UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS

THIAGO PEREIRA MOTTA

**Índices espectrais de imagens coloridas na avaliação do estado nutricional de
fósforo, enxofre e magnésio no capim-marandu**

**Pirassununga
2016**

THIAGO PEREIRA MOTTA

**Índices espectrais de imagens coloridas na avaliação do estado nutricional de
fósforo, enxofre e magnésio no capim-marandu**
“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

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

P921f Pereira Motta, Thiago
 Índices espectrais de imagens coloridas na
avaliação do estado nutricional de fósforo, enxofre e
magnésio no capim-marandu / Thiago Pereira Motta ;
orientador Pedro Henrique de Cerqueira Luz. --
Pirassununga, 2016.

 80 f.
 Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em
Zootecnia) -- Faculdade de Zootecnia e Engenharia
de Alimentos, Universidade de São Paulo.

 1. forragicultura e pastagens. 2. nutrição de
planta. 3. capim-marandu. 4. índices espectrais. 5.
processamento de imagem. I. de Cerqueira Luz, Pedro
Henrique, orient. II. Título.

Dedicatória

Á minha amada esposa, Karina, companheira e parceira de todos os momentos que muito se doou e muito me apoiou em tudo.

Á minha filha, Elisa, pelo simples fato de existir e alegrar nossas vidas.

Aos meus amados pais, Cléciton e Ana, que me ensinaram os valores e princípios para a vida e sempre me amaram e apoiaram em tudo.

Aos meus amados irmãos e sobrinhas.

Agradecimentos

A Deus, pela vida, saúde e tudo que me concedeste.

Ao Prof. Dr. Pedro Henrique de Cerqueira Luz, pela orientação, confiança e convivência e por compartilhar seu vasto conhecimento, contribuindo desta forma para meu crescimento científico e intelectual.

Ao Prof. Dr. Murilo Mesquita Baesso, pela contribuição indispensável ao nosso trabalho.

Ao Prof. Dr. Cesar de Gonçalves de Lima pelas orientações e auxílio nas análises estatísticas.

Ao Prof. Dr. Valdo Rodrigues Herling por me receber na FZEA em primeiro contato com a instituição, pela convivência e contribuição valiosa em minha formação científica e intelectual.

Aos colegas Frederich, Jéssica Bet, Janaína e Marcos Felipe que colaboraram ativamente em diversas etapas de nosso trabalho.

Aos Professores Felipe, Junior e Lilian pela convivência, pelos ensinamentos e contribuições em nossa formação na pós-graduação.

À estagiária Carolina pela colaboração em etapa de processamento das imagens.

Aos funcionários das agrárias Manoel, Marcos e Paulo pelo suporte e auxílio em diversos momentos.

Aos estagiários do Laboratório de Solos e Plantas das agrárias pelo suporte, auxílio.

Aos colegas das agrárias Jéssica Bet, Liliane, Fábio, Fernanda, Gabriela, Gleber, Antônio, Cesar, Vanessa, Murilo, Marisa pela convivência fraterna e enriquecedora.

Aos professores da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, com quem tive contato através de aulas e situações diversas, pelas lições e conhecimento compartilhado que muito me ajudaram e vão me ajudar em minha vida profissional.

À Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, pela oportunidade de realização do curso de doutorado e realização de um sonho.

RESUMO

O presente trabalho foi conduzido com o objetivo de avaliar a nutrição da *Urochloa brizantha* (Syn. *Brachiaria brizantha*) cv. Marandu para P, Mg e S através do desenvolvimento das plantas, sintomas visuais e índices espectrais das bandas do visível. Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação localizada no campus da FZEA/USP. As plantas foram cultivadas em solução nutritiva, onde foram fornecidas as seguintes doses de P, Mg e S: 6%, 20%, 100% e 200% do recomendado, em blocos casualizados. As imagens digitais de scanner das folhas diagnósticas foram processadas e classificadas utilizando MATLAB® R2012b com pacote de ferramentas para processamento de imagens. Foram utilizados vetores de características baseados nas bandas do visível, sendo calculados os seguintes índices: excesso de verde; vermelho normalizado; verde normalizado; e razão verde-vermelho. Na classificação foi utilizado classificador bayesiano. As doses de P, Mg e S causaram aumento significativo ($P < 0,05$) no acúmulo de massa seca da parte aérea (MSPA) e nos teores foliares dos nutrientes dosados. As doses de P, S e Mg promoveram manifestações dos sintomas de deficiência característicos que se traduzem em modificações no perfil de coloração das folhas. A Porcentagem de Acerto Global (PAG) e o índice Kappa atingiram valores acima de 80% e 0,81, respectivamente, sendo consideradas classificações excelentes. As melhores classificações foram obtidas quando se utilizou mais de um índice como vetor de característica. Índices espectrais do verde e do vermelho são bons descritores do status da nutrição do P, Mg e S no capim-marandu.

Palavras-chave: banda do verde, banda do vermelho, nutrição da pastagem.

ABSTRACT

The present study was conducted to assess the nutrition of *Urochloa brizantha* (SYN. *Brachiaria brizantha*) CV. Marandu to P, Mg and S through the development of plants, Visual symptoms and spectral indices of the visible bands. The experiments were conducted in a greenhouse located on the campus of the FZEA/USP. The plants were grown in nutrient solution, where they were provided the following doses of P, Mg, and S: 6%, 20%, 100% and 200% of the recommended, in randomized blocks. The digital images from scanner diagnostic sheets were processed and classified using MATLAB® R2012b with package of tools for processing images. Characteristic vectors were used based on bands of the visible, being calculated the following indexes: excess Green; standard red; standardised Green; Red-Green ratio. The classification has been used Bayesian classifier. The doses of P, Mg, and S have caused significant increase ($P < 0.05$) in acúmulo shoot dry mass (MSPA) and foliar nutrient levels dosed. The doses of P, S and Mg promoted demonstrations of characteristic deficiency symptoms that result in changes in the profile of colouring of leaves. The Global hit Percentage (PAG) and the Kappa index reached values above 80%, and 0.81, respectively, being considered excellent ratings. The best ratings were obtained when using more than one index as a feature vector. Spectral indices of green and Red are good descriptors of the nutrition status of P, Mg and S marandu grass. Key words: Green band, red band, nutrition of grazing.

Keywords: green band, red band, nutrition of pastureland

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivo	11
1.2	Hipótese	11
2	REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1	Capim-marandu	12
2.2	Funções e sintomas de deficiência de fósforo nas plantas.....	14
2.3	Funções e sintomas de deficiência de magnésio nas plantas	17
2.4	Funções e sintomas de deficiência de enxofre nas plantas	22
2.5	Avaliação do estado nutricional das plantas	24
2.6	Nível crítico na planta.....	25
2.7	Índice Espectral.....	27
2.8	Uso dos índices espectrais na avaliação nutricional de plantas	31
3	MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1	Local	34
3.2	Casa de Vegetação	34
3.2.1	Cultivo do capim-marandu e solução nutritiva	35
3.2.2	Experimento com fósforo	37
3.2.3	Experimento com enxofre	38
3.2.4	Experimento com magnésio	38
3.3	Amostragens e processamentos	39
3.3.1	Parte aérea.....	39
3.3.2	Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).....	40
3.3.3	Imagens.....	40
3.4	Nível crítico do elemento na solução nutritiva e na planta.....	45
3.5	Análise dos dados	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1	Experimento com fósforo	46

4.1.1	Produção, teor de minerais das lâminas recém-expandidas (LR) e sintomas de deficiência.....	46
4.1.2	Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).....	49
4.1.3	Índices Espectrais	51
4.2	Experimento com enxofre.....	54
4.2.1	Produção, teor de minerais das lâminas recém-expandidas (LR) e sintomas de deficiência.....	54
4.2.2	Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).....	59
4.2.3	Índices Espectrais	60
4.3	Experimento do Mg	64
4.3.1	Produção, teor de minerais das lâminas recém-expandidas (LR) e sintomas de deficiência.....	64
4.3.2	NDVI	67
4.3.3	Índices Espectrais	67
5	CONCLUSÕES.....	71
	REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

A avaliação do status nutricional de uma cultura pode ser realizada por meio da determinação dos teores dos minerais contidos na folha diagnóstica. Esse método é caro, demorado, tem época correta para fazer, não há possibilidade de corrigir no mesmo ciclo (anuais), além de ser agressivo ao meio ambiente. Outra maneira de realizar o diagnóstico nutricional é por meio da observação visual dos sintomas. Essa técnica é limitada pois só é possível perceber a deficiência em grau avançado, comprometendo de maneira irreversível o ciclo produtivo da cultura. Além disso, exige muita experiência do observador e histórico das áreas, o que nem sempre é possível (SILVA et al., 2014).

Os estudos com propostas de quantificar indiretamente os nutrientes contidos nas plantas através de imagens digitais tem aumentado de maneira significativa. O uso de métodos computacionais, que utilizam imagens ou outras formas de aquisição de descritores, têm como vantagem a agilidade, possibilidade de comparação dos resultados (WIWART et al., 2009) independe do observador, sendo assim, capaz de reconhecer a deficiência em diferentes estágios de crescimento da cultura.

Baseados em princípio de que toda deficiência nutricional causa uma desordem fisiológica que culmina em um conjunto de sintomas com um padrão específico para cada nutriente em determinada cultura, os estudos de que se tem conhecimento avaliaram as folhas ou lâminas foliares. Por meio da pesquisa, se determinou qual a folha que melhor representa o estado nutricional de determinada cultura. Além disso existe um momento considerado estratégico para a realização do diagnóstico da nutrição da planta, respeitando sempre as particularidades da cultura. No entanto, os sintomas de deficiência podem se iniciar com maior ou menor intensidade e escalas de tempo em folhas mais novas ou em folhas mais velhas, a depender do elemento em questão.

Em sistemas de cultivo intensivo o uso de fertilizantes é grande e necessita de um manejo preciso e racional. A necessidade de ajustar e controlar de maneira mais rigorosa o aporte de nutrientes que o sistema de cultivo proporciona ao que é requerido pela cultura se torna ainda maior para assegurar que a atividade seja sustentável.

Diversas culturas (milho, algodão, batata, arroz, capim-tanzânia, capim-braquiária, cevada, ervilha, feijão, fava, tremoço, tomate, trigo e outros) (CUNHA, 2004; BENVENUTI, 2005; ZHAO et al., 2005; STARKS et al., 2006; GAUTAM; PANIGRAHI, 2007; DIAS

AUGOSTINHO et al., 2008; WIWART et al., 2009; PAGOLA et al., 2009; CHEN et al., 2010; FITZGERALD; RODRIGUEZ; O'LEARY, 2010; XU et al., 2011; GOFFART; OLIVIER; FRANKINET, 2011; ROSSATO et al., 2012; NIGON, 2012; WANG et al., 2013; PULLANAGARI et al., 2013; ROMUALDO et al., 2014; SILVA et al., 2014; SRIDEVY; VIJENDRAN; NADU, 2014) já foram estudadas em situações de deficiência e suficiência nutricional utilizando índices de vegetação que se baseiam na reflectância espectral com comprimento de ondas que correspondem desde o ultravioleta até o infravermelho.

Na grande maioria dos estudos tem se investigado a capacidade dos índices de classificar e reconhecer o estado de nutrição de nitrogênio (N) nas diferentes culturas ao redor do mundo (TREMBLAY; WANG; CEROVIC, 2012). Obviamente, que isso ocorre devido a relação direta existente entre o fornecimento de nitrogênio e os teores de clorofila na folha. Poucos estudos têm sido realizados com os demais macronutrientes.

Apesar da grande distribuição do capim-marandu pelo território nacional se desconhece trabalhos dessa natureza com esta gramínea. Diante disso se destaca a necessidade deste trabalho em avaliar o estado nutricional da *Brachiaria brizantha* cv. Marandu cultivada em solução nutritiva, sob doses de Fósforo (P), Enxofre (S) e Magnésio (Mg).

1.1 Objetivo

Neste estudo o objetivo foi avaliar o estado nutricional da *Brachiaria brizantha* (syn.*Urochloa brizantha*) cv. Marandu sob doses de fósforo, magnésio e enxofre em solução nutritiva, utilizando índices espectrais do visível.

1.2 Hipótese

Por meio dos índices espectrais do visível é possível avaliar o estado nutricional da *Brachiaria brizantha* cv. Marandu sob doses de fósforo, magnésio e enxofre em solução nutritiva.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Capim-marandu

O capim-marandu é uma gramínea da espécie *Brachiaria brizantha* (Syn. *Urochloa brizantha*) (Hochst ex A. Rich.) Stapf cv. Marandu, sendo originária de regiões vulcânicas da África Tropical e do Sul, onde os solos geralmente apresentam bons níveis de fertilidade, com precipitação pluviométrica anual ao redor de 700 mm e cerca de 8 meses de seca no inverno a (RAYMAN, 1983 apud NUNES et al., 1984; VILELA, 2005).

Proveniente da Estação Experimental de Forrageiras de Marandellas, no Zimbabwe (ex-Rodésia), África, foi introduzida no Brasil por volta de 1967 por iniciativa do produtor de sementes Paul Rankin Rayman e gentileza do Dr. John Clatworthy, pesquisador da referida Estação Experimental (NUNES et al., 1984).

Foi cultivada por vários anos em Ibirarema, Estado de São Paulo, de onde foi distribuída a várias regiões. Em 1977 a Embrapa Gado de Corte (CNPGC – EMBRAPA), em Campo Grande - MS, iniciou o processo de avaliações da forrageira. Em 1979 foi a vez da Embrapa Cerrados de realizar estudos sobre a *B. brizantha* cv. Marandu, em Planaltina – DF (NUNES et al., 1984; VILELA, 2005).

Essa cultivar pode ser descrita como uma planta cespitosa, de ciclo perene, com altura em crescimento livre de 1,5 a 2,5 m, com colmos iniciais prostrados, mas produzindo perfilhos predominantemente eretos. Rizomas muito curtos e encurvados. Colmos floríferos eretos, bainhas pilosas e com cílios nas margens, geralmente mais longas que os entre-nós, escondendo os nós, o que confere a impressão de haver densa pilosidade nos colmos vegetativos. Lâminas foliares linear-lanceoladas, esparsamente pilosas na face ventral e glabras na face dorsal. Inflorescências de até 40 cm de comprimento, geralmente com 4 a 6 ráculos, bastante equidistantes ao longo do eixo, medindo de 7 a 10 cm de comprimento, mas podendo alcançar 20 cm nas plantas muito vigorosas. Espiguetas unisseriadas ao longo da raque, oblongas a elíptico-oblongas, com 5 a 5,5 mm de comprimento por 2 a 2,5 mm de largura, esparsamente pilosas no ápice (VALLS; SENDULSKY, 1984 apud NUNES et al., 1984).

A cultivar Marandu pode ser diferenciada de outras cultivares de *B. brizantha*, pela associação obrigatória das seguintes características: plantas sempre robustas e com intenso perfilhamento nos nós superiores dos colmos floríferos, presença de pelos na porção apical

dos entrenós, bainhas pilosas e lâminas largas e longas com pubescência apenas na face inferior, glabras na face superior e com margens não cortantes, raque sem pigmentação arroxeada e espiguetas ciliadas no ápice (VALLS; SENDULSKY, 1984 apud NUNES et al., 1984).

O termo Marandu vem do Tupi Guarani e significa *novidade*. Sendo conhecida por outros nomes em diversas regiões do mundo: palisade grass (Samoa), signal grass (Leste da África), St. Lúcia grass (Queensland), Ceylon sheep grass (Sri Lanka), Upright brachiaria (Zimbabwe), Bread grass (Sul da África), Estrela da África, Pasto alambe, Braquiarão, Brizantão (Brasil) (VILELA, 2005).

As características agronômicas desejáveis dessa forrageira a tornaram umas das mais cultivadas em todo país (CORRÊA, 2002). São elas: alta produção e qualidade de forragem, persistência, boa capacidade de rebrota, tolerância ao frio e à seca, resistência à cigarrinha das pastagens (exceto aquelas pertencentes ao gênero *Mahanarva*), elevada resposta à adubação, boa produção de sementes, boa competição com invasoras, adequada como pasto vedado (feno-em-pé) e estabelecimento rápido (NUNES et al., 1984; CORRÊA, 2002; VILELA, 2005). Além disso, tolera altitudes de até 3000 m e condições de acidez, se desenvolvendo bem na maioria dos solos. (NUNES et al., 1984; VILELA, 2005).

Sua resposta a adubação e bom valor nutritivo pode sustentar níveis de produtividade elevados. Em trabalho de Flores et al. (2008), realizado na Embrapa Gado de Corte, em Campo Grande, conduzido no verão e outono, os autores observaram capacidade de suporte de até 6 Unidades Animais (450 kg de peso vivo) por hectare e ganho de peso diário por animal de até 800 g.

O desempenho animal proporcionado pelo capim-marandu bem manejado pode ser explicado pelos dados de composição bromatológica obtidos por Gerdes et al. (2000). Os valores de proteína bruta de planta inteira foram de 11% a 18% e quando se analisou somente as lâminas foliares foi observado valores de 12% a 19%. Os valores de FDN apresentados pelos autores foram de 57% a 72% para planta inteira e de 59% a 73% para lâminas foliares. Também foi avaliado a digestibilidade *in vitro* da matéria seca que variou de 59% a 72%.

Devido a todas as características citadas e principalmente a sua resistência à cigarrinha das pastagens, essa espécie forrageira foi substituindo áreas antes ocupadas pela *B. decumbens*. De acordo com Machado (2010), nos anos de 1990, cerca de 90% das sementes

comercializadas no trópico úmido eram de capim-marandu. Além disso o autor afirma que até 2005 cerca de 50% dos cerrados brasileiros estavam ocupadas por pastagens da espécie forrageira e que na região norte, chegava até 65%.

Segundo Pereira (2014), até 2013 a área ocupada pelo cultivar Marandu foi de 76,4 milhões de hectares, sendo que a área total de pastagens cultivadas corresponde a cerca de 115 milhões de hectares, ou seja, aproximadamente 66 % das pastagens cultivadas do país. Graças a esta representativa área de ocupação no país, o capim-marandu pode ser considerado a espécie forrageira de maior importância para a produção animal nacional.

2.2 Funções e sintomas de deficiência de fósforo nas plantas

O P é absorvido pelas plantas na forma H_2PO_4^- (quase sempre) ou HPO_4^- . O acúmulo do P nas células corticais da raiz é seguida pela transferência dentro dela até o xilema, que ocorre pelo simplasto. A via mais importante para sua entrada em combinações orgânica é por meio da esterificação de um grupo OH da pentose que se liga a adenina para formar adenosina monofosfato (AMP), e depois adenosina difosfato (ADP) e o adenosina trifosfato(ATP) (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

Logo após o processo de absorção do P, desencadeia-se o processo de transporte, ocorrendo de forma semelhante à absorvida, ou seja, como H_2PO_4^- . Entretanto, pode ser encontrado no xilema em baixa concentração na forma orgânica (fosforil colina ou ésteres de carboidratos) (PRADO, 2008).

Seu movimento dentro da planta não cessa quando chega às folhas ou regiões de crescimento, pois juntamente com o nitrogênio (N) o P é o elemento mais prontamente redistribuído (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; MALAVOLTA, 2004).

O processo de redistribuição do P ocorre exclusivamente na forma orgânica, mas pode ser encontrado no floema também na forma inorgânica. Este processo de redistribuição ocorre no floema, e o P orgânico apresenta alta mobilidade. Sendo prontamente móvel na planta no sentido ascendente ou descendente, as folhas novas são supridas não só pelo fosfato absorvido pelas raízes, mas também pelo fosfato originado das folhas mais velhas. Assim, as plantas deficientes em P demonstram primeiramente os sintomas de deficiência na folha velha. Estima-se que cerca de 60% do P da folha velha é passível de ser remobilizado via floema para as folhas novas (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; MALAVOLTA,

2006; PRADO, 2008), ou seja, a hidrólise de ácidos nucléicos e de fosfolipídeos contribuiria com cerca de 40-47% e 26-38%, respectivamente, do total de P reabsorvido de folhas senescentes (AERTS, 1996 apud por PRADO, 2008).

O P total nas plantas com estado nutricional adequado está geralmente na forma inorgânica (ortofosfato), solúvel em água, presente no vacúolo (cerca de 75%), e o restante no citoplasma e nas organelas celulares. Por outro lado, em plantas deficientes em P, a forma inorgânica predomina, sendo encontrada no citoplasma e no cloroplasto das células das folhas. Nas folhas, o conteúdo total de P pode variar cerca de 20 vezes, sem afetar a fotossíntese, sendo que a concentração de P inorgânico no citoplasma é regulada, em uma faixa estreita, pela homeostase efetiva de P, na qual o P inorgânico dos vacúolos atua como um tampão (MIMURA et al., 1990 apud PRADO, 2008). E outra parte importante do P está na forma orgânica, em quatro grandes grupos (EPSTEIN; BLOOM, 2006; MALAVOLTA, 2006; PRADO, 2008):

a) Ésteres fosfóricos: existem mais de 50, como trioses, frutose-1-6-bifosfato (biossíntese da sacarose e compostos intermediários do desdobramento dos açúcares). As ligações energéticas desses compostos representam “a máquina que move todo o metabolismo vegetal”. Se destaca que a maior parte do P contido nos ésteres (cerca 70%) está em apenas nove compostos, na seguinte sequência: glicose-6-P (20%), ATP (10%), UDPG (difosfato de uridina e glicose), 3-PGA (ácido 3 fosfoglicérico), frutose-6-P, UDP (difosfato de uridina), manose-6-P, UTP (trifosfato de uridina) e ADP (EPSTEIN; BLOOM, 2006; MALAVOLTA, 2006; PRADO, 2008).

b) Fosfolipídios (componente da membrana, conferindo a natureza lipídica): os cloroplastos têm sistema de membranas muito desenvolvido, os tilacóides, e representam cerca de 40% do total de fosfolipídeos das células fotossintéticas (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; EPSTEIN; BLOOM, 2006; PRADO, 2008).

c) Nucleotídeos: Base Nitrogenada + Pentose + 1-3 radicais de ácidos fosfóricos, podendo estar livres, na forma de ATP – ADP, ou combinadas em ácidos nucléicos: DNA (macromolécula, é responsável por carregar a informação genética da célula) e RNA (envolvido na transladação da informação genética (via RNAm) e na síntese protéica). A função principal do P no DNA é a de formar uma ponte estrutural entre os nucleosídeos

(pentose + base) que são as letras do código genético (EPSTEIN; BLOOM, 2006; MALAVOLTA, 2006; PRADO, 2008).

A energia produzida na fotossíntese e também na respiração é armazenada principalmente na forma de ATP. A ligação fosfatada com alta energia é um meio para armazenar e usar grandes quantidades de energia, de 12.000 a 16.000 calorias. Essa energia a planta usa nos diversos processos vitais, desde o transporte de solutos pelas membranas das células, trabalho mecânico de penetração da raiz no solo, na absorção ativa de nutrientes, até na síntese de amido (presente nos grãos). Nesse sentido, é difícil imaginar em qual fenômeno biológico o P, nos seus diferentes compostos, não participe direta ou indiretamente (PRADO, 2008).

O P é importante para formação dos primórdios das partes reprodutivas. Em quantidades adequadas o P estimula o desenvolvimento radicular, é essencial para boa formação de frutos e sementes e incrementa a precocidade da produção vegetal (RAIJ, 2011). Segundo o mesmo autor a carência de P na planta tem efeitos drásticos ao retardar o crescimento da planta de maneira geral, de modo que os sintomas do seu déficit não são marcantes como ocorre com N e K, se manifestando mais como parada do crescimento.

O sintoma mais característico de deficiência de P (denominador comum da deficiência) é o aparecimento de coloração verde mais escura ou azul-esverdeada nas folhas mais velhas, um dos primeiros sintomas, visto que o número de folhas e a expansão da área foliar diminuem muito, em detrimento da formação de clorofila. Embora o número de clorofila aumente, a taxa fotossintética unitária é baixa. Em algumas espécies ocorre pigmentação avermelhada, arroxeada ou marron (pardas) nas folhas, com surgimento nas bordas e da ponta para a base. A coloração escura é devida ao acúmulo de pigmentos vermelhos, azuis ou púrpuras, que pertencem ao grupo conhecido como antocianinas. Esses pigmentos são glicídios formados pela reação entre açúcar e um grupo de compostos complexos cíclicos, as antocianidinas (MALAVOLTA, 2006; PRADO, 2008). Folhas sem brilho e com ângulos mais agudos, gemas laterais dormentes, número reduzido de frutos, sementes e atraso no florescimento. O crescimento é reduzido e sob condições de deficiência severa as plantas se tornam enfezadas (EPSTEIN; BLOOM, 2006; RAIJ, 2011).

De maneira geral, o P é o nutriente que mais limita a produtividade das culturas na maioria dos solos não adubados. O que é explicado pela escassez do elemento na maioria dos solos brasileiros. Por isso, os efeitos de aporte de P, mesmo que pequenas doses em formas

solúveis, são especialmente acentuados como consequência do estímulo ao desenvolvimento radicular que propicia a obtenção de demais nutrientes para a cultura (RAIJ, 2011).

A deficiência de P em pastagem pode limitar especialmente na fase de implantação da pastagem, onde a exigência inicial da forrageira é alta, desde a fase de semeadura (sistema radicular pouco desenvolvido), até a fase de pleno crescimento, onde o acúmulo do P é alto. Dessa forma, havendo baixa disponibilidade no solo, poderá surgir a sintomatologia de deficiência (PRADO, 2008).

Monteiro et al. (1995) observaram, em capim-marandu, que a omissão de P provocou diminuição no teor do nutriente na parte aérea ($0,4 \text{ g kg}^{-1}$) e na raiz ($0,5 \text{ g kg}^{-1}$), comparado ao tratamento completo (parte aérea = $2,4 \text{ g kg}^{-1}$ e raiz = $1,7 \text{ g kg}^{-1}$), resultando em diminuição significativa na produção de matéria seca das plantas.

Já o excesso é uma desordem rara na literatura, entretanto existem indicações de pintas vermelho-escuras nas folhas velhas (PRADO, 2008). Mas não parece ser um problema sério para as plantas, já que o consumo de luxo é transferido para polifosfatos e outros fosfatos, sem afetar o crescimento das plantas (RAIJ, 2011).

Por outro lado, diversos autores citam efeitos depressivos do P sobre a utilização dos micronutrientes catiônicos pelas plantas, especialmente o Zn, e outros em menor intensidade (Cu, Fe, Mn). Há hipóteses que explicam isso, e elas afirmam que pode ocorrer a reação de precipitação do P e o micro, nos vasos condutores, tornando seu transporte reduzido para a parte aérea, causando a sua deficiência. Outra hipótese menciona é que pode haver efeito de diluição do micronutriente, com o maior desenvolvimento da planta, devido à aplicação do P, e dessa maneira causar sua deficiência na planta (LOPEZ G.; MALAVOLTA, 1974). Dessa forma, o uso de P em excesso pode induzir sintomas de deficiências desses micronutrientes. Além disso, o excesso de P pode deprimir a fixação de CO_2 e a síntese de amido (EPSTEIN; BLOOM, 2006; MALAVOLTA, 2006; PRADO, 2008).

2.3 Funções e sintomas de deficiência de magnésio nas plantas

O processo de absorção (passiva e ativa) do magnésio na forma de Mg^{2+} é muito estudado, pois altas concentrações de Ca^{2+} e, principalmente de K^+ no meio, podem inibir por competição iônica a sua absorção, causando deficiência nas plantas (PRADO, 2008). O íon

Mg apresenta igual valência e raio iônico, e grau de hidratação semelhante aos de Cu, Fe, Mn e Zn (KABATA PENDIAS; PENDIAS, 1984 apud PRADO, 2008), afetando a absorção desses micronutrientes. Essa interação do Mg com outros cátions é importante porque normalmente a taxa de absorção deste íon é relativamente baixa, pois o Mg possui raio hidratado relativamente grande (0,480 nm) e energia de hidratação muito alta, fazendo com que sua afinidade por sítios de ligação na membrana plasmática seja particularmente baixa (PRADO, 2008).

Após a sua absorção, o Mg^{2+} é transportado (ativa e passiva) até atingir o xilema, e daí, de forma passiva, para a parte aérea na corrente transpiratória (PRADO, 2008).

Ao contrário do que ocorre com o Ca^{2+} e, de modo semelhante ao que ocorre com o K^+ , o Mg^{2+} é móvel no floema. Como a maior parte do Mg da planta se encontra na forma solúvel, isso explica a sua alta redistribuição nas plantas (CASTRO; KLUGE; PERES, 2005; EPSTEIN; BLOOM, 2006; PRADO, 2008).

O magnésio (Mg) é um constituinte da clorofila e fica no centro da molécula. O Mg não participa diretamente na bioquímica da molécula de clorofila. Sua função é de manter a configuração estérica da clorofila sem conferir a ela propriedades de disfunção. O Mg executa um grande número de funções em adição ao seu papel na clorofila. As ligações de Mg com ATP tem papel em várias das reações da fotossíntese (EPSTEIN; BLOOM, 2006; PRADO, 2008).

Cerca de 20% do Mg total foliar encontra-se nos cloroplastos, e estes representam cerca de 5% do volume total de uma célula de folha madura. Do Mg presente nos cloroplastos, entre 10 e 20% fazem parte das clorofilas e o restante encontra-se na forma iônica, sendo que, na obscuridade, está presente nos espaços intratilacoidais. Com a iluminação dos cloroplastos, o elemento é secretado ao estroma, onde ativa diversas enzimas, como a frutose 1,6-difosfato 1-fosfatase, ribulose bifosfato carboxilase/oxigenase e glutamato sintetase (CASTRO; KLUGE; PERES, 2005; PRADO, 2008).

Na deficiência de Mg^{2+} , há, portanto, diminuição na síntese de clorofila e, conseqüentemente, na taxa fotossintética. Entretanto, a taxa fotossintética diminui mais drasticamente que o próprio teor de clorofila, evidenciando que a deficiência de Mg afeta a fotossíntese em outros passos, além de sua participação na composição do pigmento, a partir

de ligações covalentes. Salienta-se, também, que pequena parte do Mg acompanha o Ca na formação da parede celular (PRADO, 2008).

O magnésio ativa mais enzimas que qualquer outro nutriente mineral. Entre as mais importantes são aquelas envolvidas na transferência de energia via ATP. As ATPases atuam no complexo Mg-ATP mais do que no ATP sozinho, durante a transferência do grupo terminal fosfato da ATP, e na utilização da energia metabólica liberada durante essa transferência. O substrato para o tonoplasto H^+ -PP_iase, que catalisa a hidrólise de pirofosfato orgânico (PP_i) para bombear prótons em direção ao vacúolo, onde também efetua a transferência de energia, e o di-magnésio PP_i. O Mg também é fundamental na formação e manutenção das estruturas de RNA e DNA (CASTRO; KLUGE; PERES, 2005; EPSTEIN; BLOOM, 2006; PRADO, 2008).

Sabe-se, atualmente, que o Mg^{2+} atua como ativador enzimático das reações de regeneração da ribulose difosfato que é composto aceptor de CO_2 , ou seja, “o açúcar que aceita o CO_2 fixado fotossinteticamente” que ocorre no início do ciclo de Calvin, nos cloroplastos. O Mg, ao participar das reações que envolvem a fixação do CO_2 , pode inibir a fotossíntese mesmo com a presença da clorofila. E ainda, o nutriente proporciona a manutenção do pH ótimo para a enzima. E com essa ação enzimática do Mg, têm-se maior produção ou regeneração da ribulose difosfato, que seria um esqueleto de carbono que recebe o CO_2 fixado (PRADO, 2008).

O primeiro passo para a síntese de proteínas é a reação de ativação de aminoácidos. Ocorre incorporação de radicais fosfatos aos diferentes aminoácidos que passam da forma ativada (aminoacil), necessária à ligação ao RNAt, para a posterior incorporação à cadeia polipeptídica, mantendo, assim, a configuração necessária para a síntese proteica. O Mg^{2+} é necessário à transferência de energia aos aminoácidos pelas enzimas fosforilativas. Assim, o Mg, como cofator, beneficia diversas reações bioquímicas nas plantas, unindo os complexos de N e P. Existem evidências de que o Mg^{2+} atua na agregação das subunidades do ribossomo (CASTRO; KLUGE; PERES, 2005; PRADO, 2008), ou seja, promove a ligação do ribossomo e uma partícula necessária (SRP), responsáveis pela formação da cadeia polipeptídica e, assim, inicia-se a síntese proteica. Outra enzima importante no metabolismo do N, a sintetase do glutamato (GS), que atua na importante via da assimilação da NH_3 – GS/GOGAT, também é ativada pelo Mg^{2+} nos cloroplastos. Além disso, o Mg é necessário

para a atuação do RNA polimerase nuclear (Castro et al., 2005). Assim, nas plantas deficientes em Mg, à proporção que o N proteico decresce, aquele N não-proteico aumenta (CASTRO; KLUGE; PERES, 2005; HAEDER; MENGEL, 1969 apud PRADO, 2008).

Pereira (2001), avaliando doses de magnésio na solução nutritiva para o capim-mombaça, observou resposta quadrática no primeiro corte (ponto de máximo na dose de 2,5 mM) e linear no segundo para a produção de massa seca da parte aérea. A resposta da forrageira à aplicação de magnésio é incrementada quando os demais nutrientes estão em níveis adequados nas plantas.

Neste sentido, Consolmagno Neto et al. (2007) estudaram a aplicação de N e Mg em capim-tanzânia em solução nutritiva. Verificaram que as doses de potássio de 10,0 mM e de magnésio de 2,2 mM maximizaram a produção de massa seca da parte aérea. A relação entre essas doses de potássio e de magnésio é de 4,6:1. Corrêa (1996), avaliando a combinação entre doses de nitrogênio (3; 15 e 27 mM) e de magnésio (0,2 e 2 mM) em 3 cultivares de *Panicum maximum*, observou efeito significativo do suprimento de magnésio na produção de massa seca da parte aérea, somente quando utilizou doses mais elevadas de nitrogênio na solução nutritiva.

A deficiência de Mg pode ocorrer pela baixa concentração no meio de cultivo ou também pode ocorrer deficiência induzida pela competição com outros cátions, como o K. Como a maior parte do Mg da planta é móvel no floema, a deficiência aparece, inicialmente, nas folhas mais velhas, por meio de uma clorose internerval, podendo ser acompanhada por manchas amareladas que podem unir-se, formando faixas ao longo das margens da folha, as quais se tornam avermelhadas (ou com outra pigmentação). Em todo caso, a clorose inicia com manchas que depois se juntam e espalham para as pontas e margens das folhas (MALAVOLTA, 2006; PRADO, 2008; RAIJ, 2011).

Nas folhas, as células do mesófilo próximas aos feixes vasculares retêm clorofila por período mais prolongado do que as células do parênquima, o que pode retardar a aparição de clorose (EPSTEIN; BLOOM, 2006; PRADO, 2008).

Nas folhas, as células do mesófilo próximas aos feixes vasculares retêm clorofila por período mais prolongado do que as células do parênquima, o que pode retardar a aparição de clorose (EPSTEIN; BLOOM, 2006; PRADO, 2008). O acúmulo de carboidratos não-estruturais (amido, açúcares) é tipicamente uma característica de planta deficiente de Mg^{2+} .

Tewari et al. (2006) verificaram que a menor produção de matéria seca da amoreira, sob deficiência de Mg, esteve associada à diminuição do teor de carboidrato foliar, da quantidade de pigmento fotossintético e da taxa fotossintética. Além disso, aumentou a concentração de H_2O_2 e a atividade de enzimas antioxidante (peroxidase, dismutase), no sentido de diminuir o estresse oxidativo.

Além disso, a deficiência de Mg, pode induzir a descarboxilação de aminoácidos, formando a putrescina (BASSO; SMITH, 1974 apud PRADO, 2008), fato esse descrito também no K, o que poderia explicar a necrose foliar, tendo em vista que a putrescina é composto nitrogenado tóxico às plantas.

Monteiro et al. (1995) observaram, em *Brachiária brizantha* cv. Marandu, que a omissão de Mg provocou diminuição no teor do nutriente na parte aérea (0,2 g kg⁻¹) e na raiz (0,4 g kg⁻¹), comparado ao tratamento completo (parte aérea= 4,9 g kg⁻¹ e raiz=3,5 g kg⁻¹), resultando em diminuição significativa na produção de matéria seca das plantas e com sintomas em lâminas foliares com clorose internerval, além de mostrarem-se prostradas nas últimas duas semanas de avaliação (40-50 dias após o transplântio).

Primavesi et al. (2004) observaram que, em *Brachiária decumbens*, a ausência de calagem ou dose muito baixa provocou sintomas de deficiência e morte das plantas (teor de Mg na parte aérea=0,4 g kg⁻¹), comparada com a aplicação do calcário (teor de Ca na parte aérea=2,9 g kg⁻¹) no 18º corte, após a aplicação do material corretivo. As plantas forrageiras com baixos teores de magnésio podem promover baixos teores de magnésio sérico nos animais e, conseqüentemente, a tetania.

O fornecimento de magnésio em níveis excessivos resulta em deposição do elemento na forma de diferentes sais nos vacúolos celulares. São escassos os trabalhos descritos na literatura sobre os efeitos prejudiciais ao desenvolvimento e produção das plantas.

A maior quantidade de Mg aplicado inibe a absorção de Zn, por se tratar de elemento com valência, raio iônico e grau de hidratação e também do Ca (PRADO, 2008).

Mass et al. (1969), ao estudarem a influência do Mg na absorção de Mn em cevada, observaram que a inibição entre o Mg e Mn é do tipo não competitiva. Esse fato torna-se importante em áreas que receberam elevadas quantidades de calcário com alto teor de Mg, que prejudicaria a absorção dos micros Zn e Mn, por dois fatores, ou seja, pelo aumento do

pH e queda na sua disponibilidade no solo e também pelo fato da interação no processo de absorção.

Em cloroplastos isolados, a fotossíntese é inibida por 5 mM de Mg na solução externa. Essa inibição é causada por decréscimo no influxo de K. A inibição da fotossíntese pode ocorrer em função de altas concentrações de Mg no pool metabólico, em plantas inteiras, sob estresse causado por seca (Viiti et al., 2006).

2.4 Funções e sintomas de deficiência de enxofre nas plantas

O S é encontrado em aminoácidos (cistina, cisteína, metionina e taurina) e é constituinte de várias coenzimas e vitaminas, como a coenzima A, S-adenosilmetionina, biotina, vitamina B₁, ácido pantotênico, os quais são essenciais ao metabolismo (EPSTEIN; BLOOM, 2006; MALAVOLTA; MORAES, 2007; TAIZ; ZEIGER, 2013).

A principal forma de enxofre absorvido pelas plantas é a do sulfato (SO_4^{2-}) pelas raízes. Entretanto, as plantas utilizam o enxofre na forma gasosa, o SO_2 atmosférico, para atender a parte de suas necessidades. Nesse caso, as plantas captam por meio dos estômatos e depois o redistribuem para a planta inteira (EPSTEIN; BLOOM, 2006; PRADO, 2008).

Após a absorção do enxofre, desencadeia-se o processo de transporte, que ocorre de forma semelhante à forma absorvida, ou seja, predominantemente como sulfato (SO_4^{2-}). Entretanto, pequena proporção pode ser transportada na forma orgânica, porque uma fração é metabolizável para suprir esse órgão (PRADO, 2008).

O transporte do S da epiderme até a endoderme pode ocorrer de forma passiva pelo ELA (parede celular e espaços intercelulares) ou pelo interior das células, de forma ativa, graças aos seus prolongamentos citoplasmáticos (plasmodesmos). Da endoderme até o xilema, ocorre, necessariamente, um transporte ativo, devido à barreira existente na endoderme (estrias de Caspary). Após atingir o xilema, tem-se o transporte a longa distância, de forma passiva, até a parte aérea da planta (PRADO, 2008).

O S tem um papel fundamental na estrutura e regulação de proteínas, pois os grupos sulfurosos no aminoácido cisteína frequentemente formam pontes de bissulfeto que determinam a conformação da proteína afetando, deste modo, a atividade enzimática. Ele participa no transporte fotossintético e respiratório de elétrons, por meio de agrupamentos ferro-enxofre. Sítios catalíticos de várias enzimas e coenzimas como a urease e coenzima A

contêm enxofre. O S também faz parte de diversos compostos secundários(CASTRO; KLUGE; PERES, 2005; EPSTEIN; BLOOM, 2006).

A primeira etapa na síntese de compostos orgânicos que contem S é a redução do SO_4^{2-} em aminoácido cisteína. O SO_4^{2-} é muito estável e necessita ser ativado antes que as reações subsequentes possam prosseguir. A reação de ativação é energeticamente desfavorável, pois consome ATP. Depois da síntese de metionina, a partir da cisteína, o enxofre pode ser incorporado em proteínas e uma variedade de outros compostos, como acetil coenzima A e S-adenosil-metionina. Este último é importante na síntese do etileno e em reações envolvendo a transferência de grupos metil, como na síntese de lignina. (CASTRO; KLUGE; PERES, 2005; EPSTEIN; BLOOM, 2006).

O movimento do S nas plantas ocorre, basicamente, durante o transporte para a parte aérea, via xilema. A redistribuição do S, é muito pequena, sendo considerado, portanto, pouco móvel na planta. As folhas novas dependem mais do S absorvido que do S armazenado (MALAVOLTA, 2006; PRADO, 2008; RAIJ, 2011). As assimilações de N e S são bem coordenadas, com a deficiência de um ocorre repressão da via assimilativa do outro (EPSTEIN; BLOOM, 2006).

O S, assim como o N, é de extrema importância para a nutrição da planta forrageira (BONFIM-SILVA; MONTEIRO, 2010). A deficiência de S, demonstrada por apreciável número de culturas, acaba interferindo na quantidade absorvida de N e, como consequência, pode induzir a planta a desenvolver deficiência de N que, em muitos casos, acaba mascarando a deficiência de S (BATISTA; MONTEIRO, 2006). Por isso, os sintomas de deficiência de S são similares aos da deficiência de N, como clorose, redução do crescimento e acúmulo de antocianinas. No entanto, clorose causada pelo S geralmente aparecem de início em folhas novas e maduras, em vez de folhas velhas, como ocorre na deficiência de N (MALAVOLTA, 2006; RAIJ, 2011; TAIZ; ZEIGER, 2013). Malavolta e Moraes (2007) acrescentam que ainda pode ocorrer necrose e queda de folhas, encurtamento de internódios e diminuição do florescimento.

Mattos e Monteiro (2003) relataram diminuição de 23 % na produção de massa seca da parte aérea de capim-marandu na ausência de S comparando com tratamentos que usaram S e com quantidades de N semelhantes.

2.5 Avaliação do estado nutricional das plantas

De acordo com Fontes (2001), diagnosticar é conhecer e avaliar as suas condições sob o aspecto da nutrição mineral, que se justifica pela necessidade de manejar o programa de fertilização da cultura. Para o autor o manejo preciso da adubação traz vários benefícios. Para o meio ambiente porque reduz os níveis de acidificação do solo, eutrofização das águas, poluição do lençol freático e salinização de áreas. Beneficia o produtor pela maior produtividade e margem de lucro, também beneficia os agentes técnicos pela eficácia dos insumos vendidos, mesmo que não sejam fertilizantes (inclusive conhecimento e prestação de serviços), e finalmente, os consumidores pelas melhores características organolépticas dos produtos e, possivelmente, pelos menores preços.

O estado nutricional das plantas pode ser determinado por meio de procedimentos indiretos e diretos. Os indiretos são aqueles em que a concentração de certo nutriente na planta é estimada por características correlacionadas com as concentrações do nutriente na planta. Os diretos são realizados determinando as concentrações dos nutrientes na matéria seca do tecido vegetal. A análise da massa seca das folhas por meio de procedimentos químicos é conhecida como análise foliar (FONTES, 2001; MALAVOLTA, 2006).

A folha é o órgão da planta na qual as alterações fisiológicas provocadas por distúrbios nutricionais se tornam mais evidentes. Por isso, quase sempre os diagnósticos nutricionais das plantas são realizados nas folhas (BERTON, 1997; MALAVOLTA, 2006).

A premissa da diagnose foliar é a existência de relação significativa entre o suprimento de nutrientes e os níveis dos elementos nas folhas, o que, por sua vez estaria associado com as produções. No entanto, vários fatores podem afetar as concentrações foliares, além, evidentemente, da própria disponibilidade de nutrientes do meio de cultivo.

Dois fatores de grande importância apontados por Raij (2011), em relação a análise foliar, são a idade fisiológica e a parte da planta a ser amostrada. Nos tecidos novos, em geral, se observam concentrações muito elevadas de nutrientes. Porém, conforme a planta se desenvolve ocorre translocação de nutrientes para outras partes da planta. O P e metade dos macronutrientes são móveis na planta e as folhas mais jovens apresentam teores mais altos destes nutrientes do que nas folhas velhas. Ao passo que elementos que não são translocados das folhas velhas, como cálcio por exemplo, normalmente apresentam aumento relativo de concentração com o envelhecimento do tecido vegetal.

Para realização da análise química nas gramíneas forrageiras se utiliza as duas lâminas das folhas recém-expandidas (LR+1 e LR+2) de cada perfilho. Em nível de campo as recomendações variam de 30 a 50 lâminas foliares por hectare (MALAVOLTA, 2006; MONTEIRO, 2010). No entanto, trabalhos com avaliações indiretas em casa de vegetação têm utilizado entre 6 a 12 lâminas por parcela (ABREU; MONTEIRO, 1999; BONFIM et al., 2004; BATISTA; MONTEIRO, 2006, 2007; LAVRES JUNIOR; SANTOS JUNIOR; MONTEIRO, 2010).

Monteiro (2010) afirma existir três critérios de avaliação dos resultados de análise de tecidos vegetais e que esses são bem conhecidos e utilizados. São eles: NC, faixa de adequação e sistema integrado de diagnose e recomendação (DRIS).

A interpretação dos teores foliares pode ser realizada por meio de diferentes procedimentos ou métodos. No entanto, neste trabalho se optou pelo uso do nível crítico (NC) fisiológico e faixas de suficiência (MALAVOLTA, 2006).

2.6 Nível crítico na planta

Um dos critérios utilizados para interpretar a análise foliar é o NC, abaixo do qual os teores nas folhas estariam associados às perdas de produção. Acima do NC, os aumentos de concentração do nutriente em questão não mais acompanham os aumentos de produção ou de crescimento, configurando consumo de luxo. Caso as concentrações se elevem em demasia pode haver um momento em que a o crescimento decrescerá, caracterizando efeito tóxico do elemento (RAIJ, 2011).

Taiz e Zeiger (2013) afirmam que para o uso adequado da análise de tecido vegetal é necessário um entendimento das relações entre o crescimento vegetal, que se traduz em produtividade, e o conteúdo do nutriente presente em amostras de tecido da planta. Segundo os autores existem três zonas na curva de crescimento vegetal em resposta a concentrações crescentes de um elemento, que são: zona de deficiência, zona adequada e zona tóxica, exposto em Figura 1.

Na zona de deficiência os incrementos em concentração do nutriente resultam em aumentos de produtividade. Conforme o aumento continuado da disponibilidade de nutriente, a produtividade chegará a um ponto de não mais responder as elevações de oferta de nutriente, no entanto a concentração no tecido continuará aumentando. Nesse momento a planta atingiu a zona adequada (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Entre a zona de deficiência e a adequada existe a “concentração crítica” do nutriente, que pode ser definida como “o conteúdo mínimo de nutriente no tecido que se correlacionam com crescimento ou produtividade máximos”. À medida que a concentração no tecido aumenta além da zona adequada, a produtividade cai devido efeito de toxidez (zona tóxica) (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Figura 1 - Relacionamento entre o crescimento (ou produtividade) e o teor de nutrientes no tecido vegetal

Fonte: Taiz e Zeiger (2013)

Larcher (2000), também diz existir três estados nutricionais nas plantas: 1- deficiência nutricional, 2- estado nutricional adequado e 3- excesso de substâncias minerais. O autor continua dizendo: “sob deficiência mineral, as plantas são limitadas em seu crescimento e seu desenvolvimento é anormal. Se durante a principal fase de crescimento a absorção de minerais diminui em relação a produção de matéria seca, então a concentração de minerais no tecido vegetal também decresce. Como, para o metabolismo, o importante é a concentração de nutrientes, não a quantidade, sintomas de deficiência frequentemente aparecem durante a fase de rápido crescimento”.

Epstein e Bloom (2006) definem concentração crítica como a “concentração de um nutriente pouco abaixo do nível que permite o crescimento ótimo” (10% abaixo). Os autores também descrevem a existência de três zonas dentro da curva de resposta vegetal,

conforme Taiz e Zeiger (2013).

Para o capim-Marandu, foram encontrados poucos trabalhos que estabeleceram NC de P na planta. De 1,3 a 2,5 g.kg⁻¹ (GUSS et al. 1999 apud BONFIM et al., 2004), de 0,8 a 5,2 g.kg⁻¹ (BONFIM et al., 2004) e em trabalho de Da Silva et al. (2013) foi observado valores de 2,3 a 5,2 g.kg⁻¹, na matéria seca.

Para interpretação dos tores foliares de P, em faixas de suficiência, concentrações entre 0,8 e 3 g.kg⁻¹ de matéria seca pode ser considerada uma faixa de concentração adequada (WERNER et al., 1997).

2.7 Índice Espectral

É chamado de espectro eletromagnético as regiões espectrais da Radiação Eletromagnética (REM) conhecidas pelo homem (Figura 2). A REM deve ser vista como um espectro contínuo. Porém, o espectro eletromagnético foi arbitrariamente dividido pelo homem em intervalos de comprimentos de onda com base nos mecanismos físicos geradores da energia eletromagnética e nos mecanismos físicos de sua detecção. A nomenclatura de cada um dos intervalos foi feita em função do uso que o homem encontrou para as suas aplicações (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Um dos intervalos, faixas ou bandas de comprimentos de onda que é mais familiar é a faixa de luz visível da radiação solar, por ser aquela que o olho humano é capaz de detectar. O intervalo espectral da luz visível foi decomposto pela primeira vez em 1766 por Isaac Newton. Cada raio colorido tem o seu específico comprimento de onda. Foi a partir dessa experiência que o homem propôs a divisão do espectro eletromagnético (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Figura 2 – Espectro eletromagnético

Fonte: http://www.dpi.inpe.br/~carlos/Academicos/Cursos/Pdi/pdi_cores.html

A imagem digital gerada pelos sistemas sensores é discreta e constituída por um arranjo de elementos (dígitos) sobre a forma de malha ou grade regular. A área de cruzamento entre colunas e linhas dessa malha é chamada de pixel, do inglês “*picture element*”. A cada pixel é atribuído um valor numérico indicativo da intensidade da radiação eletromagnética denominada nível de cinza. Os níveis de cinza variam em tonalidades que vão do preto (nível mínimo = 0) ou branco (nível máximo = 255) (BENVENUTI, 2005; GONZALEZ; WOODS, 2011).

A imagem digital é, portanto, uma função bidimensional da intensidade de energia eletromagnética (EM) refletida, pela área “imageada”, representada por uma matriz $f(x, y)$, onde os valores de f são resultantes da intensidade (brilho) dos materiais da área correspondente ao pixel de coordenada (x, y) (CRÓSTA, 1993 apud BENVENUTI, 2005).

É importante ressaltar que o nível de cinza corresponde à média da intensidade da energia refletida ou emitida pelos diferentes materiais presentes no pixel (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008; GONZALEZ; WOODS, 2011). Uma imagem colorida é uma imagem multibanda ou multiespectral, em que a cor em cada ponto (x, y) é definida por meio de três grandezas: luminância, matiz e saturação. A luminância está associada com brilho da luz, o matiz com o comprimento de onda dominante e a saturação como grau de pureza do matiz. A maioria das cores visíveis pelo olho humano pode ser representada como uma combinação de bandas

das cores primárias vermelha (*red* – R), verde (*green* – G) e azul (*blue* – B) (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008).

Parte da radiação (luz) que incide sobre uma planta é refletida para atmosfera, outra parte é absorvida, tornando-se fisiologicamente eficaz e o restante é transmitido. A reflexão, a absorção e a transmissão da energia pelos tecidos vegetais dependem do comprimento de onda da radiação (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Moraes (2002) afirma que a vegetação sadia apresenta alta absorção da energia eletromagnética na região do espectro visível, que é capturada pela clorofila para a realização da fotossíntese. Dentro do espectro visível a absorção é mais fraca na região que caracteriza a coloração da vegetação (Figura 3). A alta reflectância no infravermelho próximo (750 a 1300 nm) é devido a estrutura celular, sendo que a partir deste comprimento de onda é o conteúdo de água na vegetação quem modula as bandas de absorção presentes no comportamento espectral desta (Figura 3).

Sobre a refletância da vegetação verde saudável, Shiratsuchi et al. (2014), afirmam que ela é determinada principalmente pela clorofila, que reflete em todo o espectro visível, mas tem seu ápice na faixa da luz verde (500-600 nm), e cuja absorção é máxima nas faixas espectrais da luz azul (400-500 nm) e da luz vermelha (600-700 nm). Isso ocorre porque os pigmentos fotossintéticos que coletam a luz usada na fotossíntese absorvem todos os comprimentos de onda de luz, exceto aqueles correspondentes ao verde (CASTRO; KLUGE; PERES, 2005).

Em plantas superiores, o pigmento mais importante é a clorofila *a*, no entanto, existem pigmentos acessórios como clorofila *b* e carotenoides amarelos e laranjas. De maneira geral o intervalo espectral considerado fotossinteticamente ativo vai de 400 a 700 nm. Os pigmentos acessórios, basicamente, atuam ampliando a capacidade de aproveitamento da luz pelas plantas, transferindo a energia absorvida para a clorofila *a* (CASTRO; KLUGE; PERES, 2005; TAIZ; ZEIGER, 2013). A maior absorção no azul ocorre a aproximadamente 430 nm e no vermelho a aproximadamente 660 nm (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Na vegetação, a principal banda de absorção está centrada em 650 nm, região visível da luz vermelha, situada em 630 nm a 690 nm. E a região de maior reflectância é no infravermelho próximo, nos comprimentos de onda de 760 nm a 900 nm (MENESES; ALMEIDA, 2012).

No comprimento de onda do infravermelho próximo: nesta região existe uma absorção pequena da REM e considerável espalhamento interno na folha. A absorção da água é geralmente baixa nessa região. A reflectância espectral é quase constante nessa região. Fatores externos à folha, como disponibilidade de água por exemplo, podem causar alterações na relação água-ar no mesófilo, podendo alterar a reflectância de uma folha nesta região. De maneira geral, quanto mais lacunosa for a estrutura interna foliar, maior será o espalhamento interno da radiação incidente, e conseqüentemente, maior será também a reflectância (PONZONI, 2002; CUNHA, 2004; BENVENUTI, 2005).

O alongamento e o fototropismo são regulados por receptores de luz azul, como o caroteno e a riboflavina (LARCHER, 1986; TAIZ; ZEIGER, 2012). Com relação à absorção de luz na região do visível, a clorofila se caracteriza como o fotorreceptor principal (65%) e os carotenos (6%) e xantofilas (29%) são os fotorreceptores auxiliares (BENVENUTI, 2005; CUNHA, 2004; PONZONI, 2002).

Um índice espectral é o resultado de operações matemáticas entre valores numéricos de pixels de uma ou mais bandas de uma imagem. As propriedades da reflectância em cada faixa do espectro eletromagnético podem ser melhor avaliadas realizando aritmética de bandas espectrais. Essas transformações são medidas da atividade da vegetação e utilizam em especial as faixas do visível e infravermelho próximo (NIR - *Near Infrared*, Infravermelho próximo) e são denominados de índices de vegetação (IV) (SHIRATSUCHI et al., 2014).

Figura 3 – Representação de assinatura espectral dos vegetais

Fonte: (STEFFEN, 2016)

Para minimizar a variabilidade causada por fatores externos, a reflectância espectral tem sido transformada e combinada em vários IV. Inúmeros índices de vegetação já foram desenvolvidos para diferentes finalidades. Pesquisadores no mundo inteiro usam as

características de absorção associadas com constituintes bioquímicos para avaliar as culturas em estudo. Assim, diferentes índices são utilizados na agricultura e são otimizados para avaliar um processo de interesse (SHIRATSUCHI et al., 2014).

A escolha do comprimento de onda mais adequado está relacionada às características que se deseja avaliar. Algumas vezes pode surgir o efeito de confusão, pois a refletância do dossel no NIR é fortemente dependente das propriedades estruturais (IAF), enquanto no visível é sensível as propriedades bioquímicas (clorofila). Para reduzir esse efeito, muitos estudos recentes demonstraram que a quantidade de clorofila da folha pode ser estimada através da combinação de diferentes índices espectrais. Assim, os IVs podem ser divididos em índices sensíveis à concentração do pigmento e índices estruturais, que podem ou não ser imunes à influência das propriedades óticas do solo (HABOUDANE et al., 2004; BRANDÃO, 2009 apud SHIRATSUCHI et al., 2014).

O NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - *Normalized Difference Vegetation Index*) é um bom exemplo. É um IV estrutural, muito utilizado para monitoramento agrícola, por apresentar forte correlação linear com o crescimento das culturas (MENESES; ALMEIDA, 2012; SHIRATSUCHI et al., 2014). Diversos trabalhos fizeram relação do NDVI com vários aspectos da vegetação, tais como: medida de índice de área foliar, determinação da porcentagem de cobertura do solo, estimativas da radiação fotossinteticamente ativa e evapotranspiração (CUNHA, 2004; EL-SHIKHA et al., 2007; MARTUSCELLO et al., 2009; SHIRATSUCHI et al., 2014).

2.8 Uso dos índices espectrais na avaliação nutricional de plantas

Milton, Eiswerth e Ager (1991) estudaram as alterações no comportamento espectral da soja, e observaram alterações nos padrões de reflectância de plantas deficientes em P. As alterações se concentraram na banda do 500 a 650 nm (espectro do verde e parte do vermelho), se mostrando maiores nas plantas deficientes em P. Esses resultados evidenciam o efeito da diminuição de aproveitamento da luz causada pela deficiência. De acordo com os autores não foi observado alteração de reflectância na região do infravermelho.

Em estudo realizado por Goel et al. (2003), utilizando 72 bandas do visível e do infravermelho de imagens aéreas, foi constatado que as regiões próximas de 498 nm e perto de 671 nm foram as mais adequadas para deficiência de nitrogênio.

Cunha (2004) avaliou o efeito dos níveis de irrigação e N no comportamento espectral (NDVI), da produção de MS e o Índice de área foliar do capim-Tanzânia. O autor observou alteração típica do IV, apresentando comportamento quadrático em relação ao incremento de N.

Com o objetivo de prever concentrações de P em grama batatais (*Paspalum notatum* cv. Bahia) e no solo, Bogrekci e Lee (2005) estudaram a absorvância espectral nas faixas do UV, visível e IR. Para solos com baixo P foi observado diminuição de absorvância mais acentuada nas regiões do R e IR.

Em se tratando de plantas forrageiras, diversas aplicações de utilidade para a produção animal têm sido estudadas, como estimativa de massa de forragem e composição bromatológica (PB, FDN e FDA), que, indiretamente, também podem refletir o estado de nutrição da planta. Seguindo essa linha de trabalho, Starks et al. (2006) trabalharam com reflectâncias do dossel de capim-bermuda (*Cynodon dactylon*) nas bandas do visível e infravermelho. Os pesquisadores concluíram que a razão do azul e vermelho (B/R) e a razão do infravermelho e vermelho (NIR/R) podem ser usados para a previsão das concentrações de proteína bruta e massa seca de forragem.

Baesso et al. (2007) avaliaram o status de N no feijoeiro utilizando índices espectrais do visível como descritores. Os autores concluíram que o uso dos índices das referidas bandas, quando associados, promoveu identificação satisfatória (Kappa de até 0,96) do nível de deficiência nutricional do macronutriente no feijoeiro.

Patil, Adsuland e Deshmukh (2007) investigaram a variação espectral da soja sob doses de N e P. No estudo foi comparado dois índices, NDVI e RVI, formados por bandas do vermelho e do infravermelho. Os dois índices foram recomendados para indicação do status nutricional da soja em N e P. No entanto, NDVI se mostrou mais sensível para detectar o status nutricional em N e P.

Júnior et al. (2008) utilizou IVs (NDVI, GNDVI e SAVI) para avaliar o status nutricional do capim-Braquiária. Os autores concluíram que os IVs foram capazes de detectar variação no status nutricional em Brachiaria.

Em trabalho com doses de N em feijoeiro, Abrahão et al. (2013) avaliaram índices espectrais do visível (R, G e B), de imagens coloridas, e outros 5 índices de vegetação (NDVI,

GNDVI, RS e MCARI1). Os melhores resultados de classificação, obtidos com a combinação dos índices das bandas R e B foi de $Kappa = 0,47$.

Silva Júnior et al. (2013) trabalharam com bandas do visível e do infravermelho para obtenção de índices de vegetação (NDVI, GNDVI e SAVI) para detectar estado nutricional de N em pastagem de capim-braquiária. Segundo os autores, o GNDVI foi o índice que melhor se correlacionou com SPAD, N foliar e matéria seca nas quatro alturas testadas. E os índices formados com a banda verde foram os mais eficientes.

Em trabalho com três variedades de milho sob doses de N e K, Silva (2015) chegou a obter Porcentagem de Acerto Global (PAG) de 100, ou seja, Kappa igual a 1,0 (melhor classificação possível) para doses de N utilizando índice do excesso de verde (Evd). Para doses de K, relatou o mais alto PAG igual a 90 e Kappa igual a 0,87, por meio de combinações entre índices de verde e vermelho.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do setor de Ciências Agrárias da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos – FZEA/USP, localizada em latitude 21°57'25,8" S e longitude 47°26'12,2" W. A altitude é de 634 metros e o clima do local é o subtropical do tipo Cwa, com inverno seco e verão quente e chuvoso, segundo a classificação climática de Köppen (OLIVEIRA; PRADO, 1984).

3.2 Casa de Vegetação

A casa de vegetação possui as dimensões de 6,0 m x 8,0 m, pé direito de 2,50 m com teto de duas águas revestido por filme de policarbonato e laterais revestidas de tela antiofídica. A orientação da cumeeira é leste-oeste, conforme Figura 4 A.

O sistema de aeração é composto por um compressor industrial da marca Schulz®, modelo MSW 60 MAX, linha de distribuição composta por tubos de pvc com diâmetro de

Figura 4 – Casa de vegetação – A, compressor de ar – B, linhas de distribuição de ar – C, regulador de pressão com purgador eletrônico – D.

Fonte: Própria autoria.

3/4 de polegada (pressão máxima 6 bar $\approx$ 87 psi), purgador eletrônico automático com válvula solenoide, mangueiras de PVC de cor laranja 6x9 mm e bicos aeradores (Figura 4 C e D).

3.2.1 Cultivo do capim-marandu e solução nutritiva

Para a fase inicial de desenvolvimento do capim-marandu foram utilizados vasos cilíndricos de plástico com volume de 3,6 L, contendo 2 L de solução nutritiva. Após crescimento satisfatório das raízes as plantas foram transplantadas para vasos de volume 7 L, contendo 6 L. As plantas foram fixadas com uso de espuma envolvendo o colo e prendendo-as em buracos feitos nas tampas dos vasos (Figura 5).

Figura 5 – Detalhes de fixação das plantas nos vasos A, B, C e D.

Fonte: Própria autoria

A semeadura do capim-marandu foi feita em bandejas plásticas com vermiculita expandida farelada, onde as plantas foram mantidas durante duas semanas após a emergência, irrigadas com água deionizada (Figura 6 A). Após esse período, de acordo com a uniformidade (duas lâminas expandidas), as plantas foram selecionadas e transplantadas para o vaso (figura 6 B a F). Nas duas primeiras semanas após o transplante se manteve as soluções

Figura 6 – Etapas do transplante do capim-marandu da sementeira para os vasos com solução nutritiva (A a F).

Fonte: Própria autoria

nutritivas com diluição de 50% da concentração recomendada com objetivo de promover adaptação das plantas ao meio de cultivo.

As soluções nutritivas dos vasos foram trocadas semanalmente e aeradas durante 10 segundos a cada 30 segundos. O volume de solução foi completado diariamente com água deionizada monitorando o valor do pH para mantê-lo entre 5,0 e 6,0 com HCl 1N e NaOH 1N (SILVA et al., 2014; ROMUALDO et al., 2014). A condutividade elétrica da solução era medida após preparo para se certificar que seus valores estivessem abaixo ou igual a de 1,5 mS.cm^{-1} , conforme recomendação de (FURLANI et al., 1999).

O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados com três repetições. Os tratamentos avaliados foram 4 doses do elemento estudado (P, Mg ou S) com 3 repetições, totalizando 12 vasos (unidades experimentais) por experimento. Uma vez que cada elemento foi avaliado em experimento independente.

3.2.2 Experimento com fósforo

As doses e fontes utilizadas no experimento do P foram: 0,06 mM, 0,20 mM, 1,0 mM e 2,0 mM, conforme *Tabela 1 e 2*.

Tabela 1 – Solução nutritiva utilizada no experimento do fósforo (P)

Sal ou Fertilizante	Solução estoque (g.L ⁻¹ H ₂ O)	Volume (ml.L ⁻¹)	Teores dos elementos na solução final					
			N	P	K	Ca	Mg	S
			mM					
1. KH ₂ PO ₄	136,09	1	-	1	1	-	-	-
2. KNO ₃	101,11	-	-	-	-	-	-	-
3. Ca(NO ₃) ₂ .5H ₂ O	254,16	4	8	-	-	4	-	-
4. MgSO ₄ .7H ₂ O	246,47	2	-	-	-	-	2	2
5. KCl	74,55	5	-	-	5	-	-	-
6. CaCl ₂ .2H ₂ O	147,01	1	-	-	-	1	-	-
7. NH ₄ H ₂ PO ₄	115,03	-	-	-	-	-	-	-
8. NH ₄ NO ₃	80,04	0,5	1	-	-	-	-	-
9. (NH ₄) ₂ SO ₄	132,14	2	4	-	-	-	-	-
10. MgNO ₃ .6H ₂ O	194,4	2	2	-	-	-	-	-
11. Micronutrientes*	-	1	-	-	-	-	-	-
12. Fe EDDHMA	28,75	4	-	-	-	-	-	-
Total de nutriente	-	-	15	1	6	5	2	2
			Fe	B	Mn	Zn	Cu	Mo
			μM					
			130,51	55,20	14,26	2,57	0,64	0,31

* – Em 1L: 3,43 g H₃BO₃; 2,88 g MnCl₂.4H₂O; 0,354 g ZnCl₂; 0,111 g CuCl₂; 0,06 g H₂MoO₄H₂O, conforme Silva et al. (2014) e Romualdo et al. (2014).

Tabela 2 – Doses na solução nutritiva do experimento do P (P)

Sal ou Fertilizante	Solução estoque (g.L ⁻¹ H ₂ O)	Doses de P (mM)			
		0,06	0,2	1	2
		(ml.L ⁻¹ de solução final)			
1. KH ₂ PO ₄	136,09	0,06	0,2	1	2
2. KNO ₃	101,11	-	-	-	-
3. Ca(NO ₃) ₂ .5H ₂ O	254,16	4	4	4	4
4. MgSO ₄ .7H ₂ O	246,47	2	2	2	2
5. KCl	74,55	5,94	5,8	5	4
6. CaCl ₂ .2H ₂ O	147,01	1	1	1	1
7. NH ₄ H ₂ PO ₄	115,03	-	-	-	-
8. NH ₄ NO ₃	80,04	0	0	0,5	0
9. (NH ₄) ₂ SO ₄	132,14	2	2	2	2
10. MgNO ₃ .6H ₂ O	194,4	2	2	2	2
11. Micronutrientes*	-	1	1	1	1
12. Fe EDDHMA	28,75	4	4	4	4

* – Em 1L: 3,43 g H₃BO₃; 2,88 g MnCl₂.4H₂O; 0,354 g ZnCl₂; 0,111 g CuCl₂; 0,06 g H₂MoO₄H₂O, conforme Silva et al. (2014) e Romualdo et al. (2014).

3.2.3 Experimento com enxofre

As doses e fontes utilizadas no experimento do enxofre foram: 0,12 mM, 0,4 mM, 2 mM e 4 mM, conforme *Tabela 3 e 4*.

Tabela 3 – Doses na solução nutritiva do experimento do enxofre (S)

Sal ou Fertilizante	Solução estoque (g.L ⁻¹ H ₂ O)	Doses de S (mM)			
		0,12	0,4	2	4
		(ml.L ⁻¹ de solução final)			
1. KH ₂ PO ₄	136,09	1	1	1	1
2. KNO ₃	101,11	-	-	-	-
3. Ca(NO ₃) ₂ .5H ₂ O	254,16	2,5	2,5	2,5	2,5
4. MgSO ₄ .7H ₂ O	246,47	-	-	-	-
5. KCl	74,55	5	5	5	5
6. CaCl ₂ .2H ₂ O	147,01	-	-	-	2,5
7. NH ₄ H ₂ PO ₄	115,03	-	-	-	-
8. NH ₄ NO ₃	80,04	1,4	1,1	0	0
9. (NH ₄) ₂ SO ₄	132,14	0,12	0,4	2	4
10. MgNO ₃ .6H ₂ O	194,4	2	2	2	2
11. Micronutrientes*	-	1	1	1	1
12. Fe EDDHMA	28,75	4	4	4	4

* – Em 1L: 3,43 g H₃BO₃; 2,88 g MnCl₂.4H₂O; 0,354 g ZnCl₂; 0,111 g CuCl₂; 0,06 g H₂MoO₄H₂O, conforme Silva et al. (2014) e Romualdo et al. (2014).

3.2.4 Experimento com magnésio

As doses e fontes utilizadas no experimento do magnésio foram: 0,12 mM, 0,4 mM, 2 mM e 4 mM, conforme Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - Doses na solução nutritiva do experimento do magnésio (Mg)

Sal ou Fertilizante	Solução estoque (g.L ⁻¹ H ₂ O)	Doses de Mg (mM)			
		0,12	0,4	2	4
		(ml.L ⁻¹ de solução final)			
1. KH ₂ PO ₄	136,09	1	1	1	1
2. KNO ₃	101,11	-	-	-	-
3. Ca(NO ₃) ₂ .5H ₂ O	254,16	5	5	5	3,5
4. MgSO ₄ .7H ₂ O	246,47	-	-	-	-
5. KCl	74,55	5	5	5	5
6. CaCl ₂ .2H ₂ O	147,01	-	1	1	1,5
7. NH ₄ H ₂ PO ₄	115,03	-	-	-	-
8. NH ₄ NO ₃	80,04	0,45	1,3	-	-
9. (NH ₄) ₂ SO ₄	132,14	2	2	2	2
10. MgNO ₃ .6H ₂ O	194,4	0,12	0,4	2	4
11. Micronutrientes*	-	1	1	1	1
12. Fe EDDHMA	28,75	4	4	4	4

* – Em 1L: 3,43 g H₃BO₃; 2,88 g MnCl₂.4H₂O; 0,354 g ZnCl₂; 0,111 g CuCl₂; 0,06 g H₂MoO₄H₂O, conforme Silva et al. (2014) e Romualdo et al. (2014).

3.3 Amostragens e processamentos

No total se efetuou quatro cortes, no entanto o primeiro não foi utilizado no presente trabalho, devido à falta de sintomas de deficiência, nas plantas que receberam as doses mais baixas, sendo, o primeiro corte, considerado como corte de uniformização. O primeiro corte dos experimentos com P e Mg foi realizado dia 19/11/2014 e o do experimento com S ocorreu no dia 04/12/2014. Dessa forma, os resultados mostrados e discutidos no presente trabalho são do segundo (2º C), terceiro (3º C) e quarto corte (4º C).

Para estabelecer o momento do primeiro corte foi adotado o critério de início de senescência, ou seja, quando a primeira folha (a mais velha) entrar em senescência.

As amostragens realizadas ocorreram nos dias 17/12/2014 (2º C), 21/01/2015 (3º C) e 18/02/2015 (4º C) para o experimento do P, nos dias 15/12/2014 (2º), 19/01/2015 (3º C) e 16/02/2015 (4º C) para o experimento do Mg e nos dias 13/01/2015 (2º C), 11/02/2015 (3º C) e 12/03/2015 (4º C) para o experimento do S. Foi amostrado material vegetal da parte aérea, LR da parte aérea para análise química, medidas de NDVI e imagens escaneadas das LR.

3.3.1 Parte aérea

Foram feitas amostragens de vinte e cinco LR, por vaso, para análise química e obtenção das imagens de doze lâminas foliares. Em seguida as folhas foram pesadas, lavadas em água deionizada de solução de ácido clorídrico (3,5 mL.L⁻¹) (PERYEA, 2005), acondicionadas em sacos de papel furados e levadas para estufas de ventilação forçada a 65 °C para obtenção do peso seco e armazenamento.

As análises químicas para determinação dos teores de minerais nas LR foram realizadas no Laboratório de Solos e Plantas do setor de Ciências Agrárias, de acordo com Bataglia et al. (1983). Os elementos quantificados foram: N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu e Zn.

Para medir o acúmulo de matéria seca da parte aérea (MSPA) de cada ciclo de crescimento de 30 dias do capim, foi colhida toda a parte aérea das plantas acima de 5 cm do colo das plantas, acondicionadas em sacos de papel furados e levadas para estufas de ventilação forçada a 65 °C para obtenção do peso seco e armazenamento. As massas das vinte e cinco LR também foram consideradas no acúmulo de massa seca.

3.3.2 Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)

As medidas de NDVI foram obtidas utilizando o sensor de lavoura portátil Greenseeker™, da Trimble, antes da retirada das LR das parcelas. As medições foram efetuadas a uma altura de 30 cm do topo do dossel da planta. Os valores de NDVI obtidos correspondem a média do dossel de cada vaso. O sensor era acionado por 15 segundos e fornecia o valor médio das leituras realizadas durante o período de tempo.

3.3.3 Imagens

3.3.3.1 Aquisição

As imagens digitais das LR 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). Oito LR de cada parcela foram digitalizadas de uma só vez. (ROMUALDO et al., 2014; SILVA et al., 2014).

3.3.3.2 Processamento

O processamento das imagens foi realizado com a colaboração do Prof. Dr. Murilo Mesquita Baesso do Departamento de Engenharia de Biossistemas. Foi utilizado sistema computacional MATLAB® R2012b para extração dos blocos das imagens, geração dos índices espectrais e classificação das imagens.

O processamento das imagens tem por objetivo extrair características das imagens, condensando as informações contidas nas mesmas, conforme os objetivos em questão. Assim, ao invés de se utilizar a imagem original se usa um vetor de características que represente a informação desejada (BAESSO et al., 2007; MENESES; ALMEIDA, 2012).

As características (índices espectrais) utilizadas foram calculadas de acordo com as equações abaixo:

$$EVd = \frac{2 \cdot Vd - Vm - Az}{Vm + Vd + Az} \quad (2)$$

$$Vern = \frac{Vm}{Vm + Vd + Az} \quad (3)$$

$$Vn = \frac{Vd}{Vm + Vd + Az} \quad (4)$$

$$Rvv = \frac{Vd}{Vm} \quad (5)$$

sendo,

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;

Vern - vermelho normalizado;

Vn - verde normalizado, e

Rvv - razão verde-vermelho.

As características descritas acima foram calculadas de 40 blocos de cada imagem com 8 LR, representando a reflectância da imagem das lâminas. Como são 12 imagens da LR 1+ e 12 imagens da LR 2+, por experimento, existem 24 imagens. Sendo assim temos, para cada LR, em cada corte, 480 blocos e somando os blocos das duas LR temos 960 blocos por corte. Desta maneira, foram extraídos de cada experimento 2.880 blocos nos três cortes avaliados. Cada bloco tem as dimensões de 9x9 pixels, sendo que cada pixel tem tamanho de 0,27mm.

Depois de extraídos os blocos foi realizado a extração dos índices espectrais conforme equações 2, 3, 4 e 5. Os vetores de características que foram utilizados como variável de entrada do classificador para reconhecer as doses de P, de S ou de Mg estão descritos na Tabela 7, abaixo.

Tabela 7 – Vetores de características (X) utilizados pelos classificadores para discriminar diferentes doses de P, de S ou de Mg no capim-marandu.

Um índice	Dois índices	Três índices	Quatro índices
X = 1	X = 1 e 2	X = 1, 2 e 3	X = 1, 2, 3 e 4
X = 2	X = 1 e 3	X = 1, 2 e 4	
X = 3	X = 1 e 4	X = 1, 3 e 4	
X = 4	X = 2 e 3	X = 2, 3 e 4	
	X = 2 e 4		
	X = 3 e 4		

3.3.3.3 Classificação

Foi utilizado o método de validação cruzada deixando um de fora para avaliação do erro de classificação (KHATTREE; NAIK, 2000 apud BAESSO et al., 2012). Após isso foi criada uma matriz de erros para que a avaliação do classificador seja feita por meio do coeficiente kappa (HUDSON & RAMM, 1987 apud BAESSO, et al. 2012).

A classificação de imagens digitais consiste em rotular os pixels de uma cena em classes pré-definidas ou não. O processo de rotulação de cada pixel é feito levando em consideração a proximidade do padrão do pixel, descrito com as n bandas espectrais, com o padrão determinado para uma classe (SWAIN, 1978; LILLESAND e KIEFER, 1994; MATHER, 1999 apud REIS, 2009).

Para classificação das imagens utilizando os índices espectrais como descritores foi utilizado classificador estatístico bayesiano proposto por Gonzalez e Woods (1992), utilizado por Baesso (2007) e Reis (2009). Logo abaixo segue função discriminante:

$$d_j(X) = \ln P(W_j) - \frac{1}{2} \ln(\det C_j) - \frac{1}{2} \left[(X - m_j)^T C_j^{-1} (X - m_j) \right] \quad (6)$$

sendo,

d_j = 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 característica;

$P(W_j)$ = probabilidade a priori da classe j; e

T = símbolo que representa a transposta de uma matriz.

Uma vez que se considerou a probabilidade de ocorrência igual para todas as classes, a equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$d_j(X) = -\frac{1}{2} \ln(\det C_j) - \frac{1}{2} \left[(X - m_j)^T C_j^{-1} (X - m_j) \right] \quad (7)$$

Foram desenvolvidas 5 funções discriminantes, uma para cada classe de estresse nutricional, de forma que um vetor desconhecido X foi atribuído à classe j , que apresentou o maior valor da função discriminante $d_j(X)$. O classificador estatístico também foi utilizado para a definição do melhor vetor de características (KHATTREE & NAIK, 2000 apud BAESSO et al., 2007; REIS, 2009).

Nesse processo, uma observação foi separada, e as funções discriminantes foram elaboradas com o restante dos dados (39 amostras), e, em seguida, a observação separada foi classificada. Esse procedimento foi repetido sucessivamente para cada amostra, ou seja, todas as 40 observações (4 tratamentos x dez repetições). A seguir, foi elaborada uma matriz de erro, conforme descrito por Congalton (1991).

A medida de desempenho da totalidade de classificação foi realizada calculando o percentual de acerto global (PAG) ou exatidão global. A PAG é um parâmetro estatístico simples de se obter, a partir de uma matriz de erro, porém é de elevada importância (CONGALTON, 1991; ZÚÑIGA, 2012). A PAG indica o total geral de acertos de classificação, no entanto, por ela não é possível saber em quais classes está ocorrendo maior erro de classificação. Seus valores variam de 0 a 100 e são obtidos da seguinte forma:

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

sendo,

CC - número de amostras classificadas corretamente;

n_t - número total de amostras.

Outra avaliação do desempenho dos classificadores foi determinada pelo índice Kappa de Cohen, que indica a concordância entre o acerto global e a verdade tomando em consideração que uma parte do acerto global gerado pelo classificador pode ser unicamente obtido pelo azar (ZÚÑIGA, 2012). O coeficiente Kappa foi estimado pela seguinte equação:

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

sendo,

$\hat{K}$ = 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); e

c = número total de doses.

A interpretação dos valores de índice Kappa foi feita de acordo com o critério desenvolvido por Landis e Koch (1977) para verificar a qualidade da classificação, de acordo com a Tabela 8 (BAESSO et al., 2007; REIS, 2009; ABRAHÃO et al., 2013).

Tabela 8 – Avaliação da classificação com base nos valores de 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

Fonte: Landis e Koch (1977)

Para comparar os resultados de classificação foi feito um teste Z a 5%, para assim, selecionar os melhores classificadores (CONGALTON e MEAD, 1983 apud ABRAHÃO et al., 2013; BAESSO et al., 2007b; REIS, 2009). O valor do Z calculado foi determinado pela seguinte equação:

$$Z = \frac{\hat{K}_1 - \hat{K}_2}{\sqrt{\text{var}(\hat{K}_1) + \text{var}(\hat{K}_2)}} \quad (10)$$

sendo,

Z = Valor de Z calculado;

$\hat{K}_1$ = Coeficiente Kappa 1;

$\hat{K}_2$ = Coeficiente Kappa 2;

$\text{var}(\hat{K}_1)$ = Variância do coeficiente Kappa 1;

$\text{var}(\widehat{K}_2) = \text{Variância do coeficiente Kappa 2.}$

A variância do índice Kappa foi determinada pela eq.(11) abaixo (BISHOP et al., 1975, citados por HUDSON & RAMM, 1987 apud ABRAHÃO et al., 2013; BAESSO et al., 2007b; REIS, 2009):

$$\text{var}(\widehat{K}) = \frac{1}{n} \left[\frac{\theta_1(1-\theta_1)}{(1-\theta_2)^2} + \frac{2(1-\theta_1)(2\theta_1\theta_2 - \theta_3)}{(1-\theta_2)^3} + \frac{(1-\theta_1)^2(\theta_4 - 4\theta_2^2)}{(1-\theta_2)^4} \right] \quad (11)$$

3.4 Nível crítico do elemento na solução nutritiva e na planta

A determinação do NC do nutriente na planta foi realizada com base na produção máxima relativa, estimada de acordo com o modelo de regressão ajustado aos dados. Uma vez estimado o ponto de máxima ou início da estabilização da curva de produção, se calculou 90% desse valor como sendo uma resposta do NC do elemento na planta (MALAVOLTA, 2006; RAIJ, 2011).

3.5 Análise dos dados

Os dados de MSPA, teor mineral na LR e NDVI resultaram de um ensaio com medidas repetidas no tempo, num delineamento casualizado em blocos. Foram analisados utilizando modelos lineares mistos através do PROC GLIMMIX (*Procedure for Generalized Linear Mixed Models*) do software estatístico SAS[®] University Edition (2015). Os fatores de efeito fixo foram Tratamento (doses de P, S e Mg em mM), Corte (2º, 3º e 4º) e interação tratamento x corte. Utilizando o critério de informação de Akaike selecionou-se a melhor estrutura de variâncias e covariâncias para explicar a possível heterocedasticidade de variâncias ao longo do tempo e a correlação entre as medidas repetidas. Após os testes de tendência o PROC REG para ajustar o modelo polinomial de primeira ou segunda ordem e o PROC NLIN (*Procedure for Nonlinear Model*) para ajustar o modelo broken-line com ascendência quadrática (BLAQ) e o modelo de Mitscherlich, quando os modelos polinomiais não se ajustaram bem aos dados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Experimento com fósforo

4.1.1 Produção, teor de minerais das lâminas recém-expandidas (LR) e sintomas de deficiência

Figura 1 - Curva de resposta de massa seca da parte aérea (MSPA) do capim-marandu em função doses de Fósforo.

O aumento de P na solução nutritiva promoveu incrementos significativos ($p < 0,05$) de MSPA em todos os cortes. Em todos os cortes houve comportamento quadrático dos dados, como era esperado. No 2º C foram observados valores médios de MSPA variando de 15,03 g até 56,83 g por vaso. No 3º corte o acúmulo médio foi de 11,60 a 69,13 g por vaso. E no 4º corte, as médias de MSPA foram de 18,67 a 121,10 g por vaso. Houve, efeito de cortes sobre o acúmulo de MSPA ($p < 0,05$), conforme Figura 7.

Os teores de P nas folhas responderam linearmente ($p < 0,05$) ao aumento de P na solução nutritiva, em todos os cortes. Para essa variável os teores variaram de 0,65 a 3,67 g.kg⁻¹, 0,47 a 3,03 g.kg⁻¹, 0,53 a 3,25 g.kg⁻¹, no 2º, 3º e 4º C, respectivamente (Figura 8). Martins (2010) ao trabalhar com capim-marandu sob doses de P em solução nutritiva variando de 0,1 a 2,1 mM observou resultados parecidos com o deste estudo. A autora relatou teores de P em LR entre 0,46 a 2,30 g.kg⁻¹, em dois cortes.

Figura 2 - Teores foliares do capim-marandu em função de doses de fósforo.

Na Figura 9 é possível observar os níveis críticos de P foliar no capim-marandu nos três cortes avaliados. Os valores encontrados para o 2º, 3º e 4º corte foram de 1,61, 1,85 e 1,89 g.kg⁻¹, respectivamente.

Figura 3 - Nível crítico (NC) de P no capim-marandu, por corte.

Os teores de macro e micronutrientes das LR's estão na Tabela 9. As concentrações dos nutrientes N, P, K, Mg, S e Mn foram afetadas pelas doses de P ($p < 0,05$). Houve também efeito de corte para os teores dos nutrientes citados e interação entre dose e corte para o K.

As plantas que receberam as doses de 6% (0,06 mM) e 20% (0,2 mM) de P apresentaram sintomas típicos de deficiência de P, conforme descrito por Epstein e Bloom (2006), Malavolta (2006) e PRADO (2008). Os sintomas observados foram:

desenvolvimento reduzido, baixo perfilhamento da parte aérea e cloroses pardas nas pontas e nas bordas das folhas velhas seguidas de necrose (Figura 10). Martins (2010) também observou redução do perfilhamento e crescimento com a dose baixa de P (0,1 mM) em solução nutritiva.

Tabela 9 - Teores de nutrientes encontrados em Lâminas Recém-expandidas (LR) do capim-marandu em função de doses de P.

Doses de P (mM)	g.kg ⁻¹						mg.kg ⁻¹				
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
2º Corte											
	*	*	*	ns	*	*	ns	ns	ns	*	ns
0,06	21,47 a	0,62 cA	16,50 bB	6,47	3,93 a	1,63 a	16,83	13,15	170,05	194,02 a	42,18
0,2	20,10 a	0,88 cA	16,85 abA	6,35	3,50 a	1,87 a	15,65	11,43	103,42	171,27 a	37,73
1	18,13 a	1,87 bA	17,50 abA	7,02	3,50 a	1,75 a	19,59	11,60	161,87	139,03 a	34,90
2	20,68 a	3,67 aA	20,20 aA	6,37	2,88 b	1,92 a	17,13	11,97	138,42	150,73 a	34,82
Média	20,10	1,77	17,76	6,55	3,45	1,79	17,30	12,04	143,44	163,76	37,40
3º Corte											
0,06	20,90 a	0,47 dA	21,92 aA	7,03	3,22 a	1,93 a	16,86	11,12	107,90	172,47 a	41,08
0,2	18,20 b	0,87 cA	15,55 bA	7,15	3,17 a	1,95 a	16,73	7,05	122,20	122,12 ab	37,02
1	17,17 b	1,62 bB	15,25 bB	6,42	3,00 a	1,82 a	21,74	8,28	108,65	75,18 b	37,42
2	20,57 a	3,03 a	15,07 bB	6,07	2,90 a	2,07 a	21,10	9,07	143,40	96,95 b	40,30
Média	19,21	1,50	16,95	6,67	3,07	1,94	19,11	8,88	120,54	116,68	38,95
4º Corte											
0,06	18,25 a	0,53 cA	21,08 aA	5,97	2,93 a	1,83 ab	16,09	11,55	116,75	187,63 a	36,05
0,2	18,00 a	0,92 cA	15,05 bA	6,40	2,18 b	1,53 b	17,83	12,23	112,25	196,38 a	32,03
1	17,22 a	2,20 bA	13,72 bB	6,98	2,24 b	1,70 ab	20,56	13,22	148,78	158,18 a	27,68
2	16,43 a	3,25 a	14,59 bB	6,78	2,21 b	2,17 a	17,42	12,17	157,75	124,13 a	29,15
Média	17,47	1,73	16,11	6,53	2,40	1,81	17,98	12,29	133,88	166,58	31,22

* – Significativo pelo teste Tukey (p<0,05), ns – não significativo. Médias seguidas de mesma letra minúscula, na coluna por corte, e maiúscula, nas doses iguais dos cortes, não diferem entre si pelo teste Tukey (p<0,05).

Tabela 10 – Faixas de teores de nutrientes adequados para *Brachiaria brizantha*.

N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
g/kg						mg/kg				
13 - 20	0,8 - 3	12 - 30	3 - 6	1,5 - 4	0,8 - 2,5	10 - 25	4 - 12	50 - 250	40 - 250	20 - 50

Fonte: Werner et al. (1997).

Apesar da conhecida relação de inibição existente entre P e Zn (LOPEZ G.; MALAVOLTA, 1974; MALAVOLTA, 2006; PRADO, 2008), não houve efeito (p<0,05) do aporte de P sobre os teores de Zn na LR do capim-marandu. Em estudo com capim-tanzânia, Manarin (2005) relatou efeito de aumento no teor de Zn em dose baixa de P (0,3 mM) e estabilização dos teores de Zn nas doses maiores a partir de 0,6 mM. A explicação dada pelo autor foi de que devido ao fato das plantas apresentarem menor crescimento nas doses mais baixas de fósforo, o Zn foi se acumulando nas folhas. Silva e Trevizam (2015) afirma que a

interação mais comum entre P e Zn ocorre quando, adicionando-se P ao solo, há diminuição na concentração de Zn na parte aérea, quando este se apresenta em teor limitante, o que não é caso.

Figura 4 - Desenvolvimento do capim-marandu em função de doses de Fósforo.

Fonte: Própria autoria

4.1.2 Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)

Os valores de NDVI em função das doses de P podem ser observados na Figura 11. As doses de P afetaram os valores de NDVI de maneira significativa ($p < 0,05$). Em todos os cortes foi observado comportamento quadrático do NDVI em relação ao acréscimo de P. No 2º C os valores variaram de 0,55 (6% de P) até 0,80 (200% de P). No 3º C as leituras foram de 0,71 (6% de P) a 0,83 (200% de P). E no 4º C foi observado que as respostas de NDVI ocorreram de 0,63 (6% de P) a 0,75 (200% de P). Também houve efeito de corte. Segundo fabricante do equipamento utilizado para estimativa do NDVI, Trimble Navigation Limited (2012), em culturas como milho e trigo podem ser encontrados valores entre 0,60 a 0,90, de acordo com a estação e idade das plantas.

Patil, Adsuland e Deshmukh (2007) encontraram valores de NDVI em plantas de soja bem nutridas (adubadas com N e P) que variam de 0,65 a 0,78. Neste mesmo estudo, os autores ainda relataram que os valores de NDVI foram maiores nas plantas que receberam fertilização e que os valores máximos foram atingidos durante o máximo vigor vegetativo da cultura, que ocorreu entre 55 e 76 dias após a semeadura. Tal situação é explicada pela alta e positiva correlação entre NDVI e produção de biomassa total (0,874) e área foliar (0,823), relatada no trabalho.

Figura 5 - Valores de NDVI do dossel de capim-marandu em função de doses de Magnésio.

Os valores aferidos de NDVI não se correlacionaram ($p < 0,05$) com acúmulo de MSPA e com P da LR. Os resultados corroboram com os encontrados por Rossato et al. (2012), que relataram não ter encontrado correlação entre o NDVI e N foliar em algodoeiro. Os autores explicam que provavelmente isso ocorreu devido a saturação ou “consumo de luxo” de N pelas plantas nas doses mais elevadas, uma vez que o N não incorporado às moléculas de clorofila não altera as propriedades de reflectância da cultura, o que reduz as correlações. O mesmo ocorreu em estudos de Cunha (2004) e Silva Júnior et al. (2008).

Da mesma forma, houve “consumo de luxo de P na dose 2 mM, pois mesmo com o incremento de P Foliar (Figura 8) o acúmulo de MS se mantém em mesmo patamar ou esboça ligeira queda (Figura 7). No entanto, o efeito direto do aporte de P, nas plantas, sobre o NDVI se dá, principalmente, no aumento do desenvolvimento da planta pela sua atuação no metabolismo energético (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; MALAVOLTA, 2006;

PRADO, 2008). Pois, quanto maior o acúmulo de tecido vegetal maior a reflectância na banda do infravermelho próximo, componente do NDVI que possui alta reflectância em tecidos vegetais (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010; SHIRATSUCHI et al., 2014). E o resultado disso é o aumento dos valores do índice NDVI.

4.1.3 Índices Espectrais

As análises das imagens foram realizadas por corte e LR. Os resultados de PAG e índice Kappa da LR+1 e LR+2, nos três cortes, estão expostos na Tabela 12. Os valores de índice Kappa que não apresentaram significância, ou seja, sem diferir de 0 pelo teste Z ($p < 0,05$), ou com resultado menor ou igual a 0 não foram comparados.

No segundo corte, os melhores índices obtiveram PAG de 65 e índice Kappa igual a 0,53. Há um ligeiro aumento nos resultados de PAG e Kappa (73 e 0,63) para a LR+2, sendo que valores Kappa a partir de 0,61 até 0,80 são considerados como classificação muito boa, de acordo com Landis e Koch (1977). Provavelmente, por ser uma folha mais velha, os sintomas de deficiência ficaram mais acentuados, o que permitiu melhor separação das classes pelo classificador estatístico. Nas duas Folhas as melhores classificações foram as que utilizaram três índices espectrais, a combinação entre Evd, Vern, Rvv.

Os valores de PAG e Kappa do 3º corte, tanto da LR+1 (63 e 0,50) quanto da LR+2 (75 e 0,67), respectivamente, se mantiveram parecidos ao do corte anterior. A mesma tendência de melhora na classificação utilizando a LR+2 também se repetiu neste corte. No entanto, as melhores classificações foram obtidas com elevado número de combinações (Tabela 12), sendo observada variação de PAG de 55 a 63 e valores de índice Kappa de 0,4 a 0,5, para os melhores classificadores. Na LR+2 o índice que proporcionou melhor classificação foi a combinação de Vern e Rvv, com valores de PAG igual a 75 e índice Kappa de 0,67.

Os maiores valores de PAG e de Kappa (70 e 0,60) do 4º C (Tabela 11) se mostraram iguais e em níveis elevados na LR+1 e LR+2. Na LR+1 o melhor vetor de característica foi o que na sua construção utilizou Evd e Vn, enquanto que na LR+2 a melhor classificação utilizou três índices (Evd, Vern e Vn). A utilização de mais de um índice para compor o vetor de características melhorou a classificação. Esse mesmo efeito foi observado em trabalhos de Baesso et al. (2007), Silva (2015) e Abrahão et al. (2013). O que demonstra que a

sobreposição de índices espectrais também pode facilitar a discriminação das classes de P avaliadas nesse trabalho, assim como tem ocorrido com experimentos que avaliaram classes de N.

No presente estudo, os classificadores estatísticos que proporcionaram valor de Kappa igual ou superior a 0,61 foram considerados como muito bons. Na Tabela 13, são apresentadas as frequências de ocorrência de classificadores com Kappa igual ou superior a 0,61 considerando os cortes, folhas e combinações de índices espectrais. Sob essa análise, o classificador formado pelos índices Evd, Vern, e Rvv e outro formado por Vern, Vn e Rvv se destacaram na discriminação de classes de P.

O vetor de característica formado por Evd, Vern e Rvv ocorreu 2 vezes de 6 (33,3%), com valores Kappa igual ou superior a 0,61, obtendo o melhor desempenho geral para o experimento com fósforo. A matriz de erro da classificação com o vetor em questão é apresentada na Tabela 11, onde é possível observar em quais classes houve maior confusão do classificador.

Tabela 11 - Matriz de erro de classificação utilizando o vetor de característica do Evd, Vern e Rvv para reconhecimento do status de fósforo no capim-marandu

Classes	0,06	0,2	1	2	EO
0,06	9	1	0	0	10
0,2	2	6	2	0	40
1	0	2	7	1	30
2	1	1	1	7	30
EI	25,0	40,0	30,0	12,5	

EI - Erro de inclusão (%), EO - Erro de omissão (%), Classes – Doses de P em mM

Na diagonal da matriz de erro se observa os acertos da classificação em cada classe. Desta forma, a classe em que houve maior acerto de classificação foi a correspondente a dose 0,06. Nas linhas e colunas estão os erros de omissão e de inclusão, respectivamente. Na classe 0,2 houve menor acerto na classificação em consequência da inclusão de 2 repetições na classe 0,06 e 2 na classe 1, resultando em um erro omissão de 40%. Ao mesmo tempo, o erro de inclusão ocorrido nesta classe foi o mais elevado, pois o classificador atribui como sendo dela, no mínimo, uma amostra das demais classes, resultando em um erro de omissão de 40%, conforme Tabela 11.

Ao comparar os melhores índices Kappa de cada folha em cada corte (Tabela 14), não foi constatada diferença significativa pelo teste Z ($p < 0,05$), entre folhas e entre cortes.

Os resultados encontrados nos permitem constatar que a utilização de índices espectrais possibilitou o reconhecimento da aplicação de doses de P no capim-marandu. Nas duas LR

Tabela 12 – Porcentagem de Acerto Global (PAG) e Índice Kappa obtidos da LR+1 e LR+2 sob doses de Fósforo (P).

2º Corte			3º Corte			4º Corte		
			LR+1					
Índices espectrais	PAG	Kappa	Índices espectrais	PAG	Kappa	Índices espectrais	PAG	Kappa
Evd, Vern e Rvv	65	0,53 a	Evd e Vern	63	0,50 a	Evd e Vn	70	0,60 a
Evd e Rvv	50	0,33 ab	Evd e Rvv	63	0,50 a	Evd, Vern, Vn e Rvv	68	0,57 a
Vern, Vn e Rvv	50	0,33 ab	Vern e Vn	63	0,50 a	Evd	65	0,53 ab
Vern e Rvv	48	0,30 ab	Vn e Rvv	63	0,50 a	Vn	65	0,53 ab
Rvv	45	0,27 b	Evd, Vern e Vn	63	0,50 a	Evd, Vern e Vn	65	0,53 ab
Evd e Vern	45	0,27 b	Vern e Rvv	60	0,47 a	Evd, Vern e Rvv	65	0,53 ab
Vn e Rvv	45	0,27 b	Evd, Vern e Rvv	58	0,43 a	Vern, Vn e Rvv	65	0,53 ab
Vern e Vn	40	0,20 bc	Evd, Vn e Rvv	58	0,43 a	Evd, Vn e Rvv	63	0,50 ab
Evd, Vern, Vn e Rvv	40	0,20 bc	Vern, Vn e Rvv	58	0,43 a	Evd e Vern	60	0,47 ab
Vern	35	0,13 bc	Evd	55	0,40 a	Vern e Vn	60	0,47 ab
Evd	33	0,10 bc	Vn	55	0,40 a	Vern e Rvv	60	0,47 ab
Evd, Vern e Vn	30	0,07 bc	Evd, Vern, Vn e Rvv	55	0,40 a	Evd e Rvv	58	0,43 ab
Evd, Vn e Rvv	30	0,07 bc	Vern	53	0,37 ab	Vn e Rvv	58	0,43 ab
Vn	25	0,00 c	Evd e Vn	50	0,33 ab	Vern	55	0,40 ab
Evd e Vn	20	-0,07 c	Rvv	38	0,17 b	Rvv	48	0,30 b
			LR+2					
Evd, Vern e Rvv	73	0,63 a	Vern e Rvv	75	0,67 a	Evd, Vern e Vn	70	0,60 a
Vern, Vn e Rvv	70	0,60 ab	Evd e Rvv	73	0,63 ab	Evd, Vn e Rvv	70	0,60 a
Evd, Vern, Vn e Rvv	65	0,53 ab	Vn e Rvv	73	0,63 ab	Evd e Vern	68	0,57 a
Vern e Vn	63	0,50 ab	Evd, Vern e Rvv	73	0,63 ab	Evd e Rvv	68	0,57 a
Evd, Vern e Vn	63	0,50 ab	Vern, Vn e Rvv	73	0,63 ab	Vern e Vn	68	0,57 a
Evd e Vern	60	0,47 ab	Evd, Vern, Vn e Rvv	73	0,63 ab	Vern e Rvv	68	0,57 a
Evd e Rvv	58	0,43 ab	Vern e Vn	70	0,60 ab	Vn e Rvv	68	0,57 a
Vn e Rvv	58	0,43 ab	Evd e Vern	70	0,60 ab	Evd, Vern e Rvv	68	0,57 a
Vern e Rvv	55	0,40 bc	Evd	68	0,57 ab	Vern, Vn e Rvv	68	0,57 a
Evd, Vn e Rvv	55	0,40 bc	Vn	68	0,57 ab	Evd, Vern, Vn e Rvv	68	0,57 a
Evd e Vn	48	0,30 bc	Evd, Vern e Vn	60	0,47 ab	Evd	65	0,53 a
Vern	45	0,27 bc	Vern	58	0,43 b	Vn	65	0,53 a
Evd	40	0,20 bc	Evd e Vn	58	0,43 b	Evd e Vn	65	0,53 a
Vn	40	0,20 bc	Evd, Vn e Rvv	58	0,43 b	Vern	55	0,40 ab
Rvv	38	0,17 c	Rvv	48	0,30 b	Rvv	45	0,27 b

LR – Lâmina recém-expandida; Evd - excesso de verde; Vern - vermelho normalizado; Vn - verde normalizado; Rvv - razão verde-vermelho. LR – Lâmina recém-expandida. Os Índices Kappa seguidos de mesma letra minúscula, na coluna, não diferem entre si pelo teste Z ($p < 0,05$).

Tabela 13 - Frequências de ocorrência de classificadores com Kappa igual ou superior a 0,61 para cada combinação de índices espectrais utilizados como vetor de características.

Índices Espectrais	Total*
Evd, Vern e Rvv	2
Evd e Rvv	1
Evd, Vern, Vn e Rvv	1
Vern e Rvv	1
Vern, Vn e Rvv	1
Vn e Rvv	1
Evd	0
Evd e Vern	0
Evd e Vn	0
Evd, Vern e Vn	0
Evd, Vn e Rvv	0
Rvv	0
Vern	0
Vern e Vn	0
Vn	0

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

* - Frequência de ocorrência máxima igual a 6 (3 épocas x 2 folhas).

Tabela 14 - Índice Kappa dos melhores resultados de classificação desenvolvidos no 2º, 3º e 4º Corte.

	2º Corte	3º Corte	4º Corte
LR+1	0,53 Aa	0,50 Aa	0,60 Aa
LR+2	0,63 Aa	0,67 Aa	0,60 Aa

Os Índices Kappa seguidos de mesma letra minúscula, na linha, não diferem entre si pelo teste Z, a 5% de probabilidade; os Índices Kappa seguidos de uma mesma letra maiúscula não diferem, na coluna, pelo teste Z, a 5% de probabilidade.

4.2 Experimento com enxofre

4.2.1 Produção, teor de minerais das lâminas recém-expandidas (LR) e sintomas de deficiência

Os resultados de acúmulo de MSPA em resposta as doses de S podem ser observadas na Figura 11. No 2º C a MSPA aumentou linearmente com o aporte de S ($p < 0,05$), com variação das médias entre 27,80 g, na dose 6% de S (0,2 mM) a 76,33 g, na dose 200% de S (4,0 mM). No 3º C e 4º C os dados apresentaram comportamento quadrático ($p < 0,05$) em função do acréscimo de S. No 3º C a menor média (29,13 g) foi proporcionada pela menor

Figura 6 - Curvas de massa seca de parte aérea (MSPA) em resposta a doses de Enxofre, do capim-marandu.

dose (6% de S) e a maior média (114,92) ocorreu com a dose 100% de S. No último corte ocorreu o mesmo efeito, no entanto a menor média foi 6,62 g e a maior 37,75 g.

Os teores de S nas LR foram elevados de maneira linear ($p < 0,05$) em função do incremento de S na solução nutritiva (Figura 12), sob esse aspecto não houve diferença significativa entre as lâminas LR+1 e LR+2. Apesar da redução significativa dos valores de S foliar com a redução no aporte de S, os teores permaneceram dentro e acima da faixa preconizada por Werner et al. (1997), que é de 0,8 a 2,5 g.kg⁻¹. A redução de MSPA observada no 3º C e 4º C, provocada pela dose 200%, é sinal de provável intoxicação por excesso de S, pois o aumento do nutriente no tecido vegetal não foi correspondido com aumento da produção, em todas as épocas.

Os níveis críticos de S nas LR do capim-marandu, obtidos por corte, podem ser observadas na Figura 13, tendo como valores de S que resultaram em 90% da produção máxima relativa igual a 1,92 g.kg⁻¹ para o 2º C, 2,0 g.kg⁻¹ para o 3º C e 1,88 g.kg⁻¹ para o 4º C. Fato semelhante ao observado no experimento do P ocorreu com os resultados do experimento do S, que foi a proximidade dos valores críticos mesmo com curvas de produção pouco parecidas.

Os teores de macro e micronutrientes encontrados na LR do capim-marandu, no experimento do S, estão expostos na Tabela 15. Os elementos N, P, K, Mg e S, tiveram suas concentrações alteradas significativamente ($p < 0,05$) em função das doses de S em solução nutritiva.

Figura 7 - Teores de S nas LRs de capim-marandu sob doses de enxofre

Para a interpretação do estado nutricional de S no capim-marandu, a faixa de suficiência preconizada parece ser muito ampla, abrangendo concentrações do nutriente em que as plantas, neste estudo, apresentaram sintomas de deficiência quando submetidas a tais condições (Figura 14).

Figura 8 - Nível crítico (NC) de S no capim-marandu, por corte

Tabela 15 – Teores de nutrientes em LR de capim-marandu sob doses de S.

Doses (mM)	g.kg ⁻¹					mg.kg ⁻¹					
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	*	*	*	ns	*	*	ns	ns	ns	ns	ns
2º Corte											
0,12	10,77 bB	2,58 aA	17,85 aB	4,03	3,37 aA	0,92 dA	17,16	16,17	179,63	81,52	23,32
0,4	10,93 bB	1,33 bcB	14,25 aB	4,40	2,32 bA	1,33 cB	19,81	18,45	266,57	52,73	25,65
2	15,48 aA	1,60 bB	17,98 aA	5,73	2,33 bA	2,37 bA	28,15	19,72	235,70	58,71	30,35
4	13,93 aC	0,90 cC	12,75 aB	6,40	1,68 bA	3,28 aA	18,61	18,57	243,05	60,37	32,25
Média	12,78	1,60	15,71	5,14	2,43	1,98	20,93	18,23	231,24	63,33	27,89
3º Corte											
0,12	13,64 bAB	2,77 aA	21,02 aB	6,73	1,63 aB	1,25 dA	14,16	15,63	236,07	208,41	45,91
0,4	15,11 bA	2,58 aA	17,83 aAB	6,13	1,85 aAB	1,73 cA	14,46	17,63	226,68	125,08	41,85
2	16,13 bA	1,70 bB	17,83 aA	5,08	1,85 aAB	2,17 bA	12,23	15,03	220,85	146,30	22,88
4	19,77 aB	1,57 bB	18,63 aA	4,43	1,82 aA	3,27 aAB	12,44	16,93	214,72	169,83	27,07
Média	16,16	2,15	18,83	5,60	1,79	2,11	13,32	16,31	224,58	162,41	34,43
4º Corte											
0,12	15,97 bcA	2,88 aA	27,30 aA	4,02	1,63 aB	1,02 dA	20,37	15,95	211,30	192,50	33,87
0,4	14,02 cA	2,65 bA	22,73 aA	5,50	1,73 aB	1,52 cAB	13,77	17,65	228,58	229,23	31,83
2	16,80 bA	2,33 cA	20,77 aA	4,95	1,58 aB	2,18 bA	10,83	19,65	195,00	244,45	44,07
4	23,05 aA	2,52 bA	23,52 aA	4,37	1,50 aA	2,95 aB	14,53	15,72	186,05	206,25	50,65
Média	17,46	2,60	23,58	4,71	1,61	1,92	14,88	17,24	205,23	218,11	40,10

* – Significativo pelo teste Tukey (p<0,05), ns – não significativo. Médias seguidas de mesma letra minúscula, na coluna por corte, e maiúscula, nas doses iguais dos cortes, não diferem entre si pelo teste Tukey (p<0,05).

O N foi o nutriente mais alterado com a supressão do S, sendo observado tendência de diminuição dos teores de N quando o aporte de S é escasso. Epstein e Bloom (2006) afirmam que existe uma coordenação e estreita relação entre o metabolismo dos dois nutrientes. O enxofre, assim como o nitrogênio, é de extrema importância para a nutrição da planta forrageira, por ser componente dos aminoácidos cisteína, cistina e metionina (CASTRO; KLUGE; PERES, 2005; PRADO, 2008; BONFIM-SILVA; MONTEIRO, 2010). Por isso, em muitos casos, a carência de S acaba induzindo a deficiência de N, mascarando a deficiência de S (BATISTA; MONTEIRO, 2006).

As doses de 0,12 (6%) e 0,4 (20%) mM de S provocaram sintomas típicos de deficiência. Os sintomas observados foram baixo perfilhamento, tamanho de folhas reduzido, baixo desenvolvimento geral e clorose generalizada, conforme Figura 14 e 15. Em trabalho de Oliveira et al. (2005), observaram sintomas de deficiência de S em pastagens de capim-marandu que não receberam aporte do nutriente, cujas concentrações foliares médias de S foram de 0,7 a 0,9 g.kg⁻¹.

Figura 9 - Desenvolvimento do capim-marandu em função de doses de enxofre

Fonte: Própria autoria

Figura 10 - Planta com deficiência de S - A, planta sem deficiência

Fonte: Própria autoria

Os teores de P e Mg apresentaram tendência de queda à medida que as doses de S aumentaram. Essa redução de concentração pode ser atribuída ao efeito de diluição, também observado por Batista e Monteiro (2010).

4.2.2 Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)

Os dados de NDVI em função das doses de S estão nas Figura 11, 12 e 13. As doses de S influenciaram os valores de NDVI de maneira significativa ($p < 0,05$). Em todos os cortes foi observado comportamento assintótico do NDVI em relação ao acréscimo de S. Os valores de NDVI, em função do fornecimento de S, melhor se ajustaram ao modelo Mitscherlich. Observando valores médios da ordem de 0,71 a 0,78, no 2° C, 0,74 a 0,86 no 3° C e 0,38 a 0,86 no 4° C.

Figura 11 - Valores de NDVI em função de doses de S em capim-marandu
2° Corte

Figura 12 - Valores de NDVI em função de doses de S em capim-marandu
3° Corte

Figura 13 - Valores de NDVI em função de doses de S em capim-marandu
4º Corte

Os valores aferidos de NDVI não se correlacionaram ($p < 0,05$) com acúmulo de MSPA e com P da LR, assim como ocorreu com o experimento com P. Observando os gráficos das figuras é possível notar saturação das respostas de NDVI nas doses 2 e 4 mM (CUNHA, 2004; ROSSATO et al., 2012).

4.2.3 Índices Espectrais

Os resultados de PAG e Índice Kappa das análises de imagem do experimento do S podem ser observados na tabela 17. Os valores encontrados de PAG e Índice Kappa do 2º C, na LR+1, não diferiram entre si pelo teste Z ($p < 0,05$), ao mesmo tempo, de acordo com avaliação de Landis e Koch (1977) os resultados de Índice Kappa observados evidenciam uma classificação razoável. O mesmo ocorreu na LR+2, sendo que a variação observada para PAG (53 a 40) e Índice Kappa (0,2 a 0,37) foi bem parecida com a ocorrida na lâmina anterior.

Melhores resultados foram observados na LR+1, no 3º C, cujos melhores valores de PAG e índice Kappa foi igual a 80 e 0,73, respectivamente. Os índices com melhor desempenho foram a combinação entre Evd e Vern, juntamente com o índice formado por Vern e Vn.

Nas classificações do 4ºC, os resultados da LR+1 e +2 se mostraram interessantes, apresentando valores de PAG e índice Kappa de até 78 e 0,70, na LR+1 e 90 e 0,87, na LR+2,

respectivamente. Vários índices proporcionaram classificações muito boas e excelentes neste corte, com destaque para as combinações de dois índices, nas duas LRs.

Os classificadores estatísticos que proporcionaram valor de Kappa entre 0,61 a 0,80 foram considerados como muito bons (LANDIS; KOCH, 1977). Na tabela 16, são apresentadas as frequências de ocorrência de classificadores com Kappa igual ou superior a 0,61 considerando os cortes, LR e combinações de índices espectrais. Sob esse aspecto, diversos classificadores formados por dois índices se destacaram. Da mesma forma, o classificador construído com os quatro índices avaliados ocorreu três vezes com índice Kappa acima de 0,61.

Os classificadores Evd e Rvv, Evd e Vern, Vern e Vn, Vn e Rvv, e o Evd, Vern, Vn e Rvv merecem destaque pelo elevado desempenho, por três vezes de seis, e por estar entre os melhores em todos os cortes (Tabelas 16 e 17). As matrizes de erro dos melhores classificadores estão apresentadas na Tabela 17. É possível observar que para cada classificação os erros e acertos para cada classe são diferentes, mesmo com valores de índice Kappa iguais, ou seja, enquanto um classificador acerta em determinada classe o outro pode incorrer em erro ou vice versa.

Tabela 16 - Frequências de ocorrência de classificadores com índice Kappa igual ou superior a 0,61 para cada combinação de índices espectrais utilizados como vetor de características.

Índices Espectrais	Total*
Evd e Rvv	3
Evd e Vern	3
Evd, Vern, Vn e Rvv	3
Vern e Vn	3
Vn e Rvv	3
Evd, Vern e Vn	2
Evd, Vn e Rvv	2
Rvv	2
Vern e Rvv	2
Vern, Vn e Rvv	2
Evd	1
Evd e Vn	1
Evd, Vern e Rvv	1
Vn	1
Vern	0

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

* - Frequência de ocorrência máxima igual a 6 (3 épocas x 2 folhas).

Tabela 15 – Porcentagem de Acerto Global (PAG) e Índice Kappa obtidos da LR+1 e LR+2 sob doses de Enxofre (S).

2º Corte			3º Corte			4º Corte		
LR+1								
Índices espectrais	PAG	Kappa	Índices espectrais	PAG	Kappa	Índices espectrais	PAG	Kappa
Evd	53	0,37 a	Evd e Vern	80	0,73 a	Evd e Vern	78	0,70 a
Vn	53	0,37 a	Vern e Vn	80	0,73 a	Evd e Rvv	78	0,70 a
Evd, Vern, Vn e Rvv	48	0,30 a	Evd e Rvv	78	0,70 ab	Vern e Vn	78	0,70 a
Evd e Vern	43	0,23 a	Vern e Rvv	78	0,70 ab	Vern e Rvv	78	0,70 a
Evd e Vn	43	0,23 a	Vn e Rvv	78	0,70 ab	Vn e Rvv	78	0,70 a
Evd e Rvv	43	0,23 a	Evd, Vern e Vn	78	0,70 ab	Vern, Vn e Rvv	78	0,70 a
Vern e Vn	43	0,23 a	Evd, Vn e Rvv	78	0,70 ab	Evd, Vern e Rvv	75	0,67 a
Vern e Rvv	43	0,23 a	Evd, Vern, Vn e Rvv	75	0,67 abc	Rvv	73	0,63 a
Vn e Rvv	43	0,23 a	Evd, Vern e Rvv	68	0,57 abc	Evd, Vern, Vn e Rvv	73	0,63 a
Rvv	40	0,20 a	Evd e Vn	65	0,53 abc	Evd, Vern e Vn	68	0,57 ab
Evd, Vern e Vn	40	0,20 a	Vern, Vn e Rvv	65	0,53 abc	Evd, Vn e Rvv	68	0,57 ab
Evd, Vn e Rvv	40	0,20 a	Vn	63	0,50 bcd	Evd	55	0,40 bc
Evd, Vern e Rvv	38	0,17 ns	Rvv	63	0,50 bcd	Vn	55	0,40 bc
Vern, Vn e Rvv	38	0,17 ns	Evd	60	0,47 cd	Evd e Vn	55	0,40 bc
Vern	33	0,10 ns	Vern	48	0,30 d	Vern	45	0,27 c
LR+2								
Evd	53	0,37 a	Rvv	60	0,47 a	Evd e Vern	90	0,87 a
Vn	53	0,37 a	Evd, Vern e Rvv	60	0,47 a	Evd e Rvv	90	0,87 a
Evd e Vern	53	0,37 a	Vern, Vn e Rvv	60	0,47 a	Vern e Vn	90	0,87 a
Evd e Vn	53	0,37 a	Evd e Vern	58	0,43 a	Vn e Rvv	90	0,87 a
Evd e Rvv	53	0,37 a	Evd e Rvv	58	0,43 a	Vern e Rvv	90	0,87 a
Vn e Rvv	53	0,37 a	Vn e Rvv	58	0,43 a	Evd, Vern e Rvv	88	0,83 ab
Evd, Vern, Vn e Rvv	53	0,37 a	Vern e Rvv	58	0,43 a	Vern, Vn e Rvv	88	0,83 ab
Vern e Vn	53	0,37 a	Vern e Vn	58	0,43 a	Evd, Vern e Vn	85	0,80 abc
Vern e Rvv	53	0,37 a	Evd e Vn	55	0,40 a	Evd, Vn e Rvv	85	0,80 abc
Evd, Vern e Rvv	48	0,30 a	Evd, Vern e Vn	55	0,40 a	Evd, Vern, Vn e Rvv	85	0,80 abc
Vern, Vn e Rvv	48	0,30 a	Evd, Vn e Rvv	53	0,37 a	Rvv	75	0,67 bcd
Evd, Vn e Rvv	45	0,27 a	Evd, Vern, Vn e Rvv	53	0,37 a	Evd	73	0,63 cd
Vern	43	0,23 a	Evd	48	0,30 a	Vn	73	0,63 cd
Evd, Vern e Vn	43	0,23 a	Vn	48	0,30 a	Evd e Vn	73	0,63 cd
Rvv	40	0,20 a	Vern	25	0,00	Vern	70	0,60 d

LR – Lâmina recém-expandida; Evd - excesso de verde; Vern - vermelho normalizado; Vn - verde normalizado; Rvv - razão verde-vermelho. LR – Lâmina recém-expandida. Os Índices Kappa seguidos de mesma letra minúscula, na coluna, não diferem entre si pelo teste Z (p<0,05).

Tabela 17 - Matriz de erro de classificação utilizando vários vetores de característica para reconhecimento do status de enxofre no capim-marandu

Evd e Rvv - Kappa = 0,87						Evd e Vern - Kappa = 0,87					
Classes	0,12	0,4	2	4	EO	Classes	0,12	0,4	2	4	EO
0,12	8	2	0	0	20	0,12	8	2	0	0	20
0,4	0	10	0	0	0	0,4	0	10	0	0	0
2	0	0	9	1	10	2	0	0	9	1	10
4	0	0	1	9	10	4	0	0	1	9	10
EI	0	16,7	10	10		EI	0	16,7	10	10	
Evd, Vern, Vn e Rvv - Kappa = 0,80						Vern e Vn - Kappa = 0,87					
Classes	0,12	0,4	2	4	EO	Classes	0,12	0,4	2	4	EO
0,12	9	1	0	0	10	0,12	8	2	0	0	20
0,4	0	9	0	1	10	0,4	0	10	0	0	0
2	0	0	7	3	30	2	0	0	9	1	10
4	0	0	1	9	10	4	0	0	1	9	10
EI	0	10	12,5	30,8		EI	0	16,7	10	10	
Vn e Rvv - Kappa = 0,87											
Classes	0,12	0,4	2	4	EO						
0,12	8	2	0	0	20						
0,4	0	0	0	0	0						
2	0	0	9	1	10						
4	0	0	1	9	10						
EI	0	16,7	10	10							

EI - Erro de inclusão (%), EO - Erro de omissão (%), Classes – Doses de P em mM

Uma tendência de melhora nos resultados de classificação ocorreu ao longo dos cortes, tanto na LR+1 quanto na LR 2+ (Tabela 18). Ao comparar os melhores índices Kappa de cada folha em cada corte, foi observado melhores resultados no 3º e 4º C, no entanto, em relação as LRs, houve diferença entre elas apenas no 3º C, pelo teste Z ($p < 0,05$).

Tabela 18 - Índice Kappa dos melhores resultados de classificação desenvolvidos no 2º, 3º e 4º Corte do experimento do S.

	2º Corte	3º Corte	4º Corte
LR+1	0,37 Ab	0,73 Aa	0,70 Aa
LR+2	0,37 Ab	0,47 Bb	0,87 Aa

Os Índices Kappa seguidos de mesma letra minúscula, na linha, não diferem entre si pelo teste Z ($p < 0,05$); os Índices Kappa seguidos de mesma letra maiúscula, na coluna, não diferem entre si pelo teste Z ($p < 0,05$).

Assim como ocorreu no experimento do P os resultados encontrados neste experimento do S. Dado os elevados acertos de classificação podemos afirmar que a utilização de índices espectrais possibilitou o reconhecimento do status de S no capim-marandu.

Assim como ocorreu no experimento do P os resultados encontrados neste experimento do S. Dado os elevados acertos de classificação podemos afirmar que a utilização de índices espectrais possibilitou o reconhecimento do status de S no capim-marandu.

4.3 Experimento do Mg

4.3.1 Produção, teor de minerais das lâminas recém-expandidas (LR) e sintomas de deficiência

As curvas de resposta de MSPA às doses de Mg foram expostas na figura 13. A variável MSPA foi sensível ao crescente fornecimento de Mg ($p < 0,05$). No 2º C e 4º C os dados se ajustaram ao modelo BLAQ e as medias do 3º C foram explicadas utilizando o modelo quadrático. Também houve efeito de corte. A variação de resposta no 2º C foi de 37,85 g (6% de Mg) a 49,78 g (200% de Mg). No 3º C foi observada medias variando de 66,89 g (6%) a 93,43 (200%). No último corte se observou respostas médias de 88,68 g (6%) a 156,74 g por vaso. Não se observou queda de MSPA neste experimento, em decorrência de altas doses de Mg. O que se observou, no início das rebrotas, foi o aparecimento de sintomas de deficiência de Ca, em decorrência da competição existente entre o Ca e Mg.

Os teores de Mg nas LRs foram elevados de maneira linear ($p < 0,05$) em função do incremento de Mg na solução nutritiva (figura 14), sob esse aspecto não houve diferença significativa entre as lâminas LR+1 e LR+2. Os valores de Mg foliar reduziram para níveis

Figura 14 – Teores de Mg nas LRs de capim-marandu em função de doses de Mg, em três cortes.

abaixo do mínimo da faixa preconizada por Werner et al. (1997), que é de 1,5 a 4,0 g.kg⁻¹ de MS, nas doses de 6 e 20% de Mg. As elevadas concentrações de Mg em tecido foliar explicam os sintomas de deficiência de Ca relatada, pois o aumento de Mg em solução nutritiva refletiu em acréscimos do nutriente na mesma proporção em tores foliares.

Os teores crescentes de Mg em LR provocaram incrementos significativos ($p < 0,05$) da MSPA em todos os cortes (figura 15). Os valores críticos de Mg, calculados para 90% da produção máxima foram: 2,54 g.kg⁻¹ no 2º C, 4,43 no 3º C e 3,81 no 4º C (figura 9). Com exceção do 2º C, os valores críticos de Mg estimados para o capim-marandu são muito próximo às concentrações proporcionadas pela dose 2 mM (100%), o que demonstra um bom ajuste entre as necessidades da planta e o aporte da solução. Utilizando a faixa de suficiência para interpretação dos teores de Mg é possível afirmar que o limite inferior preconizado (1,5 g.kg⁻¹) pode não ser o suficiente para expressar o potencial produtivo do capim-marandu, pois foi observado sintomas de deficiência em plantas que receberam as doses 0,12 mM (6%) e 0,4 (20%) mM em todos os cortes, com teores médios em LR variando de 0,42 g.kg⁻¹ a 1,28 g.kg⁻¹.

Figura 16 – Nível crítico (NC) para 90% produção máxima de massa seca da parte aérea (MSPA) de Mg no capim-marandu, por corte.

Com o fornecimento de 4 mM de Mg em solução nutritiva as concentrações médias de Mg em LR foram de 7,63 a 8,63 g.kg⁻¹, sendo observado sintomas de deficiência de Ca, principalmente até as duas primeiras semanas após o corte (figura 16 e figura 17).

Os teores de macro e micronutrientes encontrados nas LRs do capim-marandu, no experimento do Mg, estão expostos na tabela 19. Os teores de P, K, Mg, Cu e Zn foram

afetados significativamente ($p < 0,05$) pelas doses de Mg. Também houve efeito de corte. Para P e K houve tendência de queda em função do aumento de Mg, provavelmente devido efeito de diluição e inibição. Para Cu e Zn houve interação entre dose e corte ($p < 0,05$), conforme Tabela 19.

Moreira et al., (2006) verificaram correlação significativa positiva entre o fornecimento de Mg e teores de Mn e Fe na MSPA de alfafa. Não foi observado relação entre Mg foliar e os teores de Cu, Fe, Mn e Zn.

O sinergismo entre P e Mg, se dá pois se o Mg atua como um carregador de P, como resultado da participação do Mg na ativação de ATPases da membrana responsáveis pela absorção iônica (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; MALAVOLTA, 2006; SILVA; TREVIZAM, 2015).

Figura 17 - Desenvolvimento do capim-marandu em função de doses de Mg – A, planta saudável – B, planta deficiente – C.

Fonte: Própria autoria

Tabela 19 - Teores de nutrientes em LR de capim-marandu sob doses de Mg

Doses	g.kg ⁻¹						mg.kg ⁻¹				
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	ns	*	*	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	*
2º Corte											
6% Mg	17,78	3,10 a	32,98 a	5,28	0,65 c	1,58	21,93	13,95 bA	217,47	180,02	50,27 aA
20% Mg	17,80	2,55 a	29,88 ab	6,65	0,82 c	1,83	23,94	17,18 aA	186,85	252,78	53,38 aA
100% Mg	17,25	2,75 a	27,45 b	6,35	3,78 b	1,60	14,11	12,28 bcA	246,75	231,83	52,15 aA
200% Mg	17,05	2,80 a	22,88 c	6,47	8,63 a	1,85	22,18	11,52 cA	165,63	257,42	52,72 aA
Média	17,47	2,80	28,3	6,19	3,47	1,72	20,54	13,73	204,17	230,51	52,13
3º Corte											
6% Mg	14,22	2,37 a	21,43 ab	5,80	0,42 c	1,80	22,25	11,87 aA	118,92	199,38	45,83 aA
20% Mg	14,10	1,83 b	22,87 a	5,95	0,55 c	1,52	24,61	13,10 aB	218,90	223,48	34,42 bB
100% Mg	13,84	1,97 ab	18,98 ab	6,37	4,00 b	1,38	20,67	8,82 bB	253,63	152,95	34,30 bB
200% Mg	15,70	1,58 b	17,52 b	6,12	8,28 a	1,65	23,80	10,27 abA	254,77	168,55	34,82 bB
Média	14,46	1,98	20,2	6,06	3,31	1,59	22,83	11,01	211,55	186,09	37,34
4º Corte											
6% Mg	16,58	1,82 a	22,07 a	7,27	0,77 c	1,68	12,29	7,28 aB	200,38	74,58	28,12 aB
20% Mg	14,15	1,32 b	18,98 ab	7,78	1,28 c	1,73	11,22	5,32 aC	154,10	73,00	25,80 aC
100% Mg	13,96	1,25 b	16,53 b	6,37	3,90 b	1,82	13,09	5,95 aC	154,00	67,37	27,75 aC
200% Mg	13,53	1,25 b	17,52 b	6,73	7,63 a	1,77	11,72	5,53 aB	175,73	57,45	27,47 aC
Média	1,41	18,78	7,04	3,52	1,75	12,08	6,02	171,05	68,10	27,28	14,56

* – Significativo pelo teste Tukey ($p < 0,05$), ns – não significativo. Médias seguidas de mesma letra minúscula, na coluna por corte, e maiúscula, nas doses iguais dos cortes, não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

4.3.2 NDVI

Não foi observado efeito significativo ($p < 0,05$) de doses de Mg sobre os valores de NDVI em capim-marandu.

4.3.3 Índices Espectrais

Os resultados de PAG e Índice Kappa das análises de imagem do experimento do Mg podem ser observados na tabela 21. Os valores de PAG e índice Kappa do 2º C, na LR+1, podem ser considerados como ruim e péssimo, pois apenas um (Vern) apresentou classificação diferente de uma classificação aleatória (LANDIS; KOCH, 1977). Os resultados do 3º C foram de ruim a bons, mas sem destaque para nenhum índice, uma vez que não houve diferença entre eles pelo teste Z ($p < 0,05$).

Melhores resultados foram observados no 4º C, cujos melhores valores de PAG e índice Kappa foi igual a 73 e 0,63, respectivamente, para a Lr+1. Na LR+2 deste corte se observou os maiores valores de PAG e índice Kappa do experimento, 85 e 0,80. Os índices

com melhor desempenho foram a combinação entre Vern e Vn, na LR+1, e Evd, Vern, Vn e Rvv na LR+2.

Na Tabela 20, são apresentadas as frequências de ocorrência de classificadores com Kappa igual ou superior a 0,61 considerando os cortes, folhas e combinações de índices espectrais. Sob esse aspecto, diversos classificadores formados dois índices se destacaram. O vetor de característica Vern e Vn se destacou como o que mais ocorreu com valores satisfatórios de índice Kappa. Se mostrando o mais promissor no reconhecimento do status de Mg em capim-marandu.

Tabela 20 - Frequências de ocorrência de classificadores com índice Kappa igual ou superior a 0,61 para cada combinação de índices espectrais utilizados como vetor de características.

Índices Espectrais	Total*
Vern e Vn	2
Evd	1
Evd e Vern	1
Evd e Vn	1
Evd, Vern, Vn e Rvv	1
Rvv	1
Vn	1
Evd e Rvv	0
Evd, Vern e Rvv	0
Evd, Vern e Vn	0
Evd, Vn e Rvv	0
Vern	0
Vern e Rvv	0
Vern, Vn e Rvv	0
Vn e Rvv	0

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

* - Frequência de ocorrência máxima igual a 6 (3 épocas x 2 folhas).

Na Tabela 22 está exposto a matriz de erro do vetor de característica com melhor desempenho de classificação, considerando todas as épocas e duas LR. A classe mais problemática para a classificação foi a da dose 0,2 mM, pois a mesma apresentou o maior erro de omissão e erro de inclusão. Uma confusão com a dose de 0,12 mM provavelmente ocorreu devido a sua proximidade, no entanto houve uma considerável inclusão da dose 2 para a dose 0,4 sem que haja uma proximidade parecida.

Tabela 20 – Porcentagem de Acerto Global (PAG) e Índice Kappa obtidos da LR+1 e LR+2 sob doses de Magnésio (Mg).

2º Corte			3º Corte			4º Corte		
LR+1								
Índices espectrais	PAG	Kappa	Índices espectrais	PAG	Kappa	Índices espectrais	PAG	Kappa
Vern	43	0,23 a	Evd, Vern e Rvv	55	0,40 a	Vern e Vn	73	0,63 a
Evd, Vern e Vn	35	0,13 ns	Vern, Vn e Rvv	55	0,40 a	Evd, Vern, Vn e Rvv	60	0,47 ab
Vn	33	0,10 ns	Evd, Vern, Vn e Rvv	48	0,30 a	Evd, Vern e Vn	58	0,43 ab
Rvv	33	0,10 ns	Evd e Vern	45	0,27 a	Evd	55	0,40 bc
Evd e Vern	33	0,10 ns	Vern e Vn	45	0,27 a	Evd, Vn e Rvv	53	0,37 bc
Evd e Rvv	33	0,10 ns	Evd e Rvv	43	0,23 a	Evd e Vern	48	0,30 bc
Vern e Rvv	33	0,10 ns	Vn e Rvv	43	0,23 a	Vern e Rvv	48	0,30 bc
Evd	28	0,03 ns	Evd, Vn e Rvv	43	0,23 a	Vn e Rvv	48	0,30 bc
Evd, Vern e Rvv	28	0,03 ns	Rvv	40	0,20 a	Evd e Vn	45	0,27 bc
Evd, Vn e Rvv	28	0,03 ns	Vern e Rvv	40	0,20 a	Evd e Rvv	45	0,27 bc
Vern e Vn	25	0,00	Evd, Vern e Vn	40	0,20 a	Evd, Vern e Rvv	43	0,23 bc
Vn e Rvv	25	0,00	Evd	33	0,10 ns	Vern, Vn e Rvv	43	0,23 bc
Vern, Vn e Rvv	25	0,00	Vn	33	0,10 ns	Vern	40	0,20 c
Evd, Vern, Vn e Rvv	25	0,00	Evd e Vn	33	0,10 ns	Vn	35	0,13 ns
Evd e Vn	18	-0,10	Vern	25	0,00	Rvv	35	0,13 ns
LR+2								
Evd, Vern e Rvv	68	0,57 a	Evd, Vn e Rvv	60	0,47 a	Evd, Vern, Vn e Rvv	85	0,80 a
Vern, Vn e Rvv	68	0,57 a	Evd	58	0,43 a	Evd	75	0,67 ab
Evd e Vern	65	0,53 ab	Vn	58	0,43 a	Vn	73	0,63 abc
Vern e Vn	65	0,53 ab	Evd, Vern e Vn	58	0,43 a	Rvv	73	0,63 abc
Evd e Rvv	63	0,50 ab	Vern	53	0,37 a	Evd e Vern	73	0,63 abc
Vn e Rvv	63	0,50 ab	Evd e Vern	53	0,37 a	Evd e Vn	73	0,63 abc
Evd, Vern e Vn	63	0,50 ab	Vern e Vn	53	0,37 a	Vern e Vn	73	0,63 abc
Vern e Rvv	60	0,47 abc	Vern e Rvv	53	0,37 a	Evd e Rvv	70	0,60 bcd
Evd, Vn e Rvv	60	0,47 abc	Evd, Vern, Vn e Rvv	50	0,33 a	Vn e Rvv	70	0,60 bcd
Rvv	58	0,43 bcd	Evd e Rvv	48	0,30 a	Vern e Rvv	70	0,60 bcd
Evd, Vern, Vn e Rvv	58	0,43 bcd	Vn e Rvv	48	0,30 a	Evd, Vern e Vn	68	0,57 bcd
Evd	43	0,23 cd	Evd e Vn	45	0,27 a	Evd, Vn e Rvv	65	0,53 bcd
Vn	43	0,23 cd	Evd, Vern e Rvv	45	0,27 a	Evd, Vern e Rvv	58	0,43 cd
Evd e Vn	40	0,20 d	Vern, Vn e Rvv	45	0,27 a	Vern, Vn e Rvv	58	0,43 cd
Vern	33	0,10 ns	Rvv	23	-0,03	Vern	55	0,40 d

LR – Lâmina recém-expandida; Evd - excesso de verde; Vern - vermelho normalizado; Vn - verde normalizado; Rvv - razão verde-vermelho. LR – Lâmina recém-expandida. Os Índices Kappa seguidos de mesma letra minúscula, na coluna, não diferem entre si pelo teste Z ($p < 0,05$).

Tabela 22 - Matriz de erro de classificação utilizando o vetor de característica do Vern e Vn para reconhecimento do status de magnésio no capim-marandu

Classes	0,12	0,4	2	4	EO
0,12	7	3	0	0	30
0,4	3	4	2	1	60
2	0	2	8	0	20
4	0	0	0	10	0
EI	30,0	55,6	20,0	9,1	

EI - Erro de inclusão (%), EO - Erro de omissão (%), Classes – Doses de magnésio em mM

Ao comparar os melhores índices Kappa de cada folha em cada corte, foi observado melhores resultados no 4º C, no entanto em relação as LR_s, houve diferença entre elas apenas no 2º C, pelo teste Z ($p < 0,05$) (Tabela 23). Assim como no experimento do S, foi significativa a melhora da classificação no decorrer dos cortes.

Tabela 23 - Índice Kappa dos melhores resultados de classificação desenvolvidos no 2º, 3º e 4º Corte do experimento do S.

	2º Corte	3º Corte	4º Corte
LR+1	0,23 Bb	0,40 Ab	0,63 Aa
LR+2	0,57 Ab	0,47 Ab	0,80 Aa

Os Índices Kappa seguidos de mesma letra minúscula, na linha, não diferem entre si pelo teste Z ($p < 0,05$); os Índices Kappa seguidos de mesma letra maiúscula, na coluna, não diferem entre si pelo teste Z ($p < 0,05$).

Assim como ocorreu no experimento do P e do S os resultados encontrados neste experimento do Mg, podemos afirmar que a utilização de índices espectrais possibilitou o reconhecimento do status de Mg no capim-marandu.

5 CONCLUSÕES

A curva de resposta de MSPA e teores de macronutrientes (P, S e Mg), em lâminas recém-expandidas, foram afetados pelas doses de P, S e Mg em solução nutritiva de maneira a manifestarem sintomas típicos de deficiência.

Os níveis críticos médios, na planta, de P, S e Mg encontrados neste estudo para o capim-marandu são 1,80, 1,90 e 3,60 g.kg⁻¹, respectivamente.

O índice NDVI apresentou resposta quadrática e assintótica para doses de P e S, respectivamente. Sua resposta está fortemente vinculada ao acúmulo de matéria seca da planta.

A utilização de índices espectrais do visível possibilitou o reconhecimento do estado status de P, S e Mg no capim marandu.

Os melhores resultados de classificação foram obtidos com a utilização de mais de um índice espectral no vetor de características do classificador.

REFERÊNCIAS

- ABRAHÃO, S. A.; DE CARVALHO PINTO, F. de A.; DE QUEIROZ, D. M.; SANTOS, N. T.; DE SOUZA CARNEIRO, J. E. Determination of nitrogen and chlorophyll levels in bean-plant leaves by using spectral vegetation bands and indices. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 44, n. 3, p. 464–473, 2013.
- 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 industria Animal**, v. 56, n. 2, p. 137–146, 1999.
- BAESSO, M. M.; PINTO, F. D. A. D. C.; QUEIROZ, D. M. DE; VIEIRA, L. B. DE; ALVES, E. A. DETERMINAÇÃO DO “STATUS” NUTRICIONAL DE NITROGÊNIO NO FEIJOEIRO UTILIZANDO IMAGENS DIGITAIS COLORIDAS. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 2, p. 520–528, 2007.
- BAESSO, M. M.; VARELLA, C. A. A.; MARTINS, G. A.; BRANDELERO, A. J. M.; EVANDRO. Determinação do nível de deficiência nutricional de nitrogênio no feijoeiro utilizando redes neurais artificiais. **Engenharia na agricultura**, v. 20, n. 6, p. 512–518, 2012.
- BATISTA, K.; MONTEIRO, F. A. Sistema radicular do capim-marandu, considerando as combinações de doses de nitrogênio e de enxofre. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 30, n. 5, p. 821–828, 2006.
- BATISTA, K.; MONTEIRO, F. A. Nitrogen and sulphur in marandu grass - relationship between supply and concentration in leaf tissues. **Sci. Agric**, v. 64, n. 1, p. 44–51, 2007.
- BATISTA, K.; MONTEIRO, F. A. VARIAÇÕES NOSTEORES DE POTÁSSIO, CÁLCIO E MAGNÉSIO EM CAPIM-MARANDU ADUBADO COM DOSES DE NITROGÊNIO E DE ENXOFRE (1). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 151–161, 2010.
- BENVENUTI, F. A. **Relação de índices espectrais de vegetação com a produtividade da cana-de-açúcar e atributos edáficos**. 2005. Universidade Estadual de Campinas . Faculdade de Engenharia Agrícola, 2005. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000386532>>.
- BERTON, R. S. Composição química de plantas e diagnose foliar. In: RAIJ, B. VAN; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o estado de são paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônômico / Fundação IAC, 1997. p. 285.
- BOGREKCI, I.; LEE, W. S. Spectral Phosphorus Mapping using Diffuse Reflectance of

Soils and Grass. **Biosystems Engineering**, v. 91, n. 3, p. 305–312, jul. 2005. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1537511005000814>>. Acesso em: 27 jun. 2016.

BONFIM, E. M. S.; FREIRE, F. J.; SANTOS, M. V. F.; SILVA, T. J. A.; FREIRE, M. B. G. S. Níveis críticos de fósforo para brachiaria brizantha e suas relações com características físicas e químicas em solos de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 28, n. 2, p. 281–288, 2004.

BONFIM-SILVA, E. M.; MONTEIRO, F. A. Nitrogênio e enxofre na adubação e em folhas diagnósticas e raízes do capim- braquiária em degradação. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, n. 8, p. 1641–1649, 2010.

CASTRO, P. R. .; KLUGE, R. A.; PERES, L. E. P. **Manual de fisiologia vegetal: teoria e prática**. [s.l.] Ceres, 2005.

CHEN, P.; HABOUDANE, D.; TREMBLAY, N.; WANG, J.; VIGNEAULT, P.; LI, B. New spectral indicator assessing the efficiency of crop nitrogen treatment in corn and wheat. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 9, p. 1987–1997, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.006>>.

CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v. 37, n. 1, p. 35–46, jul. 1991. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/003442579190048B>>. Acesso em: 16 jun. 2016.

CORRÊA, L. de A. Características Agronômicas das Principais Plantas Forrageiras Tropicais. **Comunicado Técnico, 35 - Embrapa Pecuária Sudeste**, p. 1–5, out. 2002. Disponível em: <<http://www.cppse.embrapa.br/sites/default/files/principal/publicacao/Comunicado35.pdf>>.

CUNHA, C. a H. Relação Entre Comportamento Espectral, Índice De Área Foliar E Produção De Matéria Seca Em Capim Tanzânia Submetido a Diferentes Níveis De Irrigação E Doses De Nitrogênio. p. 154, 2004.

DA SILVA, J. T. A.; DA SILVA, I. P.; RODAS, C. L.; CARVALHO, J. G. de. Critical levels for Brachiaria brizantha and Panicum maximum using different sources of phosphorus. **Idesia (Arica)**, v. 31, n. 1, p. 59–65, abr. 2013. Disponível em: <http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292013000100008&lng=en&nrm=iso&tlng=en>. Acesso em: 27 jun. 2016.

DIAS AUGOSTINHO, L. M.; DE PRADO, R. M.; ROZANE, D. E.; FREITAS, N. Acúmulo de massa seca e marcha de absorção de nutrientes em mudas de goiabeira “Pedro Sato”. **Bragantia**, v. 67, n. 3, p. 577–585, 2008.

EL-SHIKHA, D. M.; WALLER, P.; HUNSAKER, D.; CLARKE, T.; BARNES, E. Ground-based remote sensing for assessing water and nitrogen status of broccoli. **Agricultural Water Management**, v. 92, n. 3, p. 183–193, 2007.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas**. 2. ed. Londrina: Editora Planta, 2006.

FITZGERALD, G.; RODRIGUEZ, D.; O'LEARY, G. Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index-The canopy chlorophyll content index (CCCI). **Field Crops Research**, v. 116, n. 3, p. 318–324, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2010.01.010>>.

FLORES, R. S.; EUCLIDES, V. P. B.; ABRÃO, M. P. C.; GALBEIRO, S.; DIFANTE, G. D. S.; BARBOSA, R. A. Desempenho animal, produção de forragem e características estruturais dos capins marandu e xaraés submetidos a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, n. 8, p. 1355–1365, 2008.

FONTES, P. C. R. **Diagnóstico do estado nutricional das plantas**. 1. ed. Viçosa - MG: UFV, 2001.

FURLANI, P. R.; SILVEIRA, L. C. P.; BOLONHEZI, D.; FAQUIM, V. **Cultivo hidropônico de plantas**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1999.

GAUTAM, R. K.; PANIGRAHI, S. Leaf nitrogen determination of corn plant using aerial images and artificial neural networks *. **Canadian Biosystem Engineering**, v. 49, p. 1–9, 2007.

GERDES, L.; WERNER, J. C.; COLOZZA, M. T.; POSSENTI, R. A.; SCHAMMASS, E. A. Avaliação de Características de Valor Nutritivo das Gramíneas Forrageiras Marandu, Setária e Tanzânia nas Estações do Ano. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 29, n. 4, p. 955–963, 2000.

GOEL, P. K.; PRASHER, S. O.; LANDRY, J. A.; PATEL, R. M.; BONNELL, R. B.; VIAU, A. A.; MILLER, J. R. Potential of airborne hyperspectral remote sensing to detect nitrogen deficiency and weed infestation in corn. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 38, n. 2, p. 99–124, 2003.

GOFFART, J. P.; OLIVIER, M.; FRANKINET, M. Crop nitrogen status assessment tools in a decision support system for nitrogen fertilization management of potato crops. **HortTechnology**, v. 21, n. 3, p. 282–286, 2011.

GONZALEZ, R. C. .; WOODS, R. E. **Digital Image Processing**, 2011. .

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159–174, 1977. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/2529310>>. Acesso em: 24 jun. 2016.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RiMa Artes e Textos, 2000.

LAVRES JUNIOR, J.; SANTOS JUNIOR, J. D. D. G. Dos; MONTEIRO, F. A. Nitrate reductase activity and spad readings in leaf tissues of guinea grass submitted to nitrogen and potassium rates. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 801–809, 2010.

LOPEZ G., O. E.; MALAVOLTA, E. Estudos sobre as relações entre zinco e fósforo na nutrição da planta. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 31, p. 467–483, 1974.

MALAVOLTA, E. Fósforo na Planta e interações com outros elementos. In: YAMADA, T.; ADDALLA, S. R. S. E (Ed.). **Fósforo na Agricultura Brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2004. p. 726.

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

MALAVOLTA, E.; MORAES, M. F. Fundamentos do nitrogênio e do enxofre na nutrição mineral de plantas cultivadas. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. E; VITTI, G. C. (Ed.). **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: IPNI – Brasil, 2007. p. 189–238.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997.

MANARIN, S. A. **Combinações de doses de fósforo e de zinco em solução nutritiva para o capim-tanzânia**. 2005. 2005.

MARIN, M. A. A. **Sistema de visão artificial para a diagnose nutricional de ferro , boro , zinco e cobre em plantas de milho**. 2012. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO/ FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/74/74131/tde-19032013-103532>>.

MARTINS, L. E. C. Respostas fisiológicas , metabólicas , estruturais e produtivas do capim- marandu às disponibilidades de fósforo e zinco. p. 53, 2010.

MARTUSCELLO, J. A.; MIRANDA, D.; MOREIRA, L. D. M.; RUPPIN, R. F.; NORONHA, D. De; VIEIRA, F. Revista Brasileira de Zootecnia Níveis críticos de fósforo no solo e na parte aérea no estabelecimento de capim- elefante Critical soil and shoot

phosphorus levels for the establishment of elephant grass. v. 3598, 2009.

MATTOS, W. T.; MONTEIRO, F. A. Produção E Nutrição Do Capim-Braquiária Em Função De Doses De Nitrogênio E Enxofre. **Boletim de Industria Animal**, v. 60, n. 1, p. 1–10, 2003.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. De. **Introdução ao processamento de imagem de sensoriamento remoto**. Brasília: CNPq, 2012.

MILTON, N. M.; EISWERTH, B. A.; AGER, C. M. Effect of phosphorus deficiency on spectral reflectance and morphology of soybean plants. **Remote Sensing of Environment**, v. 36, n. 2, p. 121–127, maio 1991. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0034425791900344>>. Acesso em: 28 jun. 2016.

MONTEIRO, F. A. Pastagens. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute - IPNI, 2010. p. 467.

MORAES, E. C. De. FUNDAMENTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO. In: **Introdução ao sensoriamento remoto**. INPE-8984-PUD/62. [s.l.: s.n.]

MOREIRA, A.; HEINRICHS, R.; CARVALHO, J. G. DE; FERREIRA, R. D. P. EFEITO DA RELAÇÃO FÓSFORO : MAGNÉSIO NO TEOR E CONTEÚDO DOS MICRONUTRIENTES NA ALFAFA. **Boletim de Indústria Animal**, v. 63, n. 1, p. 55–61, 2006.

NIGON, T. J. Aerial Imagery and Other Non-Invasive Approaches to Detect Nitrogen and Water Stress in a Potato Crop. 2012.

NUNES, S. G.; BOOCK, A.; PENTEADO, M. I. de O.; GOMES, D. T. Brachiaria brizantha cv. Marandu. (**EMBRAPA-CNPQC. Documentos, 21**), p. 31, 1984. Disponível em: <<https://docsagencia.cnptia.embrapa.br/bovinodecorte/doc/doc21/doc21.pdf>>. Acesso em: 25 jun. 2016.

OLIVEIRA, J. B.; PRADO, H. **Levantamento pedológico do estado de são paulo: quadrícula de são carlos**. Campinas: IAC, 1984.

OLIVEIRA, P. P. A.; TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, W. S. de; CORSI, M. Fertilização com N e S na Recuperação de Pastagem de Brachiaria brizantha cv . N and S Fertilization in the Pasture Recovery Brachiaria brizantha cv . Marandu on Sandy Soil. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 34, n. 4, p. 1121–1129, 2005.

PAGOLA, M.; ORTIZ, R.; IRIGOYEN, I.; BUSTINCE, H.; BARRENECHEA, E.;

APARICIO-TEJO, P.; LAMSFUS, C.; LASA, B. New method to assess barley nitrogen nutrition status based on image colour analysis. Comparison with SPAD-502. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 65, n. 2, p. 213–218, 2009.

PATIL, V. D.; ADSULAND, P. B.; DESHMUKH, L. S. STUDIES ON SPECTRAL REFLECTANCE UNDER NORMAL AND NITROGEN, PHOSPHORUS AND PEST AND DISEASE STRESS CONDITION IN SOYBEAN (GLYCINE MAX L.). **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 35, n. 4, 2007.

PEDRINI, H.; SCHWARTZ, W. R. **Análise de imagens digitais: princípios, algoritmos e aplicações**. São Paulo: Thomson Learning, 2008.

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.

PONZONI, F. J. SENSORIAMENTO REMOTO NO ESTUDO DA VEGETAÇÃO: DIAGNOSTICANDO A MATA ATLÂNTICA. In: **CURSO DE USO DE SENSORIAMENTO REMOTO NO ESTUDO DO MEIO AMBIENTE**. INPE-8984-PUD/62. [s.l: s.n.]p. 27.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese editora, 2010.

PRADO, R. D. M. **Manual de nutrição de plantas forrageiras**. Jaboticabal: Editora Funep, 2008.

PULLANAGARI, R. R.; YULE, I. J.; TUOHY, M. P.; HEDLEY, M. J.; DYNES, R. A.; KING, W. M. Proximal sensing of the seasonal variability of pasture nutritive value using multispectral radiometry. **Grass and Forage Science**, v. 68, n. 1, p. 110–119, 2013.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Intitute, 2011.

REIS, L. R. INFLUÊNCIA DA DIMENSÃO DOS BLOCOS NA CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS. **Engenharia na agricultura**, v. 17, n. 4, p. 283–293, 2009.

ROMUALDO, L. **Utilização da visão artificial para diagnóstico nutricional de nitrogênio, fósforo, potássio e manganês em milho**. 2013. Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/74/74131/tde-10072013-085725/en.php>>.

ROMUALDO, L. M.; LUZ, P. H. C.; DEVECHIO, F. F. S.; MARIN, M. A.; ZÚÑIGA, A.

M. G.; BRUNO, O. M.; HERLING, V. R. Use of artificial vision techniques for diagnostic of nitrogen nutritional status in maize plants. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 104, p. 63–70, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169914000696>>.

ROSSATO, O. B.; ANDRADE-SANCHEZ, P.; GUERRA, S. P. S.; CRUSCIOL, C. A. C. Sensores de reflectância e fluorescência na avaliação de teores de nitrogênio, produção de biomassa e produtividade do algodoeiro. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 47, n. 8, p. 1133–1141, 2012.

SHIRATSUCHI, L. S.; BRANDÃO, Z. N.; VICENTE, L. E.; VICTORIA, D. de C.; DUCATI, J. R.; OLIVEIRA, R. P. de; VILELA, M. de F. Sensoriamento Remoto: conceitos básicos e aplicações na Agricultura de Precisão. In: ALBERTO CARLOS DE CAMPOS BERNARDI; JOÃO DE MENDONÇA NAIME; ÁLVARO VILELA DE RESENDE; LUIS HENRIQUE BASSOI; RICARDO YASSUSHI INAMASU (Ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília: Embrapa, 2014. p. 58–73.

SILVA, F. de F. **Reconhecimento de padrões de nutrição para nitrogênio e potássio em híbridos de milho por análise de imagens digitais**. 2015. Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, 2015.

SILVA, F. de F.; LUZ, P. H. C.; ROMUALDO, L. M.; MARIN, M. A.; ZÚÑIGA, A. M. G.; HERLING, V. R.; BRUNO, O. M. A diagnostic tool for magnesium nutrition in maize based on image analysis of different leaf sections. **Crop Science**, v. 54, n. 2, p. 738–745, 2014.

SILVA, M. L. de S.; TREVIZAM, A. R. Interações iônicas e seus efeitos na nutrição das plantas. **Informações Agronômicas**, n. 149, p. 10–16, 2015.

SILVA JÚNIOR, M. C. da; PINTO, F. de A. D. C.; QUEIROZ, D. M. de; VIEIRA, L. B.; RESENDE, R. C. de. Using an aerial system of remote sensing to detect different nutritional status in *Brachiaria decumbens*. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 5, p. 1049–1062, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162013000500016&lng=en&nrm=iso&tlng=en>.

SILVA JÚNIOR, M. C. da; PINTO, F. de A. de C.; FONSECA, D. M. da; QUEIROZ, D. M. de; MACIEL, B. F. Detecção do efeito da adubação nitrogenada em *Brachiaria decumbens* Stapf . utilizando um sistema de sensoriamento remoto 1 Detection of the nitrogen fertilization effect in *Brachiaria decumbens* using a remote sensing system. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 2008.

SRIDEVY, S.; VIJENDRAN, A. S.; NADU, T. Analysis of Maize Crop Leaf using

Multivariate Image Analysis for Identifying Soil Deficiency. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, v. 8, n. 19, p. 2071–2081, 2014. Disponível em: <<http://maxwellsci.com/print/rjaset/v8-2071-2081.pdf>>.

STARKS, P. J.; ZHAO, D.; PHILLIPS, W. A.; COLEMAN, S. W. Herbage mass, nutritive value and canopy spectral reflectance of bermudagrass pastures. **Grass and Forage Science**, v. 61, n. 2, p. 101–111, 2006.

STEFFEN, C. A. **INTRODUÇÃO AO SENSORIAMENTO REMOTO**. Disponível em: <<http://www.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm>>. Acesso em: 1 jun. 2016.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. [s.l.] Artmed, 2013.

TREMBLAY, N.; WANG, Z.; CEROVIC, Z. G. Sensing crop nitrogen status with fluorescence indicators. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 32, n. 2, p. 451–464, 2012.

VILELA, H. **Pastagem: seleção de plantas forrageiras, implantação e adubação**. Viçosa - MG: Aprenda Fácil, 2005.

WANG, Y.; WANG, D.; ZHANG, G.; WANG, J. Estimating nitrogen status of rice using the image segmentation of G-R thresholding method. **Field Crops Research**, v. 149, p. 33–39, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2013.04.007>>.

WERNER, J. C.; PAULINO, V. T.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; ANDRADE, N. de O. Forrageiras. In: RAIJ, B. VAN; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, Â. M. C. (Ed.). **Boletim Técnico 100: Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo**. 2 ed. rev.a ed. Campinas: Instituto Agrônômico / Fundação IAC, 1997. p. 263–273.

WIWART, M.; FORDOŃSKI, G.; ZUK-GOŁASZEWSKA, K.; SUCHOWILSKA, E. Early diagnostics of macronutrient deficiencies in three legume species by color image analysis. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 65, n. 1, p. 125–132, 2009.

XU, G.; ZHANG, F.; SHAH, S. G.; YE, Y.; MAO, H. Use of leaf color images to identify nitrogen and potassium deficient tomatoes. **Pattern Recognition Letters**, v. 32, n. 11, p. 1584–1590, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.patrec.2011.04.020>>.

ZHAO, C.; LIU, L.; WANG, J.; HUANG, W.; SONG, X.; LI, C. Predicting grain protein content of winter wheat using remote sensing data based on nitrogen status and water stress. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 7, n. 1, p. 1–9, 2005.

ZÚÑIGA, A. M. G. **Sistema de visão artificial para identificação do estado nutricional de plantas**. 2012. Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/55/55134/tde-20062012-101012/>>.