117	37	52	84,6
	CL4	14	65	48	113	52,9
Erro de inclusão		71,5	67,1	69,2	48,4	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Vn	CL 1	42	139	22	37	82,5
	CL2	39	156	21	24	35,0
	CL3	34	109	39	58	83,8
	CL4	19	60	41	120	50,0
Erro de inclusão		68,7	66,4	68,3	49,8	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern e Rvv	CL 1	47	168	8	17	80,4
	CL2	32	197	4	7	17,9
	CL3	40	159	11	30	95,4
	CL4	62	90	12	76	68,3
Erro de inclusão		74,0	67,9	68,6	41,5	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vn, Rvv	CL 1	44	143	15	38	81,7
	CL2	45	160	14	21	33,3
	CL3	42	109	39	50	83,8
	CL4	21	62	38	119	50,4
Erro de inclusão		71,1	66,2	63,2	47,8	

Anexo 58. Matriz de confusão para os índices em função das classes de cálcio na F₂, ciclo 3.

ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Vern, Vn e Rvv	CL 1	48	167	8	17	50,8
	CL 2	32	196	4	8	22,9
	CL 3	41	159	10	30	22,1
	CL 4	64	90	12	74	33,3
Erro de inclusão		74,1	68,0	70,6	42,6	
ÍNDICE		CL1	CL2	CL3	CL4	Erro de omissão
Evd, Vern, Vn e Rvv	CL 1	52	164	7	17	78,3
	CL 2	38	192	3	7	20,0
	CL 3	46	154	12	28	95,0
	CL 4	55	96	9	80	66,7
Erro de inclusão		72,8	68,3	61,3	39,4	

Anexo 59. Correlações lineares entre as variáveis nitrogênio F₁, nitrogênio F₂, perfilhamento aéreo, perfilhamento basal e altura, considerando-se todos os ciclos de crescimento no experimento de nitrogênio

Variável	Nitrogênio F ₂	Perfilhamento aéreo	Perfilhamento basal	Altura	PMS
Coeficiente de correlação					
Nitrogênio F ₁	0,83***	-0,29 ^{ns}	-0,57**	-0,25 ^{ns}	0,09 ^{ns}
Nitrogênio F ₂		-0,24 ^{ns}	-0,50**	0,06 ^{ns}	0,31 ^{ns}
Perfilhamento aéreo			0,45*	0,35 ^{ns}	0,28 ^{ns}
Perfilhamento basal				0,60*	0,44*
Altura					0,69***

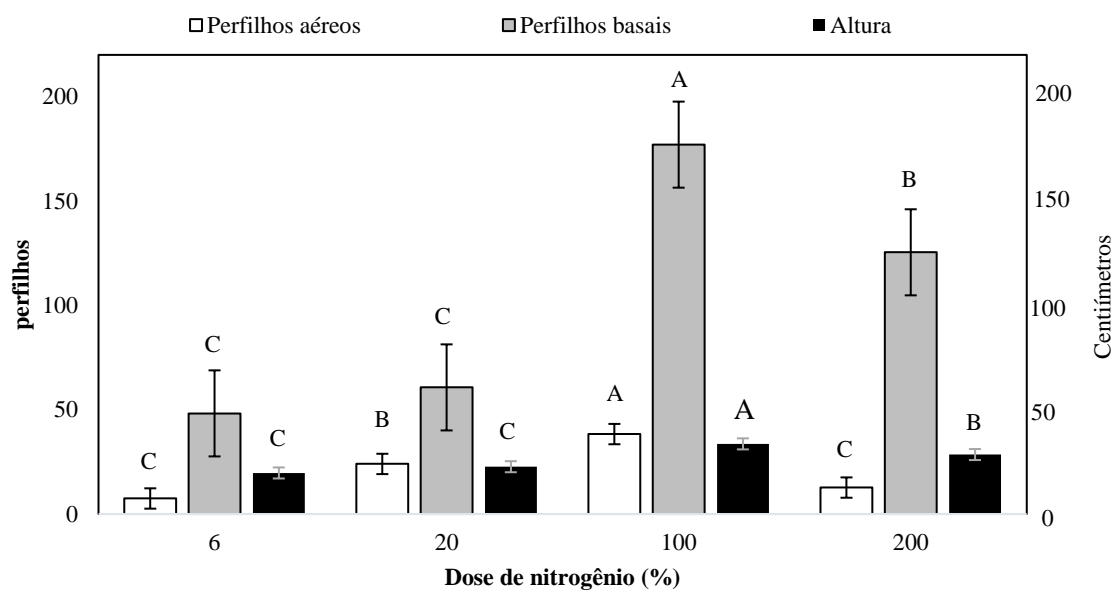
Anexo 60. Correlações lineares entre as variáveis potássio na F₁, potássio na F₂, perfilhamento aéreo, perfilhamento basal e altura, considerando-se todos os ciclos de crescimento no experimento de potássio

Variável	Potássio F ₂	Perfilhamento aéreo	Perfilhamento basal	Altura	PMS
Coeficiente de correlação					
Potássio F ₁	0,04 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	0,36*	0,15 ^{ns}
Potássio F ₂		-0,00 ^{ns}	-0,23 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,10 ^{ns}
Perfilhamento aéreo			0,04 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,11 ^{ns}
Perfilhamento basal				0,28 ^{ns}	0,49*
Altura					0,39*

Anexo 61. Correlações lineares entre as variáveis cálcio na F₁, cálcio na F₂, perfilhamento aéreo, perfilhamento basal e altura, considerando-se todos os ciclos de crescimento no experimento de cálcio

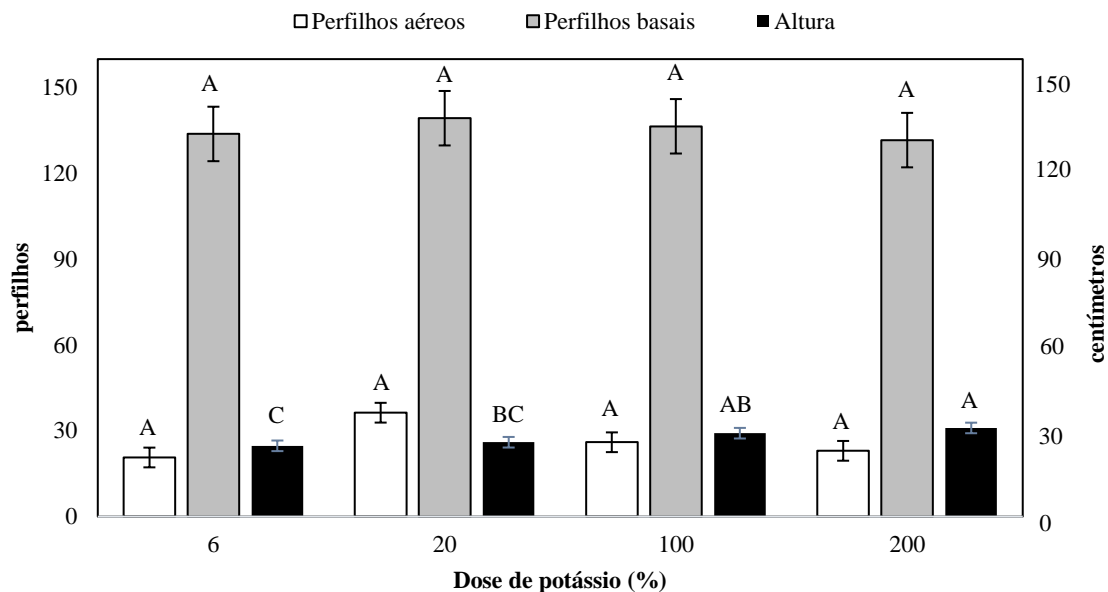
Variável	Cálcio F ₂	Perfilhamento aéreo	Perfilhamento basal	Altura	PMS
Coeficiente de correlação					
Cálcio F ₁	0,43*	0,27 ^{ns}	0,41*	-0,11 ^{ns}	-0,08 ^{ns}
Cálcio F ₂		-0,02 ^{ns}	0,31 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,13 ^{ns}
Perfilhamento aéreo			0,07 ^{ns}	-0,27 ^{ns}	-0,21 ^{ns}
Perfilhamento basal				0,37 ^{ns}	-0,04 ^{ns}
Altura					0,26 ^{ns}

Anexo 62. Média de perfilhamento aéreo (perfilho/parcela), perfilhamento basal (perfilho/parcela) e altura (cm), em capim marandu para as doses de adubação nitrogenada. Letras comparam as médias das doses de nitrogênio para cada variável. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Resultados referentes as médias dos 3 ciclos de crescimento.

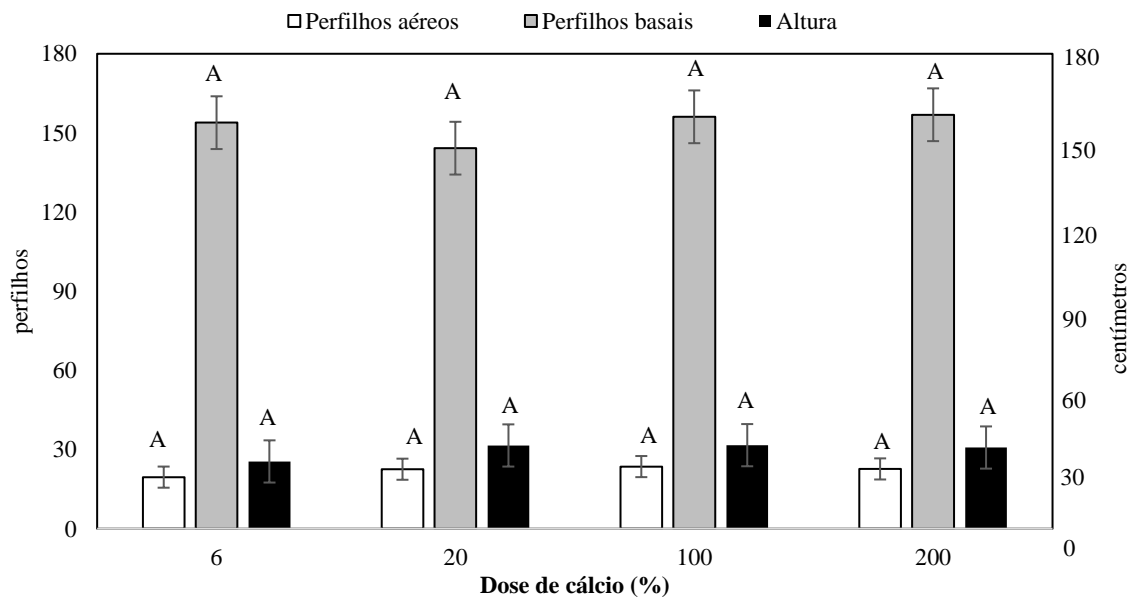


Anexo 63. Média de perfilhamento aéreo (perfilho/parcela), perfilhamento basal (perfilho/parcela) e altura (cm), em capim marandu para as doses de potássio. Letras comparam as médias das doses de N para cada variável. Médias seguidas por

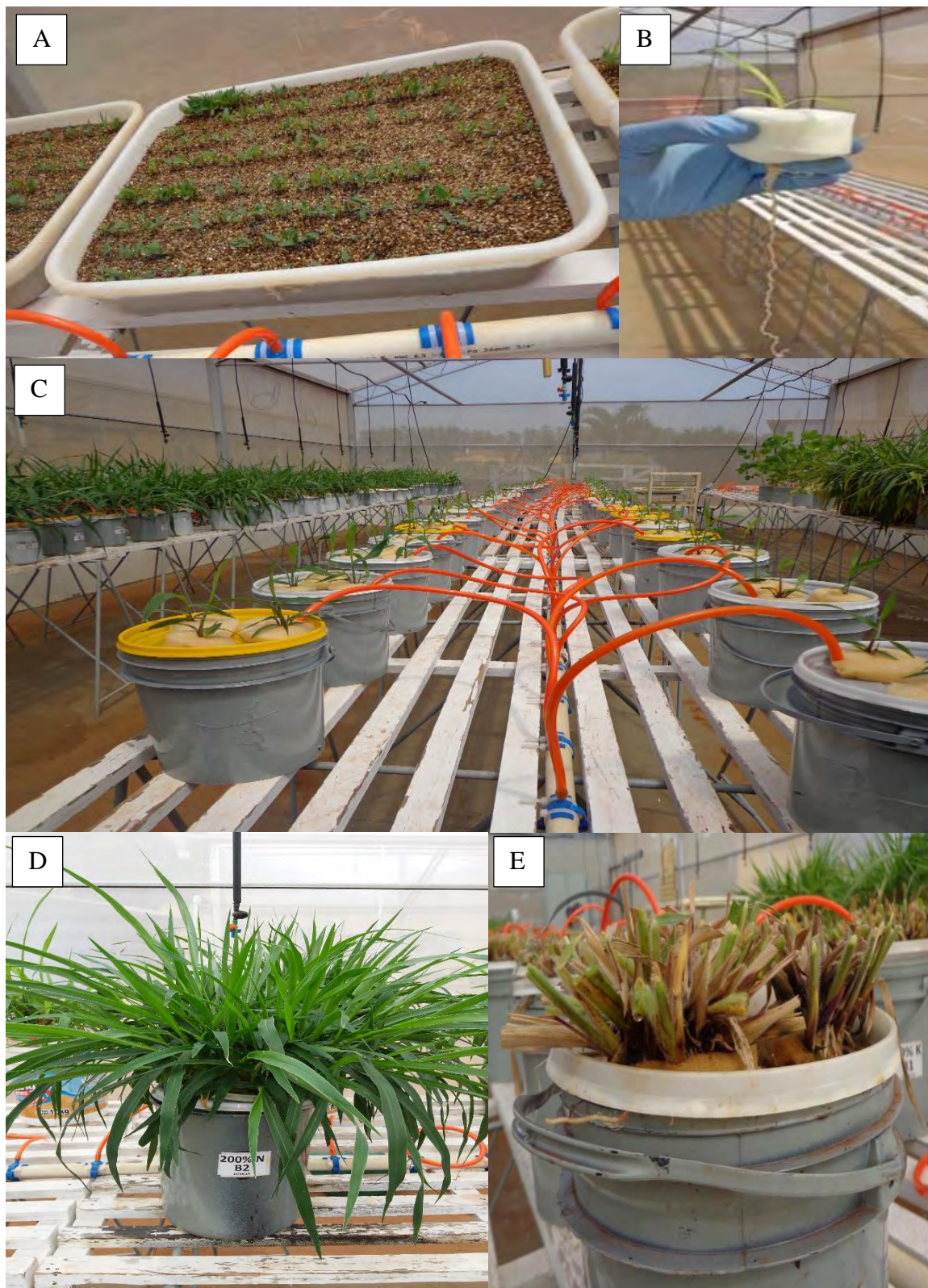
mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Resultados referentes as médias dos 3 ciclos de crescimento.



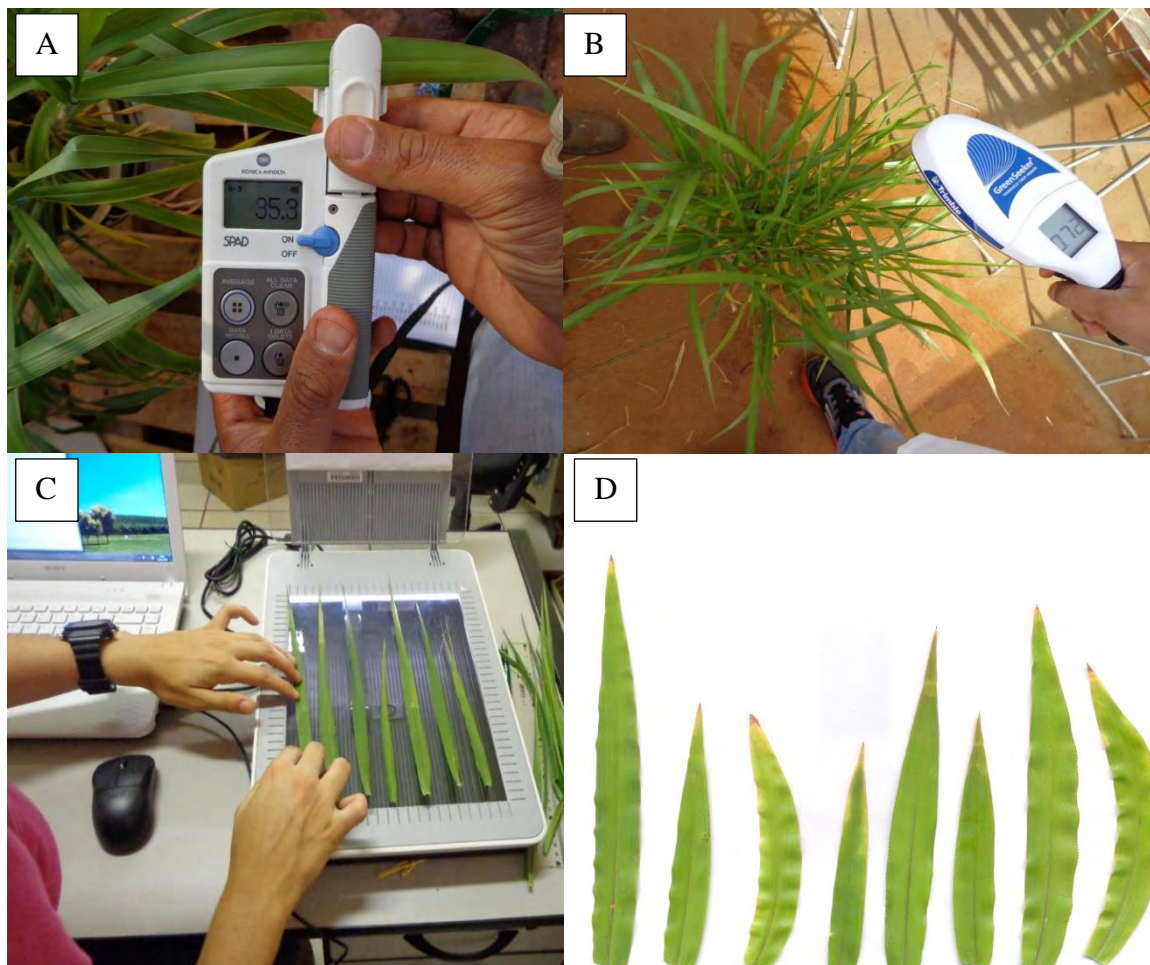
Anexo 64. Média de perfilhamento aéreo (perfilho/parcela), perfilhamento basal (perfilho/parcela) e altura (cm), em capim marandu para as doses de cálcio. Letras comparam as médias das doses de Ca para cada variável. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Resultados referentes as médias dos 3 ciclos de crescimento.



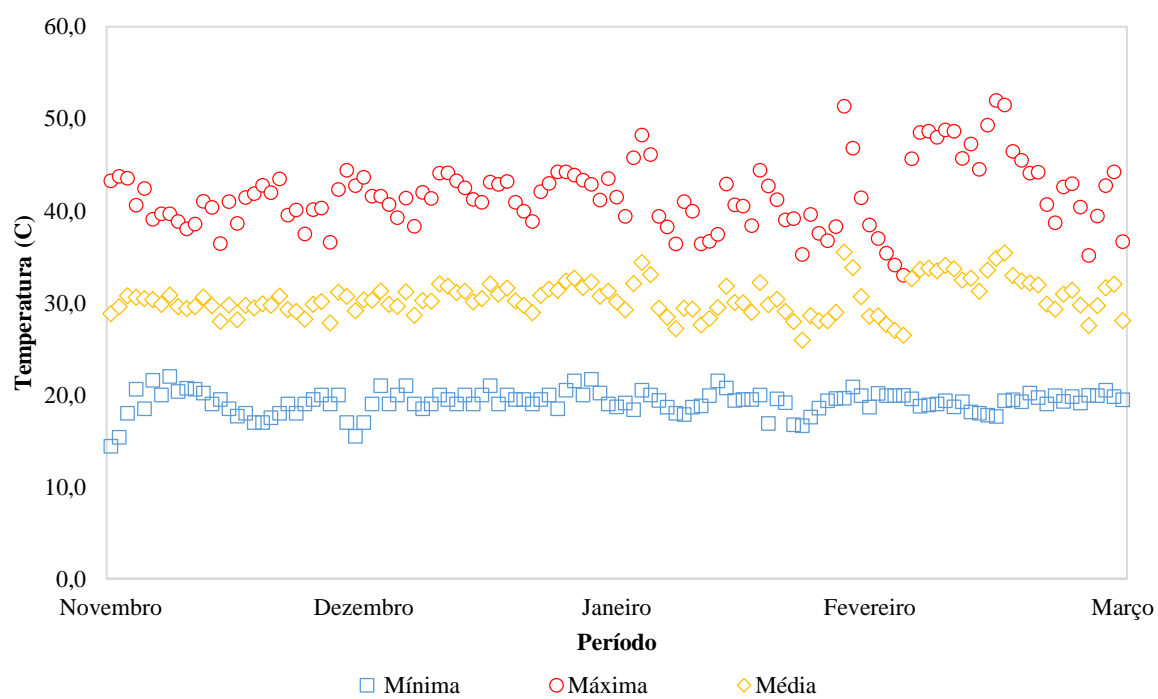
Anexo 65. Condução do experimento em casa de vegetação. (A) Plantas germinando em vermiculita (B) Momento de transplântio das plântulas para a solução nutritiva (C) Sistema hidropônico utilizado (D) Crescimento das plantas após 28 dias de cultivo (E) Resíduo de 5 cm de altura após corte da unidade experimental para determinação da produção de parte aérea e demais análises.

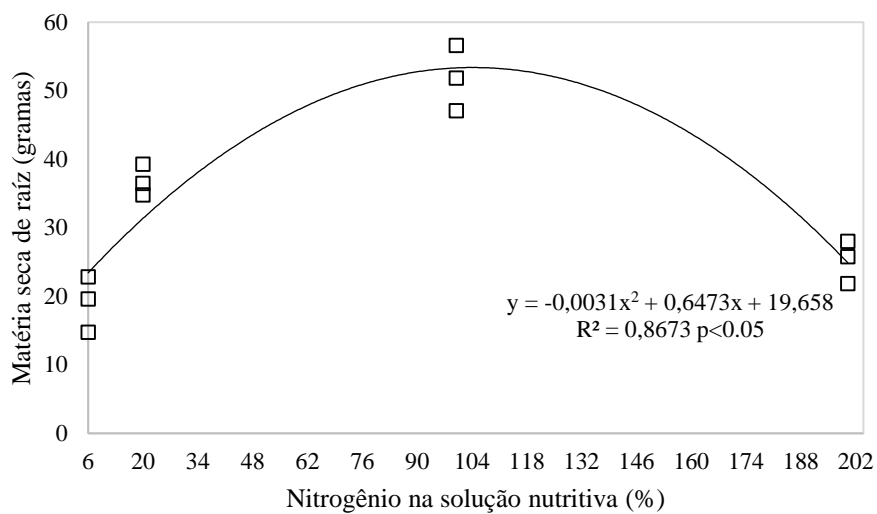
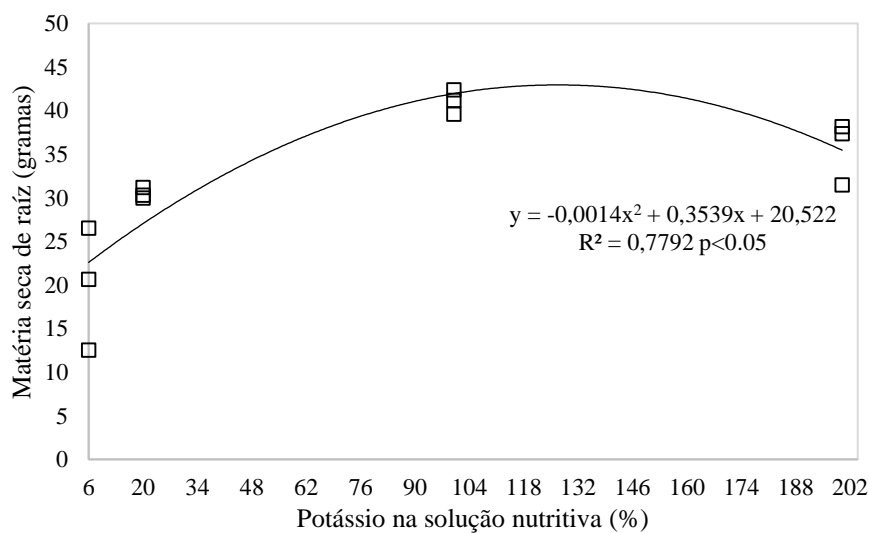


Anexo 66. Avaliações realizadas nas plantas. (A) Índice Spad (B), NDVI (C) processo de escaneamento das folhas diagnóstico e (D) folhas pós processo de escaneamento



Anexo 67. Variações de temperatura na casa-de-vegetação durante o período experimental



Anexo 68. Produção de matéria seca de raiz em função de doses de N na solução nutritiva**Anexo 69.** Produção de matéria seca de raiz em função de doses de K na solução nutritiva**Anexo 70.** Produção de matéria seca de raiz em função de doses de Ca na solução nutritiva