UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS

FERNANDA DE FÁTIMA DA SILVA

**Reconhecimento de padrões de nutrição para nitrogênio e potássio
em híbridos de milho por análise de imagens digitais.**

Pirassununga/SP
2015

FERNANDA DE FÁTIMA DA SILVA

**Reconhecimento de padrões de nutrição para nitrogênio e potássio
em híbridos de milho por análise de imagens digitais.**

(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.

Área de Concentração: Qualidade e
Produtividade Animal.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique
de Cerqueira Luz

Pirassununga/SP
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Serviço de Biblioteca e Informação da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da
Universidade de São Paulo

S586r Silva, Fernanda de Fátima da
Reconhecimento de padrões de nutrição para nitrogênio e potássio em híbridos de milho por análise de imagens digitais / Fernanda de Fátima da Silva. -- Pirassununga, 2014.
161 f.
Tese (Doutorado) -- Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos - Universidade de São Paulo. Departamento de Zootecnia.
Área de Concentração: Qualidade e Produtividade Animal.
Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique de Cerqueira Luz.

1. Nutrição de planta 2. Visão artificial
3. *Zea mays* L. 4. Produtividade 5. Adubação. I. Título.

Dedicatória

*Ao meu esposo Marcio,
que sempre presente, foi fundamental para me apoiar e superar as dificuldades.*

*A meus pais, Norberto e Joana,
que sempre me incentivaram e apoiaram, não mediram esforços para que eu conquistasse
mais essa vitória.*

*Às minhas irmãs, Josiane e Luciana, e sobrinhas, Júlia e Maria Eduarda. O amor e carinho
dedicado por vocês foram fundamentais para que esse objetivo fosse alcançado.*

*A minha grande amiga e madrinha, Liliane,
sempre presente e companheira em todos os momentos e que muito ajudou em todas as
etapas do desenvolvimento deste trabalho.*

Agradecimentos

A Deus,

que esteve ao meu lado em todo momento, me fortalecendo durante esta etapa.

Ao professor Dr. Pedro Henrique de Cerqueira Luz,

por sua orientação e confiança, sempre me auxiliando, animando e proporcionando todas as condições necessárias para que o trabalho pudesse ser realizado. Seus ensinamentos teóricos e de vida serão levados para sempre.

Ao professor Dr. Valdo Rodrigues Herling,

pela palavra amiga nos momentos de maior dificuldade e pela confiança em meu trabalho, que foram transformadoras de vida.

À equipe do Instituto de Física da USP de São Carlos,

professor Dr. Odemir Martinez Bruno e Marcos Willian Oliveira,

pela oportunidade de trabalharmos juntos e pelo processamento das imagens digitais.

Ao professor Murilo Mesquita Baesso,

pela paciência, dedicação e orientação para o desenvolvimento no processamento das imagens digitais.

Aos meus grandes amigos Liliane, Gabriela, Cézar (Baiano), Jéssica, Caramelo, Vanessa,

Fábio, Syeda, Thiago, Celso, Mario, Mariana, Leonardo, Layane, Alessandra, Pollyana,

Nancy, Viviane, Uanderson,

pela amizade e dedicação de cada um.

Aos funcionários da Casa das Agrárias,

pela ajuda no desenvolvimento das análises do experimento.

À FZEA/USP pela oportunidade.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de

Doutorado concedida.

*O saber a gente aprende com os mestres e com os livros.
A sabedoria se aprende é com a vida e com os humildes.*

Cora Coralina

RESUMO

SILVA, F.F. **Reconhecimento de padrões de nutrição para nitrogênio e potássio em híbridos de milho por análise de imagens digitais.** 2015. 160 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2015.

A adubação e a utilização de cultivares mais produtivos consistem em tecnologias essenciais para melhorar a produtividade e a sustentabilidade da cultura do milho (*Zea mays* L.). A análise de imagens digitais é uma tecnologia utilizada para a identificação de deficiência nutricional em folhas de milho em estádios iniciais de desenvolvimento, já que, nos métodos atuais, é muito difícil a correção do nutriente deficiente no mesmo ciclo da cultura. O objetivo deste trabalho foi avaliar as características nutricionais e produtivas, bem como verificar métodos de extração de características de imagens digitais para diagnosticar sintomas de deficiência de nitrogênio (N) e potássio (K) em híbridos de milho, cultivados em casa de vegetação, com deficiência induzida em nitrogênio (N) ou potássio (K); e posteriormente no campo. O experimento foi independente para cada elemento e conduzido em 2 etapas: 1º) casa de vegetação sob cultivo hidropônico, com tratamentos em fatorial 4 (doses) x 3 (híbridos) e 4 repetições, sendo 4 doses: 5, 20%, 100% e 200% da dose completa; e 2º) campo, em blocos ao acaso em fatorial 4x3 (4 doses e 3 híbridos) e 4 blocos, sendo as doses de adubação: omissão individual e completa (0%) de N ou K, 50%, 100% e 200% da dose recomendada do nutriente em estudo. Os híbridos foram: DKB390 PróR2[®](H1), Pioneer 30F35[®](H2) e Syngenta Status[®](H3). A coleta e digitalização das folhas foram realizadas nos estádios V4 e R1. Foram obtidas as imagens da folha indicativa do estágio (FI), que foram processadas pela análise de imagens e analisadas quimicamente. Os métodos de extração de características baseados em padrões de textura de imagens em escala de cinza foram: Fourier, Descritor Fractal (Fractal), Local Binary Pattern (LBP), Gabor Wavelets (GW) e Gabor Wavelets + Fractal Descriptors (GWF); e também foram estudados métodos de extração de características baseados em 4 índices espectrais de imagens coloridas: excesso de verde (Evd), vermelho normalizado (Vern), verde normalizado (Vn) e razão verde-vermelho (Rvv) e a combinação entre eles. Em casa de vegetação, foram determinadas massa seca da parte aérea (MSPA) e de raízes (MSRz) e as concentrações de macro e micronutrientes. No campo, no final do ciclo, foram realizadas avaliações da produtividade e análise química foliar e do solo. A redução nas doses de N ou de K nos híbridos estudados promoveu decréscimos significativos na concentração foliar desses elementos nos híbridos nos 2 estádios avaliados, apresentando sintomas visuais típicos de deficiência de N ou de K para os híbridos conduzidos com a menor dose de tal nutriente. A MSPA e MSRz nos híbridos conduzidos em casa de vegetação e a produtividade no campo também foram comprometidas com a redução na disponibilidade de N ou de K para os híbridos estudados. Para os híbridos conduzidos em casa de vegetação com doses de N ou de K, quando estudados separadamente pelos métodos baseados em textura, o Fourier apresentou alta porcentagem de acertos em todos os híbridos e nos 2 estádios, exceto para H3 no R1. Os melhores métodos baseados em índices espectrais apresentaram índice Kappa classificado como acima de bom.

Palavras-chave: nutrição de planta, visão artificial, *Zea mays* L., produtividade, adubação.

ABSTRACT

SILVA, F.F. **Recognition of nutritional patterns to nitrogen and potassium in maize hybrids by analyzing digital images.** 2015. 160 f. Tese (Doutorado) – Faculty of Animal Science and Food Engineering – University of São Paulo (FZEA/USP), Pirassununga, 2015.

The fertilization and the use of more productive cultivars are important technologies to improve productivity and sustainability of the maize crop. The digital image analysis is a technology used to identify nutritional deficiency in corn leaves, on the methodologies currently being applied, the correction of the deficient nutrient is not possible in the same growing cycle. The objective of this study was to evaluate the nutritional and productive characteristics and verify the extraction methods of digital image characteristics. This is performed to diagnose symptoms of nitrogen deficiency (N) and potassium (K) in corn hybrids (*Zea mays* L.) grown in a greenhouse, with induced nutritional deficiency in nitrogen (N) or potassium (K); and thereafter grown in the field. The experiment was independent for each element and conducted in two steps: 1; in a greenhouse under hydroponic cultivation, with treatments in a factorial 4 (doses) x 3 (hybrid) and 4 replications, with four doses: 5, 20%, 100% and 200% of full dose; and 2; the field in randomized blocks in a factorial 4x3 (4 doses and 3 hybrids) and 4 blocks, 4 fertilizer levels: individual and complete omission (0%) of N or K, 50%, 100% and 200 % of the recommended dose of the nutrient under study. The hybrids were DKB390 Prór2® (H1), Pioneer 30F35® (H2) and Syngenta Status® (H3). The collection and digitalization of the leaves were realized in V4 and R1 growth stages. Indicative leaves of each stage were obtained and processed by image analysis and chemically analyzed. The extraction methods of characteristics based on texture patterns of images in gray-scale were: Fourier Descriptor Fractal (Fractal), Local Binary Pattern (LBP), Gabor Wavelets (GW) and Gabor Wavelets + Fractal Descriptors (GWF); and also characteristics extraction methods were studied based on 4 spectral indices of color images: excessive green (EVD), normalized red (Vern), normalized green (Vn), green-red ratio (RVV) and the combination of them. In the greenhouse were determined the dry mass of the aerial part of the plant (MSPA) and root (MSRz) and the concentrations of macro and micronutrients. In the field, at the end of the cycle, evaluations were carried out in productivity and foliar and soil analysis. The reduction in N or K levels in the studied hybrids led to significant decreases in foliar nutrient concentration in the plants conducted in a greenhouse and in the field in two stages evaluated, with typical visual symptoms of N deficiency or K for hybrid conducted with the lower dose of this nutrient. The MSPA and MSRZ in hybrid conducted in a greenhouse and productivity in the field were also committed to reducing the availability of N or K for the studied hybrids. To the hybrids conducted in the greenhouse with doses of N or K, when studied separately in the texture based methods, the Fourier showed high percentage of correct answers in all hybrids in both stages, except for H3 in R1. The best methods based on spectral indices presented classification considered more than good.

Keywords: plant nutrition, artificial vision, *Zea mays* L., productivity, fertilization.

SUMÁRIO

1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	9
1.1 Importância da cultura do milho.....	9
1.2. Cultivares de milho.....	10
1.3. Nutrição mineral do milho e nutrientes estudados	11
1.3.1. Nitrogênio (N)	12
1.3.2. Potássio (K)	14
1.4. Hipóteses	15
1.5 Objetivos gerais	16
2. DISPONIBILIDADE DE NITROGÊNIO E POTÁSSIO NA NUTRIÇÃO E NAS RELAÇÕES COM NUTRIENTES EM HÍBRIDOS DE MILHO EM CASA DE VEGETAÇÃO.....	17
2.1. Introdução.....	18
2.2. Objetivos.....	20
2.3. Material e Métodos	20
2.3.1. Local do experimento e cultura estudada.....	20
2.3.2. Tratamentos	21
2.3.3. Solução nutritiva	21
2.3.4. Instalação e condução do experimento	22
2.3.5. Avaliações.....	23
2.3.6. Delineamento experimental e forma de análise dos resultados	24
2.4. Resultados e discussão.....	25
2.4.1. Nitrogênio	25
2.4.2. Potássio	43
2.5. Conclusões.....	60
3. DIAGNÓSTICO DO ESTADO NUTRICIONAL PARA NITROGÊNIO E POTÁSSIO EM HÍBRIDOS DE MILHO BASEADO EM ANÁLISE DE IMAGENS DIGITAIS.	61
3.1. Introdução.....	62
3.2. Objetivos.....	66
3.3. Material e Métodos	66
3.3.1. Local do experimento e cultura estudada.....	66
3.3.2. Casa de vegetação	66
3.3.3. Campo.....	69
3.3.4. Análise química foliar	72
3.3.5. Forma de análise dos resultados de análise química foliar.....	72
3.3.6. Digitalização das imagens	73
3.3.7. Processamento das imagens	74
3.4. Resultados e discussão.....	82
3.4.1. Casa de vegetação	82
3.4.2. Campo.....	95
3.5. Conclusões.....	107

4. ADUBAÇÃO NITROGENADA E POTÁSSICA NA FERTILIDADE DO SOLO, NUTRIÇÃO E PRODUTIVIDADE DE HÍBRIDOS DE MILHO	108
4.1. Introdução	109
4.2. Objetivos.....	111
4.3. Material e Métodos	112
4.3.1. <i>Localização do experimento e cultura estudada</i>	112
4.3.2. <i>Caracterização da área experimental</i>	112
4.3.3. <i>Delineamento experimental</i>	113
4.3.4. <i>Avaliações</i>	115
4.3.5. <i>Forma de análise dos resultados</i>	118
4.4. Resultados e discussão.....	119
4.4.1. <i>Nitrogênio</i>	119
4.4.2. <i>Potássio</i>	134
4.5. Conclusões.....	146
5. REFERÊNCIAS	148

1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1 Importância da cultura do milho

O milho (*Zea mays* L.) é uma importante cultura alimentar em todo o mundo. Durante o período de 2000-2050 a demanda global de cereais deverá aumentar em mais de 1000 milhões de toneladas (56%); 45% deste aumento são esperados para suprir o aumento da demanda de milho (Hubert et al., 2010). Em todo o mundo, há uma necessidade de duplicar a quantidade de área dedicada à agricultura para 2050, para atender as demandas conflitantes de alimentos e bioenergia com aumentos da população projetada (Field et al., 2008).

Produzido nas mais variadas formas de cultivo e de norte a sul do país, o milho apresenta-se como uma cultura de grande importância econômica e social, além de um enorme potencial para o crescimento do setor agrícola, graças ao desenvolvimento de novas tecnologias que visam sempre aumento de produtividade (Santos et al., 2002).

De acordo com FAO (2015), no ano de 2013 foram cultivados em todo o mundo 185 milhões de hectares (ha) de milho, produzindo 1,02 bilhões de toneladas e apresentou produtividade média mundial de 5,5 t ha⁻¹. No Brasil, a produção total de milho estimada para o ano agrícola 2014/2015 é de aproximadamente 78,4 milhões de toneladas, divididos em duas safras: 1ª safra (30,12 milhões de toneladas) e 2ª safra (48,28 milhões de toneladas), cultivado numa área aproximada de 15,16 milhões de hectares (6,2 e 9,0 milhões de ha, respectivamente na 1ª e 2ª safra) e isso representa 39,3% do total de grãos produzidos no Brasil nesta safra (CONAB, 2015). De acordo com essas informações, a produtividade média brasileira de 5,2 toneladas de milho por há. Entretanto países como Chile e Estados Unidos alcançam produtividade média de 10,6 e 10,0 t/ha respectivamente.

Para atender a demanda cada vez maior desse cereal, existem duas alternativas: expansão da fronteira agrícola em áreas degradadas ou aumento da produtividade das áreas já cultivadas. A expansão das áreas necessita de menores investimentos, mas depende de novas áreas para o seu crescimento. O aumento de produtividade requer constante investimento em tecnologias, como melhoramento genético, aumento da disponibilidade de nutrientes e técnicas que visem manter a nutrição da planta e a fertilidade do solo (Marin, 2011).

Segundo Fornasieri Filho (1992), os estádios de desenvolvimento do milho são identificados pelo número de folhas totalmente emergidas, sendo considerada folha a que apresenta a linha de união entre a lâmina e a bainha. Após o aparecimento das inflorescências femininas, a identificação é caracterizada pelos grãos.

Os estádios foram divididos em vegetativo (V) e reprodutivo (R), e subdivididos por algarismos arábicos, para orientar adequadamente a condução da cultura. A fenologia do milho está descrita e apresentada na Tabela 1.1.1.

Tabela 1.1.1. Escala fenológica de milho (Fancelli, 1986).

Estádio	Caracterização do estágio
Fase Vegetativa	
V ₀ ou V _E	Germinação/Emergência: embebição, digestão de substâncias de reserva do cariópse, divisão celular e crescimento das raízes seminais.
V ₂	Emissão da 2ª folha: emissão das raízes primárias e das raízes seminais, início do processo fotossintético com duas folhas totalmente expandidas.
V ₄	Emissão da 4ª folha: definição do potencial produtivo.
V ₆	Emissão da 6ª folha: crescimento do diâmetro do colmo, aceleração do desenvolvimento do pendão e definição do número de fileiras de grãos na espiga.
V ₈	Emissão da 8ª folha: início da definição da altura da planta e da espessura do colmo.
V ₁₂	Emissão da 12ª folha: início da definição do número e tamanho de espiga.
V ₁₄	Emissão da 14ª folha.
Fase Reprodutiva	
V _t	Emissão do pendão e abertura das flores masculinas.
R ₁	Florescimento pleno: início da confirmação da produtividade.
R ₂	Grão leitoso.
R ₃	Grão pastoso.
R ₄	Grão farináceo.
R ₅	Grão farináceo duro.
R ₆	Maturidade fisiológica: máximo acúmulo de matéria seca e máximo vigor da semente, aparecimento do ponto preto na base do grão.

1.2. Cultivares de milho

O crescimento da cultura pode ser manipulado para se adaptar às mudanças climáticas globais através do ajuste do sistema de cultivo e / ou criação de novas cultivares (Mendelsohn et al., 1994).

A utilização de cultivares mais produtivos e adaptados às condições regionais consiste em uma tecnologia essencial para melhorar a produtividade da cultura, principalmente por não implicar em aumento substancial de capital investido (Fornasier Filho, 1992).

As cultivares de milho híbrido foram melhorados em arquitetura da planta para aumentar a interceptação de luz pelo dossel e, assim, a fotossíntese. Melhorias também foram feitas na tolerância à seca e na exigência de fertilidade, especialmente de N, que aumentaram para os híbridos mais recentes, devido a estas mudanças (Bruns e Ebelhar, 2006).

O melhoramento genético de milho tem mudado constantemente o crescimento de raízes e da parte aérea bem como a produtividade da planta em todo o mundo (Chen et al.,

2014a), contribuindo com 50-60% do aumento da produção de milho nos EUA (Duvick 2005a) e 35,5% na China (Wu et al., 1998).

Segundo Uribe-larrea et al. (2009), existem diferenças genotípicas significativas na absorção de N e na eficiência de utilização de N em milho.

Na safra 2012/13, foram disponibilizados 479 cultivares de milho, sendo 263 cultivares convencionais e 216 cultivares transgênicas. Houve um significativo aumento do número de cultivares transgênicos disponíveis no mercado. Além da produção de grãos, há indicação de cultivares para produção de silagem de planta inteira, silagem de grãos úmidos e produção de milho verde. Cada cultivar de milho apresenta características diferenciadas quanto ao comportamento em relação a doenças, ciclo, época de plantio, resistência ao acamamento, altura de planta e exigência nutricional (EMBRAPA, 2012).

1.3. Nutrição mineral do milho e nutrientes estudados

Além do uso de cultivares, o ajuste no manejo de nutrientes também pode contribuir para o crescimento da produtividade do milho. De acordo com Tomaz et al. (2003), nos últimos anos, a busca por uma agricultura com menor consumo energético e ecologicamente sustentável tem estimulado a pesquisa a identificar mecanismos responsáveis pela maior eficiência nutricional.

No contexto da crescente demanda mundial de alimentos, a intensificação dos agroecossistemas é necessária para aumentar a eficiência do uso de nutrientes nas plantas, enquanto diminui o uso de fertilizantes (Hinsinger et al., 2011). Maximizar a eficiência do uso de nutrientes dentro de um sistema agrícola é a chave para reduzir a utilização de fertilizantes, que são caros, tanto em termos econômicos como ambientais (Felicity et al., 2014).

Saber exatamente onde e como a produção de grãos é prejudicada por limitações de nutrientes contribui para melhor gestão da deficiência nutricional das culturas (Lordkaew, et al., 2011).

O aumento da produtividade agrícola e a diminuição dos custos produtivos passaram a ser fundamentais após a globalização da economia. Estes dois objetivos podem ser conciliados pela combinação do potencial genético das plantas com o uso eficiente dos nutrientes (Horn et al., 2006).

Quando o teor de um nutriente no tecido da planta cai abaixo do nível necessário para o crescimento ótimo, a planta é tida como deficiente naquele elemento. A concentração crítica de um nutriente refere-se seu ao teor no tecido em que 90% da máxima produção é atingida ou o crescimento ótimo é esperado (Epstein e Bloom, 2006).

As culturas apresentam diferentes exigências nutricionais durante as fases de desenvolvimento. De acordo com Coelho (2007), o milho possui dois períodos de intensa absorção de nutrientes, o primeiro ocorrendo durante a fase de desenvolvimento vegetativo, V12 e V14 folhas, quando o número potencial de grãos está sendo definido; e, o segundo, durante a fase reprodutiva ou formação da espiga, quando o potencial produtivo é atingido.

Nas folhas de milho as faixas de teores totais adequados de macronutrientes, expressos em grama por quilograma (g kg^{-1}) são: 27-35 para o N, 2,0-4,0 para o P, 17-35 para o K, 2,5-8,0 para o Ca, 1,5-5,0 para o Mg e 1,5-3,0 para o S. Para os micronutrientes, os teores foliares, expresso em miligrama por quilograma (mg kg^{-1}), são: 10-25 para o B, 6-20 para o Cu, 30-250 para o Fe, 20-200 para o Mn, 0,15-0,20 para o Mo e 15-100 para o Zn (Raij e Cantarella et al., 1996).

As quantidades de micronutrientes podem parecer baixas, entretanto, a deficiência deles pode ter efeito tanto na desorganização de processos metabólicos quanto na deficiência de um macronutriente (Vitti e Favarin, 1997).

O conhecimento das funções dos nutrientes para os vegetais é imprescindível para obtenção de produtividades satisfatórias e para a constante avaliação do manejo do sistema agrícola objetivando a implementação de ajustes futuros das ações planejadas (Fancelli, 2009).

1.3.1. Nitrogênio (N)

Dentre os diversos nutrientes necessários ao desenvolvimento e crescimento das plantas, destaca-se o nitrogênio (N), pelas suas funções relevantes na produção e síntese de aminoácidos. Apresenta-se em quantidades insuficientes na quase totalidade dos solos, estando predominantemente ligado aos compostos orgânicos (EMBRAPA, 1996).

As formas disponíveis mais importantes de N são os íons amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-). O N orgânico precisa, então, sofrer transformações antes de se tornar disponível. O N na planta é inicialmente reduzido à forma amoniacal e combinado nas cadeias orgânicas, formando ácido glutâmico, este por sua vez é incluído em mais de uma centena de diferentes aminoácidos e também em proteínas (Raij, 2011).

Apesar de apresentar-se na camada arável do solo, em alguns casos em quantidades relativamente elevadas, sua baixa disponibilidade, somada à grande demanda pelas plantas, faz com que seja um dos nutrientes mais limitantes à produtividade da maioria das culturas (Reis et al., 2006).

Os nutrientes mais exigidos pelo milho são o N e o potássio (K), vindo em seguida o fósforo (P), o cálcio (Ca) e o magnésio (Mg) (Coelho et al., 2006; Sousa et al., 2010). O conteúdo porcentual de N nos tecidos de plantas jovens de milho é maior que nas outras fases do ciclo de crescimento, embora seja mais baixa a necessidade do nutriente em razão do pequeno porte das plantas (Büll, 1993). No entanto, uma deficiência de N quando a planta se apresenta com altura em torno de 20 cm ocasionará redução no número de grãos nos primórdios da espiga, comprometendo a produção final (Coelho, 2007).

O N é absorvido pelo milho em todo seu ciclo vegetativo, sendo pequena nos primeiros 30 dias, aumentando de maneira considerável a partir desse ponto. Deste modo, o sucesso da adubação nitrogenada em cobertura na cultura do milho consiste em suprir as plantas com quantidades adequadas no seu período crítico (Epstein e Bloom, 2006).

O N é um elemento essencial para a planta e um nutriente elementar de estruturas de aminoácidos e, subsequentemente, a formação de proteínas e ácidos nucleicos. O N é também um elemento importante na estrutura da clorofila (Bruns e Ebelhar, 2006; Havlin et al., 2005).

Sua deficiência manifesta-se na fase de crescimento intenso, através de coloração verde-pálida das folhas novas e clorose nas folhas velhas que se tornam amareladas no sentido do ápice para o centro, seguindo a nervura central e tomando a forma de um V invertido (Fornasier Filho, 1992). O crescimento é retardado e lento e as plantas tem uma aparência não viçosa. As partes mais maduras (folhas mais velhas) da planta são as primeiras a serem afetadas, uma vez que o N transloca-se de regiões mais velhas para as mais jovens, que crescem ativamente (Epstein e Bloom, 2006).

O fato das folhas mais novas das plantas permanecerem verdes em condições de deficiência de N é um indicativo da mobilidade do nutriente nas plantas. As proteínas translocam-se das folhas deficientes e são reutilizadas nas folhas mais novas (Raij, 1991).

Persistindo a carência, a clorose vai atingindo as folhas mais novas, podendo alcançar toda a planta em casos extremos. Nesta fase, a superfície das folhas mais velhas torna-se inteiramente amarelada (Fornasier Filho, 1992).

A deficiência de N geralmente provoca redução da área foliar, das taxas fotossintéticas e da biomassa final e, assim, reduz a produção de grãos (Ciampitti e Vyn 2011). Resultados têm mostrado que o N é o nutriente exigido em maior quantidade pela cultura do milho, sendo o que mais frequentemente limita a produtividade de grãos (Pavinato et al., 2008).

Sob condições de deficiências de N, a divisão celular nos pontos de crescimento é retardada, o que resulta em uma redução na área foliar e no tamanho da planta, com reflexo na produção de grãos (Malavolta, 2006). O efeito do N no aumento da produtividade está

relacionado também ao aumento no comprimento da espiga e ao número de espiga por planta (Ebelhar et al., 1987; Balko e Russell, 1980).

De acordo com Büll (1993), a absorção de N pela cultura do milho no final de seu ciclo, para um rendimento de $9,1 \text{ t ha}^{-1}$, corresponde a 190 kg ha^{-1} . Os teores de N mínimos são de 3% na folha, 1,1 % na planta inteira e 2,3% na parte colhida (Raij, 1991).

1.3.2. Potássio (K)

O potássio (K) é o segundo macronutriente em teor contido nas plantas, atrás apenas do requerimento em N. É, depois do fósforo (P), o nutriente mais consumido como fertilizante pela agricultura brasileira (Raij, 2011).

Enquanto a fixação biológica é uma importante fonte de N para o ecossistema, o K absorvido pelas plantas é oriundo da reserva existente nos solos, reciclado de resíduos de culturas e advindo da aplicação de fertilizantes, não existindo, portanto, fontes renováveis de K (Coelho, 2005).

Este nutriente é absorvido pelas raízes na forma iônica K^+ , e acumulado nas células das plantas, e consiste de 2-10% do peso de matéria seca (Leigh e Wyn Jones, 1984), permanecendo sempre desta forma, sendo o cátion mais importante na fisiologia vegetal (Raij, 2011). Apresenta a máxima absorção ocorrendo no período de desenvolvimento vegetativo, com elevada taxa de acúmulo nos primeiros 30 a 40 dias, com taxa superior ao de N e P, sugerindo maior necessidade de K na fase inicial como um elemento de "arranque" (Coelho, 2007; Gamboa, 1980).

Como um macronutriente essencial para o crescimento e desenvolvimento da planta, o K desempenha papel crucial em muitos processos metabólicos fundamentais (Clarkson e Hanson, 1980). Entre esses processos, os dois mais reconhecidos são o da fotossíntese e da manutenção da turgescência celular em plantas (Romheld e Kirkby, 2010). Além disso, o K está envolvido nos processos de osmorregulação e extensão celular, movimento dos estômatos, ativação de enzimas, síntese de proteínas, e transporte e absorção de nutrientes (Pettigrew, 2008; Marschner, 1995) e, consequentemente, afeta o crescimento e desenvolvimento das plantas (Wang e Wu, 2013; Malavolta, 2006).

O K aumenta o teor de carboidratos, óleos e proteínas, estimula o enchimento de grãos, diminuindo o chochamento, promove o armazenamento de açúcar e amido, aumenta a utilização da água bem como promove o aumento da resistência a secas, geadas e pragas (Malavolta et al., 1997).

Segundo Mengel e Kirby (2001), o K é o mais importante soluto inorgânico em plantas, sendo importante para o crescimento e extensão celular. As respostas do milho ao K são caracterizadas, em geral, pela precocidade do aparecimento da inflorescência feminina, uniformidade de maturação, resistência ao colmo e maior peso dos grãos (Usherwood, 1985).

O sinal de deficiência de K é percebido pela planta primeiramente nas células epidérmicas das raízes e depois traduzido para o citoplasma. Depois de perceber o sinal, as células vegetais sofrem uma série de reações bioquímicas e fisiológicas que incluem respostas tanto a curto como em longo prazo (Schachtman e Shin, 2007).

A deficiência de K não revela sintomas imediatos, caracterizando a situação de “fome oculta”. Inicialmente, ocorre apenas redução do crescimento e, somente em fases mais avançadas de deficiência, ocorre clorose e necrose das folhas (Raij, 2011).

Os sintomas mostram-se inicialmente como um amarelecimento e bronzeamento ao longo das margens das folhas velhas, movendo-se gradualmente em direção à nervura principal e às folhas novas da planta (Malavolta, 2006). Além disso, de acordo com Malavolta et al. (1997), a deficiência de K em milho resulta em plantas com internódios mais curtos e deficiência de ferro induzida (acúmulo de ferro nos internódios inferiores). Outro sintoma típico de deficiência de K em milho é a diminuição da resistência das plantas ao acamamento (Coelho, 2005).

De acordo com Büll (1993), a absorção de K pela cultura do milho no final de seu ciclo, para um rendimento de 9100 kg ha⁻¹, corresponde a 196 kg ha⁻¹. Sendo que os teores de K mínimos são de 2% na folha, 1,16 % na planta inteira e 0,7% na parte colhida (Raij, 1991).

1.4. Hipóteses

- a) A carência de N e de K impica em manifestação dos sintomas de deficiência de maneira distista entre os híbridos de milho, e a dose excessiva provoca sintomas de toxidez.
- b) O fornecimento de níveis de N ou de K provocam alterações na absorção de outros nutrientes e no crescimento da parte aérea e de raízes dos híbridos.
- d) O diagnóstico da nutrição para níveis de N ou de K podem ser identificados pelas metodologias de análise de imagens digitais.
- e) A produtividade é afetada pelas doses de N ou de K aplicadas, de maneira diferenciada para os híbridos de milho.

1.5 Objetivos gerais

O objetivo deste trabalho foi avaliar as características nutricionais e produtivas para níveis de nitrogênio (N) e potássio (K) em híbridos de milho (*Zea mays* L.), cultivados em casa de vegetação e no campo, bem como verificar métodos de extração de características de imagens digitais para diagnosticar o estado nutricional da cultura.

2. DISPONIBILIDADE DE NITROGÊNIO E POTÁSSIO NA NUTRIÇÃO E NAS RELAÇÕES COM NUTRIENTES EM HÍBRIDOS DE MILHO EM CASA DE VEGETAÇÃO.

RESUMO – O conhecimento do comportamento vegetal quanto ao uso de nutrientes permite manusear ou modificar o sistema de cultivo para melhorar a eficiência em sua utilização. O objetivo deste trabalho foi estudar doses de nitrogênio (N) ou de potássio (K) sobre aspectos nutricionais e interações entre N com K, fósforo (P) e enxofre (S) e entre K com N, cálcio (Ca) e magnésio (Mg), bem como sobre a faixa de suficiência desses nutrientes em híbridos de milho (*Zea mays* L.) conduzidos em solução nutritiva em casa de vegetação. A cultura do milho foi cultivada em casa de vegetação com solução nutritiva Hoagland e Arnon (1950). O trabalho constituiu-se de 2 experimentos independentes, um com doses de nitrogênio (N) e outro com doses de potássio (K). Os tratamentos foram 3 híbridos: DKB390 Prór2[®] (H1), Pioneer 30F35[®] (H2) e Syngenta Status[®] (H3). Para cada híbrido estudado, foram utilizados 4 doses de nutrientes para cada elemento estudado: D1= 5% da dose completa do nutriente; D2= 20% da dose completa; D3= 100% (dose completa) e D4= 200% da dose completa (dose excedente), com 4 (quatro) repetições. Nos estádios V4 e R1, foram determinadas massa seca da parte aérea (MSPA) e de raízes (MSRz), concentração de macro e micronutrientes, faixa de suficiência de N e de K, e as interações entre N:K, N:P e N:S, foram avaliados nos híbridos com doses de N e entre N:K, K:Ca e K:Mg nos híbridos com doses de K. O delineamento foi inteiramente casualizado (fatorial 4x3), com 4 repetições (teste de Tukey 5%). Foram observados sintomas típicos de deficiência de N ou de K nas plantas cultivadas com 5% e 20% de tais elementos. MSPA e MSRz foram altamente correlacionadas com a concentração de N ou K na solução nutritiva em V4 e em R1. A concentração de N e K foliares respondeu significativamente ao aumento dos respectivos nutrientes na solução. Para o milho em R1 alcançar 90% da produção máxima de massa seca, foi necessária uma concentração de no mínimo 13,2 (H1) e 14,3 (H2) e 24,3 mMol L⁻¹ de N (H3). A concentração de N nas raízes respondeu ao acréscimo deste nutriente na solução segundo modelo quadrático positivo ($p<0,05$) em V4 e linear em R1. O efeito de doses de N na concentração deste nutriente na parte aérea e as interações com o P, K e S revelaram correlações significativas ($p<0,05$) somente no estádio V4. O acréscimo da concentração de N na parte aérea promoveu aumento significativo ($p<0,05$) na concentração de K na parte aérea. O K satisfatório para atingir 90% da produção relativa de massa seca em V4 foi de 28,7 a 33,6 g kg⁻¹ de K no tecido foliar em H1. O H2 e H3 alcançaram 90% da massa seca relativa com 18,7 e 28,9 mMol L⁻¹ de K na solução respectivamente. As doses de K na concentração deste nutriente na parte aérea e suas interações com o Ca, Mg e N revelaram correlações significativas ($p<0,05$) na parte aérea para Ca e Mg em H1 e H3 no estádio V4. Já no estádio R1, essa correlação foi significativa para Ca em H2, Mg em H1 e H2 e N em todos os híbridos. O fornecimento de N para o milho implica em resposta quadrática para o intervalo de doses avaliado, exceto para MSRz de H3. O incremento N na solução promove aumento na concentração de K e nas relações entre o N com S e K na parte aérea e raízes em todos híbridos de milho estudados, além de redução na concentração de S da parte aérea em H2 e H3, bem como o aumento da eficiência de absorção e transporte de N e redução da eficiência de utilização do N em todos os híbridos estudados. O incremento de K na solução nutritiva implica em aumento quadrático da concentração deste nutriente na parte aérea dos híbridos de milho estudados. O H1 é o híbrido mais exigente em N e o H3 o mais exigente em K no estádio R1.

Palavras-chaves: equilíbrio entre nutrientes, nível crítico, *Zea mays* L., híbridos.

2.1. Introdução

A agricultura atual é mais complexa do que antes devido ao aumento da demanda para a produção mundial de alimentos e à necessidade de proteger a qualidade ambiental e a conservação dos recursos naturais nas próximas décadas. Atingir simultaneamente alta eficiência de utilização de nutrientes e alta produtividade das culturas tornou-se um desafio com o aumento da demanda mundial por alimentos, o esgotamento dos recursos naturais e a deterioração das condições ambientais (Cassman et al., 2003). O desafio científico é como alimentar o mundo e sua população crescente em um contexto de mudanças limitadas de uso da terra, ou seja, aumento produtivo limitado pela terra arável (Vance et al., 2003).

O milho (*Zea mays* L.) é considerado como um dos cereais mais importantes do mundo, juntamente com o arroz e o trigo, é muito popular devido à sua funcionalidade diversificada como fonte de alimento para seres humanos e animais (Nuss e Tanumihardjo, 2010). É uma cultura com alto potencial produtivo, evidenciado por produtividade média, nos três maiores produtores mundiais deste cereal, de 10,0 toneladas/ha nos Estados Unidos, seguido da China e Brasil com produtividade de 6,0 e 5.2 toneladas/ha respectivamente (FAO, 2015).

A cultura do milho é geralmente considerada de elevada exigência de fertilidade do solo para obter o rendimento máximo (Paponov e Engels, 2003). Consequentemente, é uma das culturas mais exigentes em fertilizantes, em que a disponibilidade de nutrientes e o equilíbrio entre as quantidades de nutriente no solo e na planta constituem-se importantes fatores na nutrição da planta, que se reflete no desenvolvimento vegetal (Bonfim-Silva e Monteiro, 2010). Logo o suprimento inadequado de nutrientes é considerado um dos fatores limitantes ao rendimento de grãos do milho (Rambo et al., 2004). Para que possa expressar todo seu potencial produtivo, a cultura requer que suas exigências nutricionais sejam plenamente atendidas, em virtude da grande extração de nutrientes do solo (Amaral Filho et al., 2005).

Dentre os diversos nutrientes necessários ao desenvolvimento das plantas, destaca-se o nitrogênio (N) que é considerado o macronutriente mais influente sobre a produção de grãos de milho, após o déficit hídrico (Lemaire et al., 2008; Pavinato et al., 2008). Ele é um componente-chave de enzimas e outras proteínas essenciais para todas as funções de crescimento da planta (Bruns e Ebelhar, 2006). Ele é um dos elementos mais absorvidos por

gramíneas como milho e muitas vezes não é suprido adequadamente (Viana e Kiehl, 2010; Foloni et al., 2009; Pavinato et al., 2008).

O N é o grande responsável pela melhoria nas características nutricionais das gramíneas e o seu efeito tem mostrado ser dependente de outros elementos (Mattos e Monteiro, 2003).

Viana and Kiehl (2010) afirmaram que a disponibilidade de N e de potássio (K) e a adequada proporção entre eles são fatores importantes nos processos de crescimento e desenvolvimento das plantas. O metabolismo de N nas plantas requer adequadas quantidades de K no citoplasma (Xu et al., 2006), sendo importante para a produção de aminoácidos e produtividade das culturas. Além disso, tem sido verificado que o K está envolvido na fase final do metabolismo do N (Marschner, 1995). O fornecimento do K para as plantas estimula o aproveitamento do N, possibilitando que sua absorção, assimilação, nutrição e, conseqüentemente, a produtividade sejam aumentadas (Viana e Kiehl, 2010).

As gramíneas demandam elevada quantidade de macronutrientes, principalmente de N e de K (Foloni et al., 2009). No entanto, existe uma concentração de transição entre a deficiência nutricional e os níveis de suficiência do nutriente, conhecida como nível crítico, definido como a concentração de um nutriente em um determinado estágio de crescimento em que ocorre uma redução de 5% ou de 10% no rendimento da cultura (Ulrich e Hills, 1973). Os valores críticos de nutrientes podem ser difíceis de interpretar, simplesmente porque a concentração crítica mínima de um nutriente no tecido da planta para o crescimento ótimo varia de acordo com a idade da cultura e com as alterações nas concentrações de outros nutrientes (Dagbenonbakin et al., 2013).

Importantes aspectos onde os sistemas de recomendação de adubação de milho precisam ser melhorados são o fornecimento de níveis críticos mais precisos para nutrientes com base na produtividade e parâmetros de qualidade e a investigação de fatores que influenciam o estado nutricional da planta, visando uma interpretação mais exata dos dados da análise da planta (Izsáki, 2009).

O crescimento normal de uma planta não depende exclusivamente da concentração ou forma disponível de um elemento no meio de crescimento, mas também das quantidades relativas de outros elementos que estão disponíveis (Bull, 1986).

O reconhecimento da importância do balanço nutricional na produção de uma cultura é um reflexo indireto da contribuição das interações de nutrientes disponíveis no meio (Sumner e Farina, 1986).

Análise de tecido vegetal pode ser uma ferramenta útil para diagnosticar problemas nutricionais das culturas durante o período vegetativo, bem como para ajudar a determinar se os nutrientes estão em equilíbrio (Aref, 2012; Baldock e Schulte, 1996). Fornece ainda informações sobre vários aspectos da nutrição de plantas e pode ser usado para verificar os níveis de fornecimento de nutrientes, para demonstrar as interações entre os nutrientes e para detectar distúrbios nutricionais e anomalias de desenvolvimento (Smith e Loneragan 1997), conferindo uma boa indicação do estado nutricional da planta e da necessidade de fertilizantes (Dagbenonbakin et al., 2013).

Uma alta produtividade é, em grande parte, resultado de adequado suprimento, distribuição e acúmulo de nutrientes pela planta (Fontes et al., 2005). O uso racional de corretivos e fertilizantes é uma das premissas necessárias para o sucesso na produção (Heinrichs et al. 2008). O conhecimento do comportamento vegetal quanto ao uso de nutrientes permite manusear ou modificar o sistema de cultivo para melhorar a eficiência na utilização de N (Viana, 2007). Saber exatamente onde e como a produção de grãos é prejudicada por limitações de nutrientes contribui para melhor gestão da deficiência de nutrientes nas culturas (Lordkaew et al., 2011).

2.2. Objetivos

O objetivo deste trabalho foi verificar doses de nitrogênio (N) ou de potássio (K) sobre a manifestação de sintomas de deficiência ou de excesso de tais nutrientes, bem como sobre aspectos nutricionais e de crescimento da parte aérea e de raízes, e nas relações entre nutrientes em híbridos de milho (*Zea mays* L.) nos estádios V4 e R1, cultivados em casa de vegetação.

2.3. Material e Métodos

2.3.1. Local do experimento e cultura estudada

O trabalho experimental constituiu-se de 2 (dois) experimentos independentes, sendo o primeiro com doses de nitrogênio (N) e o segundo com doses de potássio (K). Ambos foram conduzidos na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP), campus de Pirassununga/SP, no setor das Agrárias.

A cultura estudada foi o milho (*Zea mays* L.) cultivado em casa de vegetação sob cultivo hidropônico, em vasos com solução nutritiva, sendo que os ensaios foram independentes para cada elemento.

2.3.2. Tratamentos

Os tratamentos foram compostos por 3 (três) híbridos de milho: DKB390 PróR2® (H1), Pioneer 30F35® (H2) e Syngenta Status® (H3). Para cada híbrido, foram utilizados 4 (quatro) doses de nutrientes para cada elemento estudado: D1= 5% da dose completa do nutriente; D2= 20% da dose completa; D3= 100% (dose completa) e D4= 200% da dose completa (dose excedente), com 4 (quatro) repetições.

Essas doses de nutrientes correspondem respectivamente a 1,0; 3,0; 15,0 e 30,0 mMol L⁻¹ de N (no experimento com doses de N na solução nutritiva) e 0,3; 1,2; 6,0 e 12,0 mMol L⁻¹ de K (no experimento com doses de K na solução nutritiva).

2.3.3. Solução nutritiva

As soluções nutritivas foram preparadas a partir da solução completa de Hoagland e Arnon (1950), modificada para atender às doses de N e K estabelecidas nos estudos.

A composição da solução nutritiva constituiu-se de: N=210, P=31, K=234, Ca=200, Mg=8, S=64 mg L⁻¹ na solução nutritiva completa (100%), e micronutrientes. No experimento com doses de N na solução, esse nutriente foi adicionado nas doses de 14, 42, 210 e 420 mg L⁻¹ de N (ou 1, 3, 15 e 30 mMol L⁻¹ de N) na solução nutritiva, respectivamente para as doses D1, D2, D3 e D4. No experimento com doses de K na solução, esse nutriente foi adicionado nas doses de 11,7; 46,8; 234 e 468 mg L⁻¹ de K (ou 0,3; 1,2; 6 e 12 mMol L⁻¹ de K) na solução nutritiva, respectivamente para as doses D1, D2, D3 e D4. Os demais nutrientes foram aplicados em concentrações normais. Para o preparo da solução nutritiva de cada vaso, foram utilizadas água deionizada e soluções estoques nos volumes indicados na Tabela 2.3.1.

Tabela 2.3.1. Volumes pipetados da solução estoque para o preparo da solução nutritiva de cada vaso, de acordo com as doses de N e K empregadas em cada experimento.

Sal ou Fertilizante	Concentração da solução estoque g.L ⁻¹	Volume da solução estoque adicionada na solução do vaso (ml L ⁻¹)							
		Doses de N (mMol L ⁻¹)				Doses de K (mMol L ⁻¹)			
		1,0	3,0	15,0	30,0	0,3	1,2	6,0	12,0
1. KH ₂ PO ₄	136,09	1	1	1	1				
2. KCl	74,55	5	5	5	5	0,3	1,2	6	12
3. NH ₄ H ₂ PO ₄	115,03	-	-	-	-	1	1	1	1
4. NH ₄ NO ₃	80,04	0,5	1	4,5	10	2	2	2	2
5. Ca (NO ₃) ₂ .5H ₂ O	254,16	-	0,5	3	5	5	5	5	5
6. CaCl ₂ .2H ₂ O	147,01	5	4,5	2	-	-	-	-	-
7. MgSO ₄ .7H ₂ O	246,47	2	2	2	2	2	2	2	2
8. Solução de micros*		1	1	1	1	1	1	1	1
9. Solução Fe EDHMA**		1	1	1	1	1	1	1	1

O sinal “-” indica a omissão do respectivo nutriente na composição da solução nutritiva. (*) Em 1L de solução estoque: 3,43 g H₃BO₃; 2,88 g MnCl₂.4H₂O; 0,35 g ZnCl₂; 0,11 g CuCl₂; 0,06 H₂MoO₄H₂O. (**) Em 1L de solução estoque: 115 g Fe EDHMA.

2.3.4. Instalação e condução do experimento

A semeadura de milho foi feita em bandejas plásticas com areia lavada, onde as plantas foram mantidas durante uma semana após a emergência e irrigadas com água deionizada. Após esse período, de acordo com a uniformidade, as plantas foram selecionadas e transplantadas 2 (duas) para cada vaso, aplicando-se as soluções nutritivas respectivas para cada tratamento.

Inicialmente, para evitar estresse salino nas raízes das plântulas, cada vaso recebeu solução diluída a 50% do volume de solução estoque indicado, durante 5 (cinco) dias. Após esse período, completou-se a solução dos vasos com os 50% de solução estoque restantes.

A unidade experimental foi constituída por 2 (duas) plantas homogêneas em cada vaso. As plantas foram fixadas na tampa do vaso por uma espuma, na altura do colo da planta, permitindo às raízes ficarem imersas na solução nutritiva de dentro do vaso (Figura 2.3.1).

A Figura 2.3.1 ilustra os vasos e as plantas de milho no dia da instalação do experimento com doses de N na solução nutritiva em casa de vegetação, que foi realizada no dia 14/03/2012.

Figura 2.3.1. Fixação das plantas nos vasos (a), aerção da solução nutritiva (b), sistema de areação dos vasos do experimento de casa de vegetação (c) e vista geral dos vasos do experimento com doses de N (d).

As soluções nutritivas foram trocadas semanalmente, completando-se quando necessário o nível da solução do vaso com água deionizada obtida pela utilização do sistema de filtros de osmose reversa e monitorado o valor do pH para permanecer entre 5,0 e 6,0 mediante o uso de HCl 0,1N e NaOH 1N.

Os vasos eram de polietileno, comportavam 3,6 litros de solução nutritiva e foram pintados externamente com tinta preta para evitar a entrada de luz e consequentemente a proliferação de algas e musgos. Cada vaso recebia automaticamente ar comprimido filtrado e borbulhado durante 10 segundos a cada 30 segundos.

Quando as plantas atingiram o estágio de desenvolvimento com 6 (seis) folhas completamente desenvolvidas (V6), foi realizada troca das plantas para vasos maiores (15 L), para permitir o crescimento das raízes das plantas.

As plantas foram cultivadas até o estágio de embonecamento do milho (R1) e, quando houve necessidade, foram tutoradas com auxílio de arames para não caírem.

2.3.5. Avaliações

As plantas foram avaliadas em 2 (duas) épocas: no estágio V4 (quando as plantas de milho estavam com 4 folhas completamente expandidas) uma vez que a adubação de cobertura de N e K no milho é feita quando as plantas estiverem com 5-6 folhas completamente expandidas (Raij e Cantarella, 1996), e no estágio de embonecamento do milho (R1).

Em cada época de avaliação estabelecida, as plantas foram separadas em partes: folha indicativa (FI), parte aérea (folhas+colmo-FI) e raízes, as quais foram lavadas com água deionizada, levadas à estufa de circulação forçada, a 65°C até peso constante para a determinação da massa seca da parte aérea (MSPA) do milho (folhas+ bainha+colmo) e das raízes (MSRz). A massa seca correspondente às FI foi adicionada à MSPA.

Os materiais das 2 (duas) plantas de cada vaso foram agrupados compondo uma única amostra e posteriormente, foram moídos em moinho tipo Wiley. Todas as amostras moídas foram colocadas em sacos plásticos identificados e encaminhadas ao laboratório para determinação dos teores dos nutrientes, segundo métodos descritos por Bataglia et al. (1983), para os seguintes elementos: nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) na parte aérea e raízes; e N e K na FI dos híbridos.

As amostras foram digeridas por via úmida com ácido sulfúrico, para análise de N, e com ácido nítrico-perclórico, para determinação de P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn. A concentração de N foi determinada através de destilação de amônia em destilador seguido de

titulação. A concentração de P do material vegetal foi determinada pelo método colorimétrico, a de K por fotometria de chama, a de S pelo método de turbidimetria e as concentrações de Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn por espectrofotometria de absorção atômica, segundo métodos descritos por Bataglia et al. (1983).

O nível crítico para N e para K foi obtido pelo cálculo da concentração do elemento na solução nutritiva ou na planta necessária para promover 90% da massa seca máxima.

Foram realizadas interações clássicas entre N e K, N e P, N e S na parte aérea dos híbridos de milho submetidos a doses de N; e relações entre N e K, K e Ca, K e Mg na parte aérea dos híbridos submetidos a doses de K, nos estádios V4 e R1, buscando possíveis relações de sinergismo ou inibição entre os nutrientes estudados.

2.3.6. Delineamento experimental e forma de análise dos resultados

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 4x3 (quatro doses de nutrientes combinados com três híbridos de milho) com 4 (quatro) repetições, em 2 (duas) épocas de coleta, num total de 96 parcelas experimentais. Como a realização de análise química de planta requer a destruição do material vegetal (amostras destrutivas), a cada época de coleta estudada, eram retirados 48 vasos (4 x 3 x 4) referentes à respectiva época de coleta.

Os resultados foram analisados de acordo com o seguinte modelo matemático:

$$Y_{ijk} = m + H_i + N_j + HN_{ij} + e_{ijk}$$

onde,

Y_{ijk} é o valor observado na parcela que recebeu o tratamento ij na repetição k ;

m é a média geral do experimento;

H_i é o efeito dos híbridos de milho;

N_j é o efeito dos doses de nutrientes aplicados na parcela;

e_{ijk} é o efeito dos fatores não controlados na parcela que recebeu os tratamentos ij na repetição k .

Nos casos em que o teste F foi significativo somente para N_j , foi realizada uma única análise de regressão para todos os híbridos. Nos casos em que o teste F foi significativo para HN_{ij} , ou seja, se houve interação entre os híbridos estudados e as doses de nutrientes aplicadas, o desdobramento visou estudar as doses dentro do H_i . Neste caso, foram realizadas três análises de regressão, sendo uma para cada híbrido e foram avaliadas através da significância dos coeficientes de regressão. Os coeficientes do modelo de regressão foram testados pelo teste t , e a probabilidade da significância estatística de 5%.

2.4. Resultados e discussão

2.4.1. Nitrogênio

a) Sintomas de deficiência de N

Os sintomas visuais iniciais de deficiência de N podem ser observados na Figura 2.4.1.

Figura 2.4.1. Imagens da base de híbridos de milho (H1, H2 e H3 de cima para baixo) no estágio V4 submetidos à dose 1 mMol L⁻¹ de N (D1), na primeira coluna, e à dose 3 mMol L⁻¹ de N (D2), na segunda coluna.

Os sintomas visuais de deficiência de N foram verificados em todos os híbridos cultivados com 5% e 20% de N na solução nutritiva e foram caracterizados por amarelecimento na forma de “V” invertido inicialmente pela ponta das folhas mais velhas, progredindo para a base e demais folhas, conforme pode ser observado na Figura 2.4.1. Esse sintoma é devido à participação do N na estrutura da clorofila, prejudicando o processo de fotossíntese e consequentemente leva à clorose (Epstein e Bloom, 2006; Malavolta, 2006; Havlin et al., 2005).

Figura 2.4.2. Folha mais velha do H2 submetido às doses D1 (a), D2 (b) e D3 (c) e sistema radicular (d) do H2 conduzido na D1 (à esquerda) e D3 (à direita) estágio R1 e embonecamento do H2 na D2 (e) e D3 (f).

Nas plantas deficientes em N foi visualmente aparente reduções no tamanho de folhas e no crescimento das plantas, além da redução de clorofila, evidenciada pela coloração amarelada mais intensa em plantas com a menor dose de N (D1), amarelado menos intenso em D2 e para um verde escuro nas plantas sem deficiência de nutriente (D3) (Figuras 2.4.1 e 2.4.2).

De acordo com Epstein e Bloom (2006) e Raij (1991), as folhas mais velhas da planta são as primeiras a serem afetadas pela deficiência de N, uma vez que este nutriente transloca-se de regiões mais velhas para as mais jovens, que crescem ativamente, devido à sua mobilidade na planta.

b) Massa seca da parte aérea e das raízes

Como esperado a MSPA e MSRz foram altamente correlacionadas com a concentração de N na solução nutritiva em V4 e em R1. A interação entre doses de N e híbridos de milho foi significativa ($p < 0,05$) para a MSPA e MSRz nos dois estádios avaliados, conforme observado na Figura 2.4.3, indicando que estes parâmetros foram afetados pelo incremento de N solução nutritiva e também pelo híbridos estudados.

Figura 2.4.3. Massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca de raízes (MSRz) de 3 (três) híbridos de milho (H1, H2 e H3) no estágio V4 (a,b) e R1 (c,d) em função de doses de nitrogênio na solução nutritiva. *Significativo a 5%.

Os híbridos que receberam as menores doses de N (5% e 20%) apresentaram redução no crescimento e folhas menores, sendo mais drástica nos híbridos que receberam 5% de N, que não chegaram a completar seu ciclo de desenvolvimento. Essa redução do crescimento foi caracterizada pela baixa produção de MSPA e de MSRz nas menores doses de N na solução nutritiva em V4 (Figuras 2.4.3a e 2.4.3b) e em R1 (Figuras 2.4.3c e 2.4.3d). Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Ciampitti e Vyn (2011), estudando doses de N em híbridos de milho e as respostas fisiológicas associadas.

A resposta da produção de MSPA ao incremento de N em V4 (Figura 2.4.3a) e em R1 (Figura 2.4.3c) ajustou-se ao modelo quadrático ($p < 0.01$) para todos os híbridos, exceto H3 em V4. A produção máxima de MSPA em V4, calculada pela equação de regressão, foi igual a 3,0 (H1) e 3,9 g planta⁻¹ (H2), respectivamente para as doses 18,3 e 27,5 mMol L⁻¹ de N na solução. Em R1, a produção máxima de MSPA atingida foi de respectivamente 24,0 (H1); 29,0 (H2) e 25 (H3) g planta⁻¹, respectivamente nas doses 25,5; 23,9 e 22,6 mMol L⁻¹ de N na solução. Aumentos na produção de MSPA com o incremento da adubação nitrogenada também foram observados por Romualdo et al. (2014) em milho, por Bonfim-Silva e Monteiro (2010) em capim-braquiária (*Brachiaria decumbens* Stapf.), por Premazzi e Monteiro (2002) em capim-Tifton 85 (*Cynodon* sp.) e por Colozza (1998) em capim-aruaana (*Panicum maximum* cv. Aruana).

A resposta da produção de MSRz ao incremento de N na solução ajustou-se ao modelo quadrático ($p < 0.01$) em H1 e H2, e modelo linear em H3 no estágio V4 (Figura 2.4.3b); enquanto que no estágio R1 ajustou-se ao modelo quadrático em H2 e H3, e linear em H1 (Figura 2.4.3d). A produção máxima de MSRz em V4 foi encontrada nas doses 15,4 (H1) e 20,0 mMol L⁻¹ (H2) e foi igual a 1,1 e 1,3 g planta⁻¹, respectivamente para os híbridos H1 e H2. No estágio R1, a produção de MSRz foi de 24,0 g planta⁻¹ em H1 e H2 na dose 20,4 mMol L⁻¹ de N. Aumentos quadráticos na produção de MSRz no estágio R1 com o incremento de N na solução nutritiva também foram observados por Romualdo et al. (2014) em milho. No estágio V4 esses autores verificaram pequeno aumento dessa variável com o aumento de N na solução.

É conhecida a atuação do N na divisão celular, constituinte de aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos, que participam dos processos de absorção iônica, fotossíntese e respiração, além de integrar a molécula de clorofila, e que sua deficiência leva à redução no crescimento da planta (Aref, 2012; Epstein e Bloom, 2006; Malavolta, 2006; Marschner, 1995). Malavolta e Moraes (2007) afirmaram que as alterações provocadas pela deficiência de N nas plantas levam ao seu menor crescimento e folhas menores devido ao menor número de células.

Assim, plantas bem supridas de N apresentam maior capacidade de sintetizar carboidratos durante a fotossíntese, resultando em maior acúmulo de biomassa (Arnon, 1975).

De acordo com Marschner (2012), os nutrientes do solo são absorvidos pelas raízes das plantas através da rizosfera, que é a região de interação entre a planta e o solo. Portanto, o processo de crescimento da raiz e da rizosfera têm uma grande influência na utilização eficiente dos nutrientes pelas plantas, e, assim, influenciar profundamente a produção agrícola e sustentabilidade (Zhang et al., 2010). Deste modo, o crescimento da raiz e da rizosfera fornece uma abordagem eficaz para melhorar a eficiência do uso de nutrientes e produtividade da cultura ao mesmo tempo (Shen et al., 2013).

Pode-se observar ainda que no estágio de desenvolvimento R1, as plantas atingiram a sua produção máxima de massa seca (parte aérea ou raízes) acima da dose máxima preconizada por Hogland e Arnon (1950), que recomendam 15 mMol L^{-1} (ou 210 g.L^{-1}) de N na solução nutritiva.

c) Aspectos nutricionais de híbridos de milho

Nitrogênio na folha indicativa

A interação entre doses de N na solução e híbridos de milho foi significativa ($p < 0,05$) para a concentração de N na FI em V4. A concentração de N respondeu significativamente segundo modelos quadráticos para FI nos dois estádios avaliados (Figura 2.4.4). As plantas de milho conduzidas sem omissão de nutriente apresentaram concentração de N foliar superior àquelas conduzidas nas menores doses de N, concordando com Romualdo et al. (2014) e Ciampitti e Vyn (2011).

Figura 2.4.4. Concentração de N na folha indicativa em V4 (a) e em R1 (b) de três híbridos de milho em função da concentração de N na solução nutritiva. *Significativo a 5%. --- Linhas tracejadas referem-se aos níveis foliares adequados de N para a folha indicativa do milho no estágio R1 de acordo com Raij e Cantarela (1996).

Nota-se que, nos híbridos cultivados com 5% e 20% de N na solução, a concentração deste nutriente na FI encontra-se abaixo dos níveis foliares de N adequados para o milho em R1, que de acordo com Fancelli e Dourado Neto (2000) devem se encontrar entre 30 e 40 g kg⁻¹. As concentrações de N na FI para os híbridos conduzidos sem omissão de nutriente encontraram-se dentro dessa faixa adequada para o milho.

As concentrações máximas de N na FI estão apresentadas na Tabela 2.4.1. Pode-se observar que para atingir a máxima concentração de N foliar pelas plantas de milho em V4 e em R1, foram necessárias doses de N na solução acima de 15 mMol L⁻¹.

Tabela 2.4.1. Concentração máxima de N na FI de plantas de milho nos estádios V4 e R1, obtida a partir da respectiva equação de regressão.

Híbrido	N máximo na solução nutritiva (mMol L ⁻¹)	N foliar máximo (g kg ⁻¹)	N máximo na solução nutritiva (mMol L ⁻¹)	N foliar máximo (g kg ⁻¹)
V4			R1	
H1	21,5	28,4	30,8	35,2
H2	26,0	30,2	30,8	35,2
H3	20,3	25,8	30,8	35,2

Pelas curvas ajustadas apresentadas na Figura 2.4.5, pode-se estabelecer uma faixa de suficiência de N para os híbridos de milho estudados, que variou de 7,8 a 24,7 mMol L⁻¹ em H1 e de 11,3 a 29,0 mMol L⁻¹ de N em H2 no estádio V4. Enquanto que no estádio R1, variou de 13,2 a 29,4 e de 14,3 a 29,8 mMol L⁻¹ de N em H1 e H2 respectivamente. Já o H3 alcançou 90% da massa seca relativa apenas com 24,3 mMol L⁻¹ de N na solução. Acima dos valores máximos estabelecidos nesta faixa de suficiência a probabilidade de resposta ao acréscimo de N na solução é muito baixa.

Figura 2.4.5. Massa seca relativa de três híbridos de milho no estádio V4 e R1 em função da concentração de N na solução nutritiva. *Significativo a 5%.

--- Linhas tracejadas referem-se ao nível crítico (90% da massa seca relativa).

Pode-se observar que cada híbrido apresentou uma faixa de suficiência de N diferenciada dos demais híbridos estudados, devendo-se, portanto, atentar às diferenças de exigência nutricional de cada híbrido (Figura 2.4.5).

Para o milho em R1 alcançar 90% da produção máxima de massa seca (nível crítico), foi necessário uma concentração mínima 13,2 (H1) e 14,3 (H2) e 24,3 mMol L⁻¹ de N (H3). Nota-se portanto que pequenos decréscimos da concentração de N na solução podem provocar grande redução da produção de massa seca. Concordando com Aref (2012), que afirma que pequenas alterações na concentração de N para algumas culturas podem resultar em grandes efeitos sobre o rendimento e o crescimento das plantas. Portanto, é importante que o nível de N seja mantido dentro dos limites prescritos da faixa de suficiência pelo uso apropriado de fertilizante nitrogenado (Plank, 1989).

Na Figura 2.4.6, pode ser observado que a faixa de suficiência de N foliar também variou com os híbridos estudados.

Figura 2.4.6. Massa seca relativa de três híbridos de milho no estágio V4 e R1 em função da concentração foliar de N. *Significativo a 5%.

A relação entre a concentração de N foliar e a produção relativa de massa seca de híbridos de milho mostrou que o N satisfatório para atingir 90% da produção relativa de massa seca em V4 foi de 15,1 a 26,9 g kg⁻¹ de N no tecido foliar em H1, 15,8 a 26,9 g kg⁻¹ de N em H2 e de 17,9 a 26,4 g kg⁻¹ de N no tecido foliar em H3. Em R1 essas faixas foram superiores sendo de 29,2 a 33,4 g kg⁻¹ de N em H2 e de 26,1 a 35,7 g kg⁻¹ de N no tecido foliar em H3. O H1 atingiu 90% da produção relativa quando a concentração de N tecido foliar foi de 34,9 g kg⁻¹.

A massa seca relativa aumentou com o aumento das doses de N, fato também observado e explicado por Ciampitti e Vyn (2011) como sendo um fenômeno que foi positivamente associado ao maior crescimento da cultura e maior absorção de N (evidenciada pela maior concentração foliar).

Parte aérea

A interação entre doses de N na solução nutritiva e híbridos de milho foi significativa ($p < 0,05$) para a concentração de N (Figura 2.4.7a), P (Figura 2.4.7b), K (Figura 2.4.7c), Mg (Figura 2.4.7e) e S (Figura 2.4.7f) na parte aérea das plantas em V4, bem como para todos os macronutrientes em R1 (Figura 2.4.8), e não significativa para a concentração de cálcio (Ca) na parte aérea em V4 (Figura 2.4.7d).

Figura 2.4.7. Concentração de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) e S (f) na parte aérea de três híbridos de milho no estágio V4 em função da concentração de N na solução nutritiva. *Significativo a 5%.

A concentração de N na parte aérea foi significativamente ($p < 0,05$) afetada pela disponibilidade de N na solução nutritiva em V4 (Figura 2.4.7a) e R1 (Figura 2.4.8a), e respondeu segundo modelos quadráticos em todos os híbridos.

Figura 2.4.8. Concentração de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) e S (f) na parte aérea de três híbridos de milho no estágio R1 em função da concentração de N na solução nutritiva. *Significativo a 5%.

A concentração máxima de N na parte aérea em V4, encontrada pela equação de regressão, foi de 65,1 (H1), 60,6 (H2) e 59,1 g kg⁻¹ (H3) respectivamente nas doses 23,5; 25,9 e 28,7 mMol L⁻¹ de N na solução nutritiva. Em R1, os valores máximos de N na parte aérea do milho foram 29,0 (H1), 30,0 (H2) e 26,0 g kg⁻¹ (H3) respectivamente com 22,2; 24,1 e 15,9 mMol L⁻¹ de N na solução. Ciampitti e Vyn (2011) estudaram o efeito de doses de N no

cultivo de milho e verificaram efeitos significativos ($p < 0,05$) do suprimento deste nutriente sobre a concentração total de N na parte aérea das plantas. Batista e Monteiro (2007), estudando a interação entre doses de N e S para o capim-marandu (*Brachiaria brizantha* cv. Marandu) verificaram que as concentrações de N nas folhas ajustaram-se ao modelo quadrático de regressão em função das doses de N, com máxima concentração de $31,0 \text{ g kg}^{-1}$.

A concentração de P na parte aérea em V4 aumentou com o incremento de N na solução, ajustando-se ao modelo quadrático para o H3, atingindo um máximo de $5,0 \text{ g kg}^{-1}$ de P na concentração de $21,3 \text{ mMol L}^{-1}$ de N na solução nutritiva, e modelo linear para H1 e H2 (Figura 2.4.7b). No estágio R1, essa concentração ajustou-se ao modelo quadrático nos três híbridos estudados. Entretanto a concentração de P na parte aérea foi inferior nas plantas cultivadas com as maiores doses de N (Figura 2.4.8b).

A concentração de K na parte aérea do milho ajustou-se ao modelo quadrático em H1 e linear em H2 e H3 em V4. Já no estágio R1, todos híbridos estudados responderam às doses de N segundo modelos quadráticos. Pode-se observar que na ausência de aplicação de N, a concentração média de K na parte aérea foi de $18,7 \text{ g kg}^{-1}$ em V4, enquanto que na maior dose utilizada (200% de N) foi de $33,5 \text{ g kg}^{-1}$ (Figura 2.4.7c), em R1 essa variação foi bem menor. Mesmo assim, a concentração de K na parte aérea ficou dentro dos níveis adequados para esse nutriente no milho ($17\text{-}35 \text{ g Kg}^{-1}$) estabelecidos por Malavolta (2006). Taiz e Zeiger (2004) afirmam que o N estimula o crescimento de folhas e raízes, promovendo maior absorção de outros nutrientes, e sugere ainda que o íon NO_3^- favorece a absorção do K^+ e/ou o seu transporte.

A análise de regressão foi não significativa ($p < 0,01$) para a concentração de Ca em V4 (Figura 2.4.7d) e em R1 (Figura 2.4.8d) e também para a concentração de Mg no H3 em V4 (Figura 2.4.7e). No estágio V4, a concentração de Mg em H1 e H2 respondeu ao aumento de N na solução nutritiva segundo modelos quadráticos. As plantas conduzidas com alguma omissão de N apresentaram Mg na parte aérea inferior àquelas conduzidas com 100% de N. Já no estágio R1, a concentração de Mg na parte aérea ajustou-se a modelos lineares em H1 e H3 e quadrático em H2. Porém houve decréscimo deste parâmetro com o aumento da concentração de N na solução. Izsáki (2009), estudando o efeito do fornecimento de N sobre a concentração foliar de nutrientes no milho, observaram que a melhor oferta de N aumentou significativamente a concentração de Ca e Mg na folha.

A variação na concentração de S na parte aérea ajustou-se à equação quadrática para todos os híbridos dos estádios V4 (Figura 2.4.7f) e R1 (Figura 2.4.8f) em função do fornecimento de N. As concentrações de S neste trabalho estão próximas daquelas

encontradas por Bonfim-Silva e Monteiro (2010) para o capim-braquiária (*Brachiaria decumbens* Stapf.) submetido a doses de N em solução nutritiva, que variaram de 1,10 a 2,19 g kg⁻¹. No estágio V4, observou-se ainda redução na concentração de S na parte aérea em H2 e H3 com o incremento de N na solução. A menor concentração de S na parte aérea ocorreu nas doses de 30,0 mMol L⁻¹ em H2 e 28,6 mMol L⁻¹ em H3. Considerando que a máxima produção de MSPA foi obtida na dose 27,5 e 37,5 mMol L⁻¹ de N, respectivamente para H2 e H3, pode-se considerar que provavelmente a mínima concentração de S em V4 foi devida ao efeito de diluição ocasionada pela maior parte aérea da gramínea quando submetida a doses mais elevadas de N, uma vez que à medida que se aumentou a dose de N, observou-se incremento da massa seca da parte aérea.

Pode-se observar também, que houve redução da concentração de N, P, K e Mg no estágio R1 em relação à V4. De acordo com Aref (2012), é bem conhecido que as concentrações de nutrientes em tecidos foliares muda com a idade da planta. Segundo Walworth et al. (2005), as concentrações de N, P, K, e Mg tendem a diminuir à medida que a idade evolui.

No estágio V4, as concentrações de Cu (Figura 2.4.9a), Mn (Figura 2.4.9c) e Zn (Figura 2.4.9d) na parte aérea foram superiores nas plantas submetidas à deficiência de N.

Figura 2.4.9. Concentração de Cu (a), Fe (b), Mn (c) e Zn (d) na parte aérea de 3 híbridos de milho em V4 em função da concentração de N na solução nutritiva. *Significativo a 5%.

A concentração de Fe na parte aérea (Figura 2.4.9b) foi menor nas plantas com as menores doses de N na solução e respondeu segundo modelos quadráticos nos três híbridos.

A maior oferta de N reduziu significativamente em R1 ($p < 0,05$) as concentrações de Cu, Fe, Mn e Zn da parte aérea e resultou em estreita correlação entre N-Fe, N-Mn e N-Zn (Figura 2.4.10) em todos os híbridos, exceto para o Cu em H1 (que aumentou com o fornecimento de N), para o Fe em H3 e para o Zn em H1 (Figura 2.4.10).

Figura 2.4.10. Concentração de Cu (a), Fe (b), Mn (c) e Zn (d) na parte aérea de 3 híbridos de milho em R1 em função da concentração de N na solução nutritiva. *Significativo a 5%.

O Fe é o micronutriente requerido em maior quantidade pelas plantas, tem importante papel como componente de enzimas envolvidas em complexos orgânicos no mecanismo de transferência de elétrons. É necessário para a síntese de alguns complexos Fe-proteínas envolvidos na assimilação de N e S, para a formação de clorofila e está diretamente relacionado ao metabolismo de ácidos nucleicos (Malavolta, 2006; Taiz e Zeiger, 2009). Segundo Álvarez-Fernández et al. (2005) a relação do Fe com os outros nutrientes envolvidos na fotossíntese permite entender o comportamento do ferro no balanço nutricional da planta.

Raízes

A interação entre doses de N na solução nutritiva e híbridos de milho foi não significativa para a concentração de N nas raízes do milho em V4 (Figura 2.4.11a) e em R1 (Figura 2.4.12a) e para a concentração de K nas raízes em R1 e significativa para os demais macronutrientes ($p < 0,05$) nos estádios V4 (Figura 2.4.11) em R1 (Figura 2.4.12).

Figura 2.4.11. Concentração de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) e S (f) nas raízes de três híbridos de milho no estágio V4 em função da concentração de N na solução nutritiva. **Significativo a 1%.

A concentração de N nas raízes respondeu ao acréscimo deste nutriente na solução nutritiva segundo modelo quadrático positivo ($p < 0,05$) em V4, conforme a equação $y = -0.024x^2 + 1.15x + 6.65$ ($R^2 = 0,99^*$), atingindo a concentração máxima de N igual a $20,4 \text{ g kg}^{-1}$ na

concentração de 24.0 mMol L^{-1} de N na solução nutritiva (Figura 2.4.11a) e segundo modelo linear em R1 (Figura 2.4.12a).

Figura 2.4.12. Concentração de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) e S (f) nas raízes de três híbridos de milho no estágio R1 em função da concentração de N na solução nutritiva. *Significativo a 5%.

Em ambos os estádios avaliados, a concentração de N nas raízes das plantas conduzidas sem omissão de nutriente foi superior ao das plantas com alguma deficiência de N. Esses resultados concordam com os encontrados por Peng et al. (2013), que estudando a concentração crítica de N no solo para maximizar o rendimento de grãos de milho, verificaram que a deficiência de N no milho reduziu significativamente a massa seca e a concentração de N da planta. De acordo com Ciampitti e Vyn (2011), a contínua absorção de

N pela raiz durante o enchimento de grãos aumenta a duração de fotossíntese do dossel e consequentemente possibilita o incremento da produção final de grãos.

Pode-se observar que na ausência da aplicação de N, a concentração média desse nutriente nas raízes foi de 7,43 g kg⁻¹, enquanto que na mais alta concentração (D4) foi de 20,14 g kg⁻¹. Colozza (1998) afirma que em presença de maior quantidade de N no solo, as raízes também passam a funcionar como órgão armazenador desse nutriente.

Nas raízes em V4, a concentração de K em H1 não foi significativa às doses de N e foi significativa em H2 e H3 ajustando-se ao modelo quadrático decrescente (Figura 2.4.11c). A resposta da concentração de S nas raízes ao aumento de N na solução em V4 não foi significativa em H1. No entanto, a significância foi observada em H2 e em H3, com ajuste ao modelo quadrático de regressão (Figura 2.4.11f), e máxima concentração igual a 5,9 g kg⁻¹ (H2) e 6,3 g kg⁻¹ (H3), respectivamente na dose 23,3 e 18,3 mMol L⁻¹. Rego et al. (2007) afirmam que os resultados sobre as respostas de absorção de nutrientes e produtividade do milho demonstram claramente a importância do S para aumentar o rendimento do milho.

Foram observadas interações significativas ($p < 0.05$) entre a concentração de N e os micronutrientes nas raízes dos híbridos em V4 (Figura 2.4.13) e em R1 (Figura 2.4.14), exceto para o Cu em V4 e R1 e para o Fe em V4.

Figura 2.4.13. Concentração de B (a), Mn (b) e Zn (c) nas raízes de três híbridos de milho no estágio V4 em função da concentração de N na solução nutritiva. *Significativo a 5%.

A concentração de Mn e Zn nas raízes reduziram significativamente com o aumento de N na solução nos (dois) 2 estádios avaliados, discordando dos resultados encontrados por Bruns e Ebelhar, (2006), que verificaram que as concentrações desses micronutrientes aumentaram significativamente ($p < 0.05$) com o aumento de N na adubação.

Figura 2.4.14. Concentração de B (a), Fe (b), Mn (c) e Zn (d) nas raízes de três híbridos de milho no estágio R1 em função da concentração de N na solução nutritiva. *Significativo a 5%.

d) Relações clássicas entre N e K, N e P, N e S na parte aérea

As diferenças nas doses de N para os híbridos de milho foram refletidas na concentração de N na parte aérea (Figuras 2.4.7a e 2.4.8a). Estudos sobre o efeito de doses de N na concentração deste nutriente na parte aérea e as interações com o P, K e S revelaram correlações significativas ($p < 0.05$) somente no estágio V4.

O acréscimo da concentração de N na parte aérea promoveu aumento significativo ($p < 0.05$) na concentração de K na parte aérea do H2 e H3, o que resultou em correlações positivas para esses dois híbridos, e correlação negativa para o H1 (Figura 2.4.15). Büll (1993) afirmou que a interação entre N e K obedece à Lei do Mínimo, pois quando o N é aplicado em quantidade suficiente para haver elevação da produção, essa passa a ser limitada pelos baixos teores de K aplicados.

Viana e Kiehl (2010) afirmaram que a disponibilidade de N e K e a adequada

proporção entre eles são fatores importantes nos processos de crescimento e desenvolvimento das plantas. O metabolismo de N nas plantas requer adequadas quantidades de K no citoplasma (Xu et al., 2003). Ainda, tem sido verificado que o K está envolvido na fase final do metabolismo do N (Marschner, 1995). O fornecimento do K para as plantas estimula o aproveitamento do N, possibilitando que sua absorção, assimilação, nutrição e, conseqüentemente, a produtividade sejam aumentadas (Viana e Kiehl, 2010).

A concentração de P na parte aérea aumentou significativamente ($p < 0,05$) com o aumento de N na parte aérea, resultando em correlações positivas (Figura 2.4.15b). Esses resultados concordam com os encontrados por Izsáki (2009), que estudando o efeito de doses de N sobre a concentração de nutrientes em folhas de milho no início do florescimento, bem como sobre as interações entre os nutrientes, verificou correlação positiva e quadrática em um dos anos de estudos.

Figura 2.4.15. Relação entre concentração de N e K (a), N e P (b) e N e S (c) na parte aérea de três híbridos de milho no estágio V4. *Significativo a 5%.

As concentrações de S foram influenciadas pela concentração de N na parte aérea. A relação entre N e S na parte aérea respondeu segundo modelos quadráticos em todos os híbridos (Figura 2.4.15c). Com aumento da concentração de N na parte aérea, houve redução na concentração de S em H2 e H3, concordando com Braga (2001). A relação N:S na parte aérea variou de 5,0:1 a 40,9:1, concordando com Batista (2002), que encontrou relação N:S

entre 6,8:1 a 30,2:1 em capim Marandu (*B. brizantha* cv. Marandu) em função de doses de N e S na solução nutritiva. Bonfim-Silva e Monteiro (2010) encontraram N:S em torno de 7:1 nas lâminas foliares de capim sem adubação. Esses extremos são inadequados para gramíneas segundo Dijkshoorn e Van Wijk (1967), que propuseram para gramíneas em geral a relação de 14:1. Bonfim-Silva e Monteiro (2010) afirmam que o equilíbrio entre as quantidades de N e de S no solo e na planta é importante porque reflete no estado nutricional do vegetal.

Monteiro e Carriel (1987) e Monteiro et al. (2004) afirmam que a relação N:S adequada para gramíneas deve estar em torno de 14 a 15:1. A relação N:S é usada como um índice para determinar a resposta das culturas ao N. O equilíbrio entre as quantidades de N e de S na planta é importante porque reflete seu estado nutricional. O N é o grande responsável pela melhoria nas características nutricionais das gramíneas e o seu efeito tem mostrado ser dependente do S (Mattos e Monteiro, 2003). O S, assim como o N, é de extrema importância para a nutrição da gramínea, por ser componente dos aminoácidos cisteína, cistina e metionina. Além disso, faz parte da ferredoxina, molécula transferidora de elétrons e envolvida na fotossíntese (Mengel e Kirkby, 2001). Silveira et al. (2005) alertam a necessidade de se atentar para a adubação com S, principalmente quando se aplicam doses elevadas de N.

Grignani et al. (2007) afirmam que o equilíbrio entre os nutrientes é frequentemente utilizado como um indicador da capacidade de um sistema em manter a fertilidade do solo, bem como a qualidade da água em ecossistemas adjacentes. Nutrientes acima da exigência da cultura são propensos à lixiviação, enquanto que abaixo da necessidade das culturas podem reduzir a fertilidade do solo, que por sua vez reduz a produtividade das culturas (Khanal et al., 2014).

2.4.2. Potássio

a) Sintomas de deficiência de K

Os sintomas visuais de deficiência de K foram identificados inicialmente nas folhas mais velhas em todos os híbridos submetidos às doses mais baixas de K na solução (D1 e D2). (Figura 2.4.17).

Figura 2.4.17. Imagens da base de híbridos de milho (H1, H2 e H3 de cima para baixo) no estágio V4 submetidos à dose 0,3 mMol L⁻¹ de K (T1), na primeira coluna, e à dose 1,2 mMol L⁻¹ de K (T2), na segunda coluna.

Esses sintomas avançaram na concentração de K ainda mais reduzida (D1), e manifestaram-se de forma mais drástica no H2 (Figura 2.4.17). Os sintomas de deficiência de K foram caracterizados por clorose seguida de necrose das margens e pontas das folhas mais velhas inicialmente, como observado na Figura 2.4.18, além de redução do crescimento das plantas e raízes dos híbridos de milho estudados. Sintomas semelhantes foram encontrados por Prabhu et al. (2007), Minjian et al. (2007) e Malavolta (2006).

Figura 2.4.18. Folha mais velha de plantas de milho com deficiência de K (D1) (a) comparada à folha de uma planta sem deficiência (b) no estágio V8. Acúmulo de putrescina no colmo (c) e na folha mais velha (d) e embonecamento (e) do H2 no estágio R1 conduzido na D1. Embonecamento (f) do H2 nas doses de K na solução nutritiva.

Esses sintomas são devidos à reconhecida participação do K na fotossíntese das plantas (Romheld e Kirkby, 2010). De acordo com Zhao et al. (2001) a manutenção geral da fotossíntese exige K e a deficiência desse nutriente reduz a atividade fotossintética e o teor de clorofila. Szczerba et al. (2009) afirmam que o K desempenha papéis bioquímicos e biofísicos importantes nas plantas.

Outro sintoma observado foi o aparecimento de manchas marrons ao longo da nervura das folhas mais velhas e dos colmos dos híbridos submetidos à omissão completa de K (Figura 2.4.18d). Esse sintoma também foi observado por Romualdo (2013). Segundo Malavolta e Crocomo (1982), nas regiões afetadas pela ausência do nutriente em questão (bordas, nervuras e pontas de folhas velhas) ocorrem acúmulo de putrescina, composto fitotóxico na planta originado de aminoácidos básicos. Em plantas deficientes em K, ocorre redução na síntese proteica e acúmulo dos aminoácidos básicos, levando a um grande aumento no teor de putrescina.

b) Massa seca da parte aérea e raízes

A interação entre dose de K e híbridos foi significativa ($P < 0,01$) para MSPA e MSRz nos dois estádios de desenvolvimento avaliados (Figura 2.4.19). Nos três híbridos estudados, esses parâmetros aumentaram com o acréscimo de K na solução nutritiva e responderam segundo modelos quadráticos, exceção apenas para o MSRz do H1 em V4, que apresentou modelo linear.

Aumentos na produção de MSPA com o incremento da adubação potássica também foram observados por Minjian et al. (2007) e Bruns e Ebelhar (2006) em plantas de milho; Niu et al. (2013) e Viana e Kiehl (2010) em plantas de trigo e Oliveira et al. (2001) em soja.

Nos dois estádios avaliados, MSPA e MSRz não apresentaram diferenças significativas ($p < 0,01$) entre os híbridos que receberam a menor dose de K na solução nutritiva (D1). O H2 foi o que apresentou maior MSPA e MSRz nos demais doses de K. Minjian et al. (2007) estudando características fisiológicas entre dois híbridos de milho submetidos à deficiência de K em solução nutritiva, verificaram aumentos significativos na produção de MSRz com o aumento de K na solução, bem como diferenças entre os híbridos para este parâmetro.

A produção máxima de MSPA em V4, foi igual a 4,5 (H1), 5,9 (H2) e 4,7 g planta⁻¹ (H3), respectivamente para as doses 7,5; 7,4 e 6,9 mMol L⁻¹ de K na solução. Já em R1, a produção máxima de MSPA atingida foi de 42,4 (H1); 57,2 (H2) e 44,7 (H3) g planta⁻¹, respectivamente nas doses 8,2; 8,0 e 9,4 mMol L⁻¹ de K na solução, enquanto que a produção

máxima de MSRz em V4 foi de 1,7 g planta⁻¹ nas doses 8,9 e 8,0 mMol L⁻¹ de K na solução. E em R1 foi de 33,0; 42,1 e 31,6 g planta⁻¹, respectivamente nas doses 9,0; 9,7 e 10,3 mMol L⁻¹ de K na solução.

Figura 2.4.19. Massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca de raízes (MSRz) de 3 (três) híbridos de milho (H1, H2 e H3) nos estádios V4 (a, b) e R1 (c, d) em função de doses de K na solução nutritiva. *Significativo a 5%.

O K é considerado o principal cátion de regulação osmótica nas células das raízes da planta, e gera pressão de turgescência para a expansão das células na zona de alongamento das raízes (Dolan e Davies, 2004). De acordo com Tsay et al. (2011), a deficiência de K afeta significativamente o crescimento e arquitetura das raízes, incluindo inibição do crescimento da raiz primária e do estímulo ao alongamento do cabelo da raiz.

c) Aspectos nutricionais de híbridos de milho

Potássio na folha indicativa

A omissão de K (D1) na solução nutritiva resultou em concentração de K na FI significativamente ($p < 0.05$) inferior do que nas plantas que receberam este nutriente na solução. Como era esperado, a concentração de K na FI aumentou com o acréscimo deste nutriente na solução nutritiva em todos os híbridos e estádios estudados (Figura 2.4.20), concordando com resultados obtidos por Akram (2013) em híbridos de milho e Niu et al. (2013) em plantas de trigo.

Figura 2.4.20. Concentração de K na folha indicativa em V4 (a) e em R1 (b) de três híbridos de milho em função da concentração de K na solução nutritiva. *Significativo a 5%.

--- Linhas tracejadas referem-se aos níveis foliares adequados de K para a folha indicativa do milho no estágio R1 de acordo com Raij e Cantarela (1996).

Pode-se observar também que houve redução da concentração de K na FI no estágio R1 em relação à V4. Segundo Walworth et al. (2005), a concentração de K tende a diminuir à medida que a idade evolui.

Notou-se que, nos híbridos cultivados com 5% e 20% de K na solução em R1, a concentração deste nutriente na FI encontra-se abaixo dos níveis foliares adequados para o milho neste estágio de desenvolvimento, que de acordo com Fancelli e Dourado Neto (2000) devem encontrar-se entre 20 e 40 g kg⁻¹. A concentração de K na FI para os híbridos conduzidos sem omissão de nutriente encontrou-se dentro dessa faixa adequada para o milho.

As concentrações máximas de K na FI (Tabela 2.4.2) foram de 46,0; 45,1 e 52,1 g kg⁻¹ respectivamente em 9,7; 10,5 e 8,0 mMol L⁻¹ de K em V4. Notou-se em R1 que, para um mesmo nível de K na solução (8,7 mMol L⁻¹), o H2 apresentou concentração máxima de K na FI (21,5 g kg⁻¹) inferior à do H3 (32,3 g kg⁻¹) indicando possivelmente diferenças de exigência nutricional entre eles.

Tabela 2.4.2. Concentração máxima de K na FI de plantas de milho nos estádios V4 e R1, obtida a partir da respectiva equação de regressão.

Híbrido	K máximo na solução nutritiva (mMol L ⁻¹)	K foliar máximo (g kg ⁻¹)	K máximo na solução nutritiva (mMol L ⁻¹)	K foliar máximo (g kg ⁻¹)
V4			R1	
H1	9,7	46,0	10,9	31,8
H2	10,5	45,1	8,7	21,5
H3	8,0	52,1	8,7	32,3

Definindo como nível crítico o valor de K da solução no qual ocorre uma redução no rendimento de, no máximo, 10% (Scherer, 1998), esse valor foi de 3.4 (H2) e 3.2 (H3) mMol L⁻¹ de K no estágio V4. Na Figura 2.4.21, estão apresentadas curvas ajustadas entre a massa seca relativa e K na solução nutritiva, estabelecendo uma faixa de suficiência de K para os híbridos de milho, que variou de 3,4 a 11,2 mMol L⁻¹ em H2 e de 3,2 a 10,0 mMol L⁻¹ de K em H3 no estágio V4, acima da qual a probabilidade de resposta à adubação potássica é pequena, não havendo necessidade de acrescentar K.

Figura 2.4.21. Massa seca relativa de três híbridos de milho nos estádios V4 (a) e R1 (b) em função da concentração de K na solução nutritiva. *Significativo a 5%.

--- Linhas tracejadas referem-se ao nível crítico (90% da massa seca relativa).

Em R1, os coeficientes de determinação (R^2) de 0,89 (H1), 0,92 (H2) e 0,90 foram altamente significativos (Figura 2.4.21b). A faixa de suficiência variou de 5,4 a 11,6 e de 4,9 a 12,0 mMol L⁻¹ de K em H1 e H2 respectivamente. O H3 alcançou 90% da massa seca relativa apenas com 6,0 mMol L⁻¹ de K na solução. Acima dos valores máximos estabelecidos nesta faixa de suficiência a probabilidade de resposta ao acréscimo de K na solução é muito baixa.

Pode-se observar que para o milho em R1 alcançar 90% da produção máxima de massa seca, foi necessário uma concentração de no mínimo 5,4 (H1), 4,9 (H2) e 6,0 mMol L⁻¹

de K (H3). Entretanto decréscimos na concentração de K na solução podem provocar grande redução da produção de massa seca.

A relação entre a concentração de K foliar e a produção relativa de massa seca de híbridos milho (Figura 2.4.22) mostrou que o K satisfatório para atingir 90% da produção relativa de massa seca em V4 foi de 28,7 a 33,6 g kg⁻¹ de K no tecido foliar para o H1. O H2 e H3 alcançaram 90% da massa seca relativa com 18,7 e 28,9 mMol L⁻¹ de K na solução respectivamente. Em R1, essas faixas foram superiores e variaram de 28,0 a 47,0 g kg⁻¹ de K em H2 e de 34,5 a 44,3 g kg⁻¹ de K no tecido foliar em H3.

Figura 2.4.22. Massa seca relativa de três híbridos de milho nos estádios V4 (a) e R1 (b) em função da concentração foliar de K. *Significativo a 5%.

--- Linhas tracejadas referem-se ao nível crítico (90% da massa seca relativa).

Parte aérea

A interação entre doses de K e híbridos de milho foi significativa ($p < 0,01$) para todos os macronutrientes nos estádios V4 (Figura 2.4.23) e R1 (Figura 2.4.24), exceto para a concentração de Ca em V4 (Figura 2.4.23d).

A concentração de N na parte aérea foi influenciada pelo aumento de K na solução nutritiva no estádio V4 (Figura 2.4.23a) e R1 (Figura 2.4.24a) em todos os híbridos estudados, exceto em H1 no estádio V4 em que a regressão foi não significativa.

Houve acréscimo significativo ($p < 0,05$) na concentração de P na parte aérea de todos os híbridos com o aumento de K na solução nutritiva em V4, ajustando-se ao modelo quadrático para H1 e H2, e linear para H3 (Figura 2.4.23b). Entretanto, a concentração desse nutriente na parte aérea em R1 reduziu significativamente ($p < 0,05$) com o acréscimo de K na solução (Figura 2.4.24b).

A aplicação de K na solução nutritiva aumentou significativamente a concentração deste nutriente na parte aérea dos híbridos de milho nos estádios V4 (Figura 2.4.23c) e R1 (Figura 2.4.24c). Akram (2013) e Minjian et al. (2007) também observaram acréscimo

significativo na concentração de K na parte aérea com o aumento da adubação potássica e entre os híbridos de milho, bem como Viana e Kiehl (2010) em plantas de trigo.

Figura 2.4.23. Concentração de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) e S (f) na parte aérea de três híbridos de milho no estágio V4 em função da concentração de K na solução nutritiva. *Significativo a 5%.

A concentração máxima de K na parte aérea encontrada pela equação de regressão foi igual a 62.3 (H1), 56.7 (H2) e 59.4 (H3) respectivamente para uma concentração de 8,2; 8,8 e 8,3 mMol L⁻¹ de K na solução nutritiva. Para a menor dose de K (D1), a concentração média de K na parte aérea dos híbridos foi de 9,2 (para H1 e H2) e 7,0 g kg⁻¹ de K, estando abaixo dos níveis adequados estabelecidos por Fancelli e Dourado Neto (2000), que variaram de 20 e 40 g kg⁻¹.

A concentração de Ca na parte aérea dos híbridos de milho também foi influenciada pela concentração de K na solução nutritiva nos estádios V4 (Figura 2.4.23d) e R1 (Figura 2.4.24d).

O incremento de K na solução no estágio V4 promoveu redução na concentração de Mg para H1 e H3, que expressou modelo linear negativo (Figura 2.4.23e), e também na concentração de S para todos os híbridos (Figura 2.4.23f), ajustando-se a um modelo quadrático.

Figura 2.4.24. Concentração de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) e S (f) na parte aérea de três híbridos de milho no estágio R1 em função da concentração de K na solução nutritiva. *Significativo a 5%.

As concentrações de B, Cu, Fe, Mn e Zn na parte aérea dos híbridos de milho foram influenciadas significativamente ($p < 0.05$) pelo nível de K na solução nutritiva nos dois estádios de desenvolvimento avaliados (Figura 2.4.25 e 2.4.26).

Figura 2.4.25. Concentração de B (a), Cu (b), Fe (c), Mn (d) e Zn (e) na parte aérea de três híbridos de milho no estágio V4 em função da concentração de K na solução nutritiva. *Significativo a 5%.

No estágio V4, as concentrações de B (Figura 2.4.25a) e Mn (Figura 2.4.25d) na parte aérea foram superiores nas plantas submetidas a alguma deficiência de K em todos os híbridos. As concentrações de Cu no H1 e H2 (Figura 2.4.25b), Fe no H3 (Figura 2.4.25c) e de Zn na parte aérea em H2 e H3 também foram reduzidas com o aumento de K na solução nutritiva.

No estágio R1, as concentrações de B, Cu, Fe, Mn e Zn na parte aérea foram influenciadas pela dose de K. Entretanto mantiveram-se dentro dos níveis de adequados para o milho neste estágio, que devem ser (em mg kg⁻¹): 7-25 para o B, 6-20 para o Cu, 21-250 para o Fe, 20-200 para o Mn, e 15-100 para o Zn (Raij e Cantarella, 1996).

Figura 2.4.26. Concentração de B (a), Cu (b), Fe (c), Mn (d) e Zn (e) na parte aérea de três híbridos de milho no estágio R1 em função da concentração de K na solução nutritiva. *Significativo a 5%.

Raízes

As concentrações de macronutrientes nas raízes de híbridos de milho em função da concentração de K na solução nutritiva estão apresentadas na Figura 2.4.27 (estádio V4) e Figura 2.4.28 (estádio R1). A resposta da concentração de nutrientes nas raízes para a

interação entre doses de K e híbridos de milho foi não significativa apenas para a concentração de N e P em V4 e N em R1.

A concentração de K nas raízes dos híbridos de milho aumentou com o acréscimo deste nutriente na solução nutritiva em V4 (Figura 2.4.27c) e em R1 (Figura 2.4.28c). Nota-se que o H2 foi o que teve a menor concentração de K nas raízes nos dois estádios avaliados. Minjian et al. (2007) também observaram acréscimo significativo na concentração de K nas raízes com o aumento deste nutriente na solução nutritiva, bem como diferenças significativas entre os híbridos de milho para este parâmetro.

Figura 2.4.27. Concentração de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) e S (f) nas raízes de três híbridos de milho no estágio V4 em função da concentração de K na solução nutritiva. *Significativo a 5%.

No estágio V4, as concentrações nas raízes de N (Figura 2.4.27a), Ca (Figura 2.4.27d), Mg (Figura 2.4.27e) e S (Figura 2.4.27f) reduziram com o aumento de K na solução nutritiva em todos os híbridos estudados. A regressão polinomial da concentração de P nas raízes foi não significativa (Figura 2.4.27b) e foi de 5,2 g kg⁻¹ de P.

No estágio R1, com o aumento de K na solução nutritiva (Figura 2.4.28), houve redução na concentração de N e P (em todos os híbridos), Mg (em H1) e S (em H1 e H3).

Figura 2.4.28. Concentração de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) e S (f) nas raízes de três híbridos de milho no estágio R1 em função da concentração de K na solução nutritiva. *Significativo a 5%.

As concentrações de micronutrientes nas raízes de híbridos de milho em função da concentração de K na solução nutritiva estão apresentadas nas Figuras 2.4.29 (estádio V4) e 2.4.30 (estádio R1). A interação entre doses de K e híbridos de milho foi significativa para

todos os micronutrientes estudados nos dois estádios de desenvolvimento avaliados, exceto para a concentração de Cu em R1.

No estágio V4, houve redução significativa ($p < 0.05$) na concentração nas raízes de Cu (Figura 2.4.29a), Fe (Figura 2.4.29b) e Mn (Figura 2.4.29c) com o aumento de K na solução em todos os híbridos, exceto para concentração de Mn em H2. Entretanto, a concentração de Zn nas raízes aumentou com o acréscimo de K na solução, respondendo segundo modelos quadráticos para H1 e H2 e linear para H3 (Figura 2.4.29d).

Figura 2.4.29. Concentração de Cu (a), Fe (b), Mn (c) e Zn (d) nas raízes de três híbridos de milho no estágio V4 em função da concentração de K na solução nutritiva. *Significativo a 5%.

No estágio R1, a concentração de B (Figura 2.4.30a) e Cu (Figura 2.4.30b) nas raízes reduziu até a D3 e voltaram a aumentar na D4, exceto para concentração de B no H2. A concentração de K na solução nutritiva influenciou significativamente ($p < 0.05$) a concentração de Fe em H1 e H2 (Figura 2.4.30c), Mn (Figura 2.4.30d) e Zn (Figura 2.4.30e).

Figura 2.4.30. Concentração de B (a), Cu (a), Fe (b), Mn (c) e Zn (d) nas raízes de três híbridos de milho no estágio R1 em função da concentração de K na solução nutritiva. *Significativo a 5%.

d) Relações clássicas entre K e N, K e Ca, K e Mg na parte aérea

As doses de K na concentração deste nutriente na parte aérea e suas interações com o Ca, Mg e N revelaram correlações significativas ($p < 0,05$) na parte aérea para Ca e Mg no H1 e H3 no estágio V4. No estágio R1, essa correlação foi significativa para Ca em H2, Mg no H1 e H2 e N em todos os híbridos (Figura 2.4.31).

Figura 2.4.31. Relação entre a concentração de K e Ca (a, b), K e Mg (c, d) e K e N (e) na parte aérea de três híbridos de milho nos estádios V4 (a, c) e R1 (b, d, e). *Significativo a 5%.

Essas correlações mostraram que com o aumento de K na parte aérea houve decréscimo significativo ($p < 0.05$) da concentração de Ca, ajustando-se a modelos quadráticos ($p < 0.05$) para H1 e H3 no estágio V4 (Figura 2.4.31a) e decréscimo da concentração de Mg para H1 e H3 em V4 (Figura 2.4.31c). Resultados obtidos por Consolmagno Neto (2006)

mostraram que grandes aumentos da concentração foliar de Ca podem ser observados quando a disponibilidade de K às plantas é limitada. Bruns e Ebelhar (2006) observaram que a concentração de Mg da folha de milho foi significativamente reduzida com o aumento da dose de K na adubação. Segundo Fageria (2001), o K, em alta concentração, tem ação antagônica sobre a absorção de Ca^{2+} e Mg^{2+} , devido à competição decorrente de propriedades fisiológicas entre K e Ca e à competição por compostos ligantes do metabolismo vegetal entre K e Mg. Mengel e Kirkby (2001) afirmam que a competição entre Mg com outros cátions em excesso, principalmente K, pode reduzir a absorção de Mg em razão da competição por cargas negativas no citosol. A tendência de menor absorção de Ca e Mg, como consequência do aumento da absorção de K, ou seja, redução na relação $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{K}$ devido à maior disponibilidade de K foi observada por Bull (1986) no capim-Tobiatã e na soja-perene. Segundo Mengel e Kirkby (2001), a soma total de cátions em uma planta é pouco variável com o incremento no suprimento de um cátion, pois geralmente ocorre redução na proporção dos outros cátions presentes.

A concentração de N na parte aérea em R1 reduziu significativamente ($p<0.05$) com o aumento da concentração de K na parte aérea (Figura 2.4.31e). Megda (2009) também observaram redução da concentração foliar de N em capim-Marandu (*B. brizantha* cv. Marandu) com o aumento das doses de K, possivelmente é resultante do efeito de diluição do N no tecido vegetal, proporcionado pelo incremento da MSPA, com o aumento deste nutriente na solução. Nos tratamentos com menores produções de MSPA, houve efeito de concentração de N, concordando com Deon (2007), uma vez que Viana e Kiehl (2010) verificaram que o fornecimento do K para o trigo (*Triticum aestivum* L.) estimulou o aproveitamento do N, possibilitando que sua absorção, assimilação sejam aumentadas.

A relação ótima entre os dois nutrientes vai produzir um rendimento máximo apenas quando ambos estão em suas respectivas faixas de suficiência (Soltanpour et al., 1995).

2.5. Conclusões

Os híbridos de milho manifestam sintomas típicos de deficiência de N ou de K, além de redução no crescimento da parte aérea e de raízes, quando tais nutrientes são omitidos total ou parcialmente da solução nutritiva, entretanto não se observa sintomas de excesso para aqueles conduzidos em dose excessiva.

O híbrido Pioneer 30F35 (H2) tem a maior produção de massa seca da parte aérea e das raízes nos estádios V4 e R1 e nos experimentos com doses de N ou de K.

As doses de N e de K empregadas alteram a concentração dos demais nutrientes na parte aérea e nas raízes dos híbridos nos estádios V4 e R1, exceto para a concentração de Ca e de Mg na parte aérea em H3 conduzido com doses de N e para a concentração na parte aérea de N no H1 e de Mg no H2 em V4.

As relações entre as concentrações de N e K, N e P e N e S nos híbridos no estádio V4 são afetadas com o aumento de N na solução. Bem como as relações entre K e Ca e K e Mg nos estádios V4 e R1 e K e N no estádio R1.

Baseado na faixa de suficiência dos nutrientes estudados, pode-se afirmar que o DKB 390 Pró R2 (H1) é mais exigente em N (nível crítico igual a $24,3 \text{ mMol L}^{-1}$) e que o Syngenta Status (H3) é o mais exigente em K (nível crítico igual a $6,0 \text{ mMol L}^{-1}$).

3. DIAGNÓSTICO DO ESTADO NUTRICIONAL PARA NITROGÊNIO E POTÁSSIO EM HÍBRIDOS DE MILHO BASEADO EM ANÁLISE DE IMAGENS DIGITAIS.

RESUMO – O estado nutricional de plantas pode ser identificado pela análise química do tecido foliar e/ou pela diagnose visual, entretanto a primeira ocorre em estágio fenológico avançado e de difícil correção e a segunda depende da experiência do avaliador e de difícil detecção. A análise de imagens digitais é uma tecnologia que permite identificar a deficiência nutricional em plantas no início do estágio de desenvolvimento da planta, podendo ser corrigida no mesmo ciclo da cultura, independente da avaliação humana. O objetivo deste trabalho foi verificar métodos de extração de características de imagens digitais foliares, baseados em padrões de textura da folha e em índices espectrais, para a identificação de sintomas de deficiência isolada de nitrogênio (N) ou de potássio (K) em híbridos de milho (*Zea mays* L.), cultivados em casa de vegetação e no campo, com deficiência nutricional induzida para N ou K. O experimento foi independente para cada elemento e conduzido em 2 etapas: 1º) em casa de vegetação sob cultivo hidropônico, com tratamentos em esquema fatorial 4 (doses) x 3 (híbridos) e 4 repetições, sendo 4 doses: 5, 20%, 100% e 200% da dose completa; e 2º) no campo, em blocos ao acaso em fatorial 4x3 (4 doses e 3 híbridos) e 4 blocos, sendo 4 doses de adubação: omissão individual e completa (0%) de N ou K, 50%, 100% e 200% da dose recomendada do nutriente em estudo. Os híbridos foram: DKB390 PróR2® (H1), Pioneer 30F35® (H2) e Syngenta Status® (H3). A coleta e digitalização das folhas foram realizadas nos estádios V4 e R1. Foram obtidas as imagens da folha indicativa do estágio (FI), que foram processadas pela análise de imagens e analisadas quimicamente. Os métodos de extração de características baseados em padrões de textura de imagens em escala de cinza foram: Fourier, Descritor Fractal (Fractal), Local Binary Pattern (LBP), Gabor Wavelets (GW) e Gabor Wavelets + Fractal Descriptors (GWF); e também foram estudados métodos de extração de características baseados em 4 índices espectrais de imagens coloridas: *excesso de verde* (EVd), *vermelho normalizado* (Vern), *verde normalizado* (Vn) e *razão verde-vermelho* (Rvv) e a *combinação entre eles*. Foram determinadas as concentrações de N ou K, além do estudo dos métodos de extração de características. A redução nas doses de N ou de K nos híbridos estudados promoveu decréscimos significativos na concentração foliar desses elementos nos híbridos conduzidos em casa de vegetação e no campo nos 2 estádios avaliados, apresentando sintomas visuais típicos de deficiência de N ou de K para os híbridos conduzidos com a menor dose de tal nutriente. Para os híbridos conduzidos em casa de vegetação com doses de N ou de K, quando estudados separadamente pelos métodos baseados em textura, o Fourier apresentou alta porcentagem de acertos em todos os híbridos e nos 2 estádios, exceto para H3 no R1. Os melhores métodos baseados em índices espectrais apresentaram classificações considerados acima de bons. Houve redução na taxa de acertos dos métodos de análise no campo, quando comparado aos de casa de vegetação.

Palavras-chaves: nutrição de plantas; macronutriente, visão artificial; Fourier; *Zea mays* L.

3.1. Introdução

A produção mundial de milho (*Zea mays* L.) tem aumentado ao longo do século, devido tanto ao melhoramento genético de plantas bem como pelo manejo da cultura, incluindo o uso de fertilizantes e práticas de cultivo (Ciampitti e Vyn, 2012).

O desenvolvimento de programas de adubação para culturas agrícolas deve ser precedido pelo conhecimento das consequências de deficiências minerais sobre o crescimento e o desenvolvimento das plantas (Silva et al., 2009). Para Argenta et al. (2002), o monitoramento do nível adequado de nutriente na planta de milho tem como objetivo diagnosticar a necessidade ou não de sua aplicação, visto que o emprego de altas doses de nutriente, especialmente de nitrogênio (N), pode contaminar as águas superficiais e subterrâneas, uma vez que os riscos de poluição ambiental decorrentes da adubação nitrogenada podem ser elevados, especialmente em condições de intensa precipitação e altas doses de adubação (Amado e Mielniczuk, 2000). Não bastasse o custo ambiental, os fertilizantes são adquiridos a um custo cada vez mais alto pelos produtores, onerando a produção de alimentos (Oliveira et al., 2009).

O conhecimento de sintomas de deficiência nutricional permite a identificação e a correção de deficiências que podem ocorrer, possibilitando intervenções corretas, sem desperdícios e de menor impacto ambiental (Silva et al., 2009; Sarcinelli et al., 2004).

Os nutrientes minerais têm funções essenciais e específicas no metabolismo das plantas (Malavolta, 2006). Quando um dos elementos químicos essenciais está presente no meio em quantidades insuficientes ou em combinações que o tornam pouco disponível, a deficiência de tal elemento nas células provocará distúrbios no metabolismo (Epstein, 1975). Esses distúrbios geralmente revelam-se por meio de sintomas visíveis de deficiência, tais como clorose e/ou necrose de folhas, crescimento reduzido ou outras anomalias. O sintoma característico para cada nutriente depende também da severidade da deficiência, da espécie, variedade ou cultivar e de fatores ambientais (Malavolta, 2006).

Resultados têm mostrado que o N é o nutriente exigido em maior quantidade pela cultura do milho, sendo o que mais frequentemente limita a produtividade de grãos (Pavinato et al., 2008). Sua deficiência manifesta-se na fase de crescimento intenso (Fornasier Filho, 1992). O crescimento é retardado e lento, e as plantas tem uma aparência não viçosa. As partes mais maduras (folhas mais velhas) da planta são as primeiras a serem afetadas, uma vez que o N transloca-se de regiões mais velhas para as mais jovens, que crescem ativamente (Epstein e Bloom, 2006).

O potássio (K) é o segundo macronutriente em teor contido nas plantas, atrás apenas do requerimento em N, com a máxima absorção ocorrendo no período de desenvolvimento vegetativo, sugerindo maior necessidade de K na fase inicial como um elemento de “arranque” (Coelho, 2007). De acordo com Prabhu et al. (2007) e Malavolta (2006), os sintomas de deficiência de K iniciam-se pelas folhas mais velhas e são caracterizados por clorose seguida de necrose das margens e pontas das folhas, além de redução do crescimento das plantas e raízes.

A avaliação do estado nutricional de espécies vegetais tem sido amplamente utilizada e discutida, no intuito de possibilitar intervenções mais precisas em sistemas de produção vegetal, por meio de práticas de manejo e adubação (Urano et al., 2006).

Para Reis et al. (2006), a determinação das concentrações de nutrientes pela análise química foliar (diagnose foliar) apresenta-se como possibilidade de detecção de deficiência. No entanto, na prática é complexo efetuar uma série de amostragens e análises para determinação das necessidades do elemento com resposta em curto prazo. Além disso, para tal, determinam-se, geralmente, as concentrações do nutriente na matéria seca de folhas, em condições de laboratório, empregando-se métodos analíticos demorados e de alto custo (Guimarães et al., 1999).

Outro fator fundamental é o estágio de desenvolvimento da cultura, pois se a identificação da deficiência ocorrer em estágio muito avançado, a informação pode não ser útil para a correção da deficiência naquele ciclo de produção (Wu al., 2007). Deste modo, os testes que determinam a concentração de nutriente no tecido vegetal possuem a desvantagem de não possibilitar a correção da deficiência deste nutriente no mesmo ano agrícola, sendo apenas úteis para identificar se houve falta ou excesso desse nutriente em um determinado estágio de desenvolvimento (Argenta et al., 2002). O uso da diagnose foliar como método para a avaliação do estado nutricional possui certas limitações que devem ser mais bem analisadas, para se fazer o procedimento correto do emprego da técnica (Salvador et al, 1999).

Uma maneira prática e rápida de determinar a deficiência de nutrientes na planta é por meio do diagnóstico visual, e também pode ser útil para decidir sobre a necessidade de realizar fertilizações (Silva et al., 2009). Porém, a sua precisão é limitada e passível de erros (Baesso et al., 2007). A anormalidade visível causada pela deficiência de um elemento é o final de uma cadeia de eventos (Malavolta et al., 1997) e, na maioria das vezes, só é possível diagnosticar visualmente a deficiência quando ela ocorre de forma aguda, isto é, quando provavelmente parte significativa da produção já estiver comprometida. Além disso, em

estádio avançado de desenvolvimento, os sintomas de deficiência dos diversos nutrientes se assemelham, confundindo o diagnóstico (Fontes, 2004).

Desta forma, a utilização de métodos que possam diagnosticar a deficiência nutricional de plantas com precisão, rapidez e independente de análise de visão humana, torna-se uma excelente ferramenta para o manejo da nutrição de plantas, visando o suprimento de adubação no mesmo ciclo de cultivo, o que atualmente com os métodos existentes de diagnose visual e/ou análise química de tecido fica muito difícil, oneroso e demanda tempo, além de a correção da deficiência não ser possível no mesmo ciclo da cultura.

O aprimoramento dos métodos de identificação de deficiência nutricional de plantas, aliado à necessidade de melhorias na eficiência do uso dos nutrientes presentes no solo ou aplicados via adubação, para obtenção de altas produtividades pelas culturas, tem levado a busca por novas tecnologias, seja do ponto de vista agrônomo, econômico ou ambiental. Portanto, o desafio é desenvolver práticas agronomicamente eficientes e respeitadoras do ambiente que são aplicáveis a centenas de agricultores, com elevadas produtividades e que proporcionem redução das perdas de nutriente (Wu et al., 2014).

Na avaliação do estado nutricional das plantas, diversos métodos podem ser empregados, entretanto, há de se considerar a rapidez e segurança dos mesmos (Neves et al., 2005). Diferentes sistemas portáteis (© Hydro-N-Tester da Yara, ou © SPAD da Minolta) permitem a medição do teor de clorofila de folhas com base na transmitância ou reflectância das folhas em bandas de ondas específicos, uma vez que existe uma relação entre o teor de clorofila e a concentração de N foliar (Lemaire, et al., 2008). No entanto, Peng et al. (1993) mostraram que a estimativa da concentração de N foliar era muito sensível a variações da folha, ambiente e cultivares. Em função disso, nos últimos anos surgiram estudos utilizando análise de imagens digitais foliares (visão artificial) para diagnosticar sintomas de deficiências nutricionais.

A análise de imagens digitais consiste no reconhecimento da cena para a geração de características dimensionais, como áreas ou comprimentos de objetos, ou atributos, como padrões de cores e texturas, e a sua mensuração através de métodos de contagem ou frequência dos elementos formadores da imagem denominados "pixels" (Teixeira et al., 2006). A análise de imagens digitais propõe o desenvolvimento de herbários digitais inteligentes, sistemas biotecnológicos para gerenciamento de nutrientes e laboratórios de análise morfofisiológica, que poderão ser utilizados como ferramentas de pesquisa em botânica, fisiologia e evolução.

Um sistema de visão computacional ou artificial pode ser definido como um conjunto de métodos e técnicas de sistemas de computador que são capazes de interpretar imagens (Punam e Udupa, 2001).

A deficiência de cada nutriente produz sintomas característicos nas folhas, tais como: perda de pigmentação, necrosidade, menor crescimento, alteração na textura da superfície, etc. A análise de imagens digitais pode ser capaz de identificar estas características e associá-las a uma ou mais carências de nutrientes na planta, em híbridos de milho, podendo assim determinar a melhor época de aplicação e o nutriente necessário a ser aplicado.

Silva et al. (2014) estudando métodos de extração de características para identificação de deficiência de magnésio (Mg) em um único híbrido de milho, concluíram que a análise de imagens digitais coloridas foi eficiente para diagnosticar as doses do nutriente estudado, atingindo 75,5% de acertos no estágio V4 (4 folhas completamente desenvolvidas). Romualdo et al. (2014) estudando também métodos de extração de características de imagens digitais coloridas para identificação de deficiência de N em um híbrido de milho (DKB 390), encontraram elevadas taxas de acertos dos métodos utilizados, chegando a 82,5% e 96,5% de acertos nos estádios V4 e R1 respectivamente. Baesso et al. (2007) estudaram o uso de índices espectrais, obtidos a partir de imagens digitais coloridas para análise de imagens, para discriminar feijoeiros submetidos a diferentes doses de N.

Outros estudos também foram realizados nos últimos anos utilizando análise de imagens digitais. Meyer et al. (1988) testaram um sistema de visão artificial para estimar a cobertura do solo e concluíram que em solos úmidos a imagem apresentou melhor contraste que em solos secos. Han e Hayes (1990) desenvolveram um procedimento para análise de imagem, com o objetivo de determinar a cobertura do solo (resíduos e/ou plantas) utilizando a informação textural da imagem e concluíram que o algoritmo foi capaz de quantificar a porcentagem de solo coberto, com acurácia e sem influência do erro humano e, ainda, que a classificação de imagens utilizando a textura pode separar resíduos/plantas do solo. Varella et al. (2002) determinaram a cobertura do solo por análise de imagens e redes neurais e apresentaram índice de exatidão global médios na classificação de 82,1%. Sena Junior et al. (2001, 2003) desenvolveram, testaram e, posteriormente, implementaram e avaliaram métodos de visão artificial para identificação de plantas de milho atacadas pela lagarta do cartucho (*Spodoptera frugiperda*).

A exploração da elevada capacidade de rendimento de grãos de milho está relacionada ao desenvolvimento contínuo de técnicas que propiciem a exploração deste potencial (Merotto Junior et al., 1997). Nesse sentido, acredita-se que a análise de imagens digitais

possa auxiliar na avaliação do estado nutricional em diferentes híbridos de milho cultivados com doses de N ou de K, para diagnosticar a necessidade de aplicação do nutriente e a dose necessária a ser aplicada, podendo assim contribuir para aumentar a eficiência da adubação na cultura do milho, fornecendo informações fundamentadas.

3.2. Objetivos

O objetivo deste trabalho foi verificar métodos de extração de características de imagens digitais foliares, baseados em padrões de textura da folha e em índices espectrais, para a identificação de níveis de nitrogênio (N) e de potássio (K) em híbridos de milho (*Zea mays* L.) nos estádios V4 e R1, cultivados em casa de vegetação e no campo.

3.3. Material e Métodos

3.3.1. Local do experimento e cultura estudada

O trabalho experimental constituiu-se de 2 (dois) experimentos independentes, sendo o primeiro com doses de nitrogênio (N) e o segundo com doses de potássio (K), e foram realizados em 2 (duas) condições de cultivo: casa de vegetação e campo. Ambos foram realizados na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP), campus de Pirassununga/SP.

A cultura estudada foi a do milho (*Zea mays* L.) conduzida:

- a) em casa de vegetação, no setor das Agrárias, sob cultivo hidropônico em vasos plásticos com capacidade de 3,6 L com solução nutritiva; e
- b) no campo, em área de baixa fertilidade, em Neossolo Quartzarênico (RT) classificado de acordo com a EMBRAPA (2013), localizado no campo 120 da FZEA/USP, temperatura média igual a 21,6 C e precipitação do período experimental de 896,4mm, sendo que os ensaios foram independentes para cada nutriente.

3.3.2. Casa de vegetação

3.3.2.1. Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos constaram de 3 (três) híbridos de milho: DKB390 PróR2® (H1), Pioneer 30F35® (H2) e Syngenta Status® (H3). Para cada híbrido, foram utilizados 4 (quatro) doses de nutrientes para cada elemento estudado: D1= 5% da dose completa do nutriente; D2= 20% da dose completa; D3= 100% (dose completa) e D4= 200% da dose completa (dose excedente), com 4 (quatro) repetições.

Essas doses de nutrientes correspondem respectivamente a 1,0; 3,0; 15,0 e 30,0 mMol L⁻¹ de N (no experimento com doses de N na solução nutritiva) e 0,3; 1,2; 6,0 e 12,0 mMol L⁻¹ de K (no experimento com doses de K na solução nutritiva).

3.3.2.2. Solução nutritiva

As soluções nutritivas foram preparadas a partir da solução completa de Hoagland e Arnon (1950), modificada para atender às doses de N e K em cada experimento.

A composição da solução nutritiva constituiu-se de: N=210, P=31, K=234, Ca=200, Mg=8, S=64 mg L⁻¹ na solução nutritiva completa (100%), e micronutrientes. No experimento com doses de N na solução, esse nutriente foi adicionado nas doses de 14, 42, 210 e 420 mg L⁻¹ de N (ou 1, 3, 15 e 30 mMol L⁻¹ de N) na solução nutritiva, respectivamente para as doses D1, D2, D3 e D4. No experimento com doses de K na solução, esse nutriente foi adicionado nas doses de 11,7; 46,8; 234 e 468 mg L⁻¹ de K (ou 0,3; 1,2; 6 e 12 mMol L⁻¹ de K) na solução nutritiva, respectivamente para as doses D1, D2, D3 e D4. Os demais nutrientes foram aplicados em concentrações normais, conforme apresentado na Tabela 3.3.1. Na escolha das fontes de N, tomou-se o cuidado de manter uma relação de 80% de NO₃⁻ e 20% na forma de NH₄⁺.

Para o preparo da solução nutritiva de cada vaso, foram utilizadas água deionizada e soluções estoques nos volumes indicados na Tabela 3.3.1.

Tabela 3.3.1. Volumes pipetados da solução estoque para o preparo da solução nutritiva de cada vaso, de acordo com as doses de N e K empregadas em cada experimento.

Sal ou Fertilizante	Concentração da solução estoque g.L ⁻¹	Volume da solução estoque adicionada na solução do vaso (ml.L ⁻¹)							
		Doses de N (mMol L ⁻¹)				Doses de K (mMol L ⁻¹)			
		1,0	3,0	15,0	30,0	0,3	1,2	6,0	12,0
1. KH ₂ PO ₄	136,09	1	1	1	1				
2. KCl	74,55	5	5	5	5	0,3	1,2	6	12
3. NH ₄ H ₂ PO ₄	115,03	-	-	-	-	1	1	1	1
4. NH ₄ NO ₃	80,04	0,5	1	4,5	10	2	2	2	2
5. Ca (NO ₃) ₂ .5H ₂ O	254,16	-	0,5	3	5	5	5	5	5
6. CaCl ₂ .2H ₂ O	147,01	5	4,5	2	-	-	-	-	-
7. MgSO ₄ .7H ₂ O	246,47	2	2	2	2	2	2	2	2
8. Solução de micros*		1	1	1	1	1	1	1	1
9. Solução Fe EDHMA**		1	1	1	1	1	1	1	1

O sinal “-” indica a omissão do respectivo nutriente na composição da solução nutritiva. (*) Em 1L de solução estoque: 3,43 g H₃BO₃; 2,88 g MnCl₂.4H₂O; 0,35 g ZnCl₂; 0,11 g CuCl₂; 0,06 H₂MoO₄H₂O. (**) Em 1L de solução estoque: 115 g Fe EDHMA.

3.3.2.3. Instalação e condução do experimento

A semeadura de milho foi realizada em bandejas plásticas com areia lavada, onde as plantas foram mantidas durante uma semana após a emergência e irrigadas periodicamente com água deionizada. Após esse período, de acordo com a uniformidade, as plantas foram selecionadas e transplantadas 2 (duas) para cada vaso, aplicando-se as soluções nutritivas respectivas a cada tratamento.

Inicialmente, para evitar estresse salino nas raízes das plântulas, cada vaso recebeu solução diluída a 50% do volume de solução estoque indicado, durante 5 (cinco) dias. Após esse período, completou-se a solução dos vasos com os 50% de solução estoque restantes.

A unidade experimental foi constituída por 2 (duas) plantas homogêneas em cada vaso. As plantas foram fixadas na tampa do vaso por uma espuma, na altura do colo da planta, permitindo às raízes ficarem imersas na solução nutritiva de dentro do vaso.

Os vasos eram de polietileno, comportavam 3,6 litros de solução nutritiva e foram pintados externamente de preto para evitar a entrada de luz e consequentemente a proliferação de algas e musgos. Cada vaso recebia automaticamente ar comprimido filtrado e borbulhado durante 10 segundos a cada 30 segundos.

As soluções nutritivas foram trocadas semanalmente, completando-se diariamente o nível da solução no vaso com água deionizada através da utilização de filtros de osmose reversa e monitorando o valor do pH entre 5,0 e 6,0 com HCl 0,1N e NaOH 1N.

Quando as plantas atingiram o estágio de desenvolvimento com 6 (seis) folhas completamente desenvolvidas (V6), foi realizada troca das plantas para vasos maiores (15 L), permitindo o crescimento das raízes das plantas.

As plantas foram cultivadas até o estágio de embonecamento do milho (R1) e, quando houve necessidade, foram tutoradas com auxílio de arames para não caírem.

3.3.2.4. Avaliações

As plantas foram avaliadas em 2 (dois) estádios de desenvolvimento da cultura: em V4 (quando as plantas de milho estavam com 4 folhas completamente expandidas) uma vez que a adubação de cobertura de N e K no milho é realizada quando as plantas estiverem com 5-6 folhas completamente expandidas (Raij e Cantarella, 1996), e em R1 (estádio de embonecamento do milho).

Com auxílio de uma tesoura, foi coletada a *folha indicativa do estágio* (FI) de desenvolvimento do milho, ou seja, a folha 4 e a folha oposta e abaixo da espiga,

respectivamente nos estádios V4 e R1. Essas folhas foram digitalizadas e posteriormente analisadas quimicamente.

Após a digitalização, a FI foi lavada com água deionizada, colocada em sacos de papel corretamente identificados, levada à estufa de circulação forçada a 65°C até peso constante. As FI das 2 (duas) plantas de cada vaso foram agrupadas compondo uma única amostra e posteriormente, foram moídas em moinho tipo Wiley, encaminhadas ao laboratório para determinação da concentração de N (para o experimento com doses de N) e K (para os experimento com doses de K), segundo métodos descritos por Bataglia et al. (1983).

3.3.3. Campo

3.3.3.1. Tratamentos e delineamento experimental

Os experimentos no campo foram independentes para cada elemento, desta forma, cada experimento foi constituído pela omissão *individual* de N e K nas parcelas.

Os tratamentos constaram de 4 (quatro) doses de adubação: D1 = omissão completa do nutriente, D2 = 50% da dose recomendada, D3 = 100% da dose recomendada (140 kg ha⁻¹ de N ou 130 kg ha⁻¹ de K₂O) e D4 = 200% da dose recomendada (dose excedente) e 3 (três) híbridos de milho: DKB390 PrórR2® (H1), Pioneer 30F35® (H2) e Syngenta Status® (H3).

Essas doses de nutrientes correspondem respectivamente a 0, 70, 140 e 280 kg ha⁻¹ de N (no experimento com doses de N) e 0, 65, 130 e 260 kg ha⁻¹ de K₂O (no experimento com doses de K). Os demais macronutrientes foram aplicados em concentrações normais, conforme apresentado na Tabela 3.3.2, além da adição de 2 kg ha⁻¹ Zn no plantio.

Tabela 3.3.2. Quantidade de nutrientes (N, P₂O₅ e K₂O), em kg ha⁻¹, aplicados na semeadura e na cobertura de híbridos de milho conduzidos com doses de N ou de K na adubação.

		Doses de N				Doses de K			
		D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4
Semeadura (kg ha ⁻¹)	N	0	15	30	60	30	30	30	30
	P ₂ O ₅	100	100	100	100	100	100	100	100
	K ₂ O	50	50	50	50	0	25	50	100
Cobertura (kg ha ⁻¹)	N	0	55	110	220	110	110	110	110
	K ₂ O	80	80	80	80	0	40	80	160

As adubações de plantio e cobertura para cada nutriente foi estabelecida com base na análise inicial do solo e de acordo com a recomendação de Raij e Cantarella (1996) para a cultura do milho para uma produtividade esperada de 10-12 toneladas por hectare. As fontes de nutrientes utilizadas foram uréia protegida (45% de N), cloreto de potássio – KCl (60% de K₂O), superfosfato simples (18% de P₂O₅).

O delineamento experimental foi em blocos casualizados (DBC) em esquema fatorial 4x3 (quatro doses de nutrientes e três híbridos de milho), em 4 (quatro) blocos, totalizando 48 parcelas por experimento. Cada parcela apresentava 6 (seis) linhas de 6 metros (m) cada linha e espaçamento de 0,8m nas entrelinhas, resultando numa área útil de 28,8m² por parcela.

3.3.3.2. Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido no campo 120 da FZEA/USP, em área de baixa fertilidade, em um Neossolo Quartzarênico (RT) classificado de acordo com a EMBRAPA (2013), temperatura média igual a 21,6 C e precipitação do período experimental de 896,4mm. Os dados meteorológicos de precipitação e temperatura média do período experimental estão apresentados na Figura 3.3.1.

Figura 3.3.1. Precipitação (mm) e temperatura média (°C) descendias no período de janeiro a junho de 2012, obtidos dos dados da estação meteorológica da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP).

As características químicas do solo da área experimental estão apresentadas na Tabela 3.3.3. O solo apresentava 86,0 e 90,0 g kg⁻¹ de argila e 888 e 877 g kg⁻¹ de areia respectivamente nas camadas de 0-0,2m e 0,2-0,4m.

Tabela 3.3.3. Análise química do solo da área experimental na camada 0,0-0,20m.

pH	P (res)	S	K	Ca	Mg	Al	H+Al	M.O	SB	CTC	V	m	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg/dm ³							g/kg	mmolc/dm ³		%			mg/dm ³ (ppm)			
5,1	6	6	0,4	12	7	1	22	21	19	41	47	3	0,4	4,6	6	7,6	0,8

No mês de novembro de 2011, foi aplicado 1,5 ton.ha⁻¹ de calcário (CaO=35,5%; MgO=10% e PRNT=65%) para elevação da saturação por bases (V) a 70%, conforme recomendação de Raij e Cantarella (1996) para a cultura do milho. Anteriormente à semeadura, foi realizada a dessecação da área utilizando a associação de 2,4D/glyphosate.

3.3.3.3. *Instalação e condução do experimento*

Em 06 de fevereiro de 2012, o milho foi semeado manualmente com auxílio de régua (6 sementes/metro).

A adubação de cobertura foi realizada aproximadamente 30 dias após a semeadura, quando as plantas estavam no estágio V4, manualmente em superfície ao lado da linha de plantio utilizando uréia protegida e KCl, e foi levemente incorporada ao solo para evitar possíveis perdas de N por volatilização.

3.3.3.4. *Avaliações*

Foram coletadas amostras foliares para análise química. Essas amostras, num total de 6 (seis) subamostras por parcela, foram colhidas em 2 (dois) estádios: V4, estágio antecedente à adubação de cobertura, e R1, estágio indicado para amostragem de folhas para análise química do milho (Raij e Cantarella, 1996).

Foi coletada a *folha indicativa do estágio* (FI) de desenvolvimento do milho (folha 4 e folha oposta e abaixo da espiga, respectivamente em V4 e em R1).

A FI foi coletada com auxílio de uma tesoura e levada para o laboratório para a digitalização da imagem.

Após a digitalização, as 6 (seis) subamostras de cada parcela foram agrupadas compondo uma única amostra e posteriormente, foram lavadas com água deionizada, levadas à estufa de circulação forçada, a 65°C até peso constante e moídas em moinho tipo Wiley. Todas as amostras moídas foram colocadas em sacos plásticos identificados e encaminhadas ao laboratório para determinação da concentração de N (para o experimento com doses de N) e K (para o experimento com doses de K), segundo métodos descritos por Bataglia et al. (1983). Na última coleta (R1), após a digitalização da imagem, foram separadas os terços médios e retirada a nervura central das folhas para análise química foliar.

3.3.4. *Análise química foliar*

As amostras foliares foram digeridas por via úmida com ácido sulfúrico para análise de N, e com ácido nítrico-perclórico para determinação K. A concentração de N foi determinada através de destilação de amônia em destilador seguido de titulação e a de K por fotometria de chama.

As análises químicas foliares foram realizadas no Laboratório de Ciências Agrárias na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, da Universidade de São Paulo, Campus de Pirassununga/SP.

3.3.5. *Forma de análise dos resultados de análise química foliar*

Em casa de vegetação, o delineamento experimental foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 4x3 (quatro doses de nutrientes e três híbridos de milho) com 4 (quatro) repetições. Como a realização de análise química de planta requer a destruição do material vegetal (amostras destrutivas), a cada época de coleta estudada, eram retirados 48 vasos (4 x 3 x 4) referentes à respectiva época de coleta, totalizando 96 unidades experimentais. O modelo matemático indicado foi o seguinte:

$$Y_{ijk} = m + H_i + N_j + HN_{ij} + e_{ijk}$$

onde,

Y_{ijk} é o valor observado na parcela que recebeu o tratamento ij na repetição k ;

m é a média geral do experimento;

H_i é o efeito dos híbridos de milho;

N_j é o efeito das doses de nutrientes aplicados na parcela;

e_{ijk} é o efeito dos fatores não controlados na parcela que recebeu os tratamentos ij na repetição k .

Nos experimentos realizados no campo, o delineamento experimental foi em blocos casualizados em esquema fatorial 4x3 (quatro doses de nutrientes e três híbridos de milho), em 4 (quatro) blocos. O modelo matemático indicado foi o seguinte:

$$Y_{ijk} = m + H_i + N_j + HN_{ij} + W_k + e_{ijk}$$

onde,

Y_{ijk} é o valor observado na parcela que recebeu os tratamentos ij que se encontram no bloco k ;

m é a média geral do experimento;

H_i é o efeito dos híbridos de milho;

N_j é o efeito das doses de nutrientes aplicados na parcela;

W_k é o efeito devido ao bloco k em que se encontra a parcela;

e_{ijk} é o efeito dos fatores não controlados na parcela que recebeu os tratamentos ij no bloco k .

Tanto para os experimentos em casa de vegetação, como para os experimentos no campo, nos casos em que o teste F foi significativo somente para N_j , foi realizada uma única análise de regressão para todos os híbridos. Nos casos em que o teste F foi significativo para

NH_{ij} , ou seja, se houve interação entre os híbridos estudados e as doses de nutrientes aplicadas, o desdobramento visou estudar as doses dentro do H_i . Neste caso, foram realizadas 3 (três) análises de regressão, sendo 1 (uma) para cada híbrido, que foram avaliadas através da significância dos coeficientes de regressão.

Os coeficientes do modelo de regressão foram testados pelo teste t , e a probabilidade da significância estatística de 5%.

3.3.6. Digitalização das imagens

A digitalização da imagem das folhas foi realizada utilizando um scanner de mesa convencional de alta resolução (HP scanjet 3800) com até 9600 DPI (dot per inch – pontos por polegada). As folhas foram digitalizadas com 1200 DPI e armazenadas no computador em formato sem compressão TIFF (*Tag Image File Format*), para posterior processamento.

A coleta de folhas para digitalização da imagem foi realizada em 2 (dois) estádios de desenvolvimento: V4 (plantas de milho com 4 folhas totalmente expandidas) e R1 (embonecamento do milho). De acordo com Fancelli (1986), é no estágio V4 que é definido o potencial produtivo do milho; além disso, a adubação de cobertura de N e K no milho é realizada quando as plantas estão com 5-6 folhas completamente expandidas (Cantarela et al., 1997). O estágio R1 é o estágio de desenvolvimento indicado por Cantarela et al. (1997) para amostragem de folhas para análise química no milho.

Após serem removidas das plantas, as FI foram limpas com auxílio de um papel toalha a fim de retirar o excesso de poeira e/ou sujeira das folhas, que pudesse interferir na qualidade da imagem. Após a limpeza, as folhas correspondentes a cada dose foram colocadas lado a lado no leitor do scanner, cobertas com uma folha sulfite branca e em seguida procedeu-se a digitalização.

Após a digitalização, as imagens foram identificadas da seguinte forma para o armazenamento: TW_FI_rxxx_coletaY_ntrNutriente_parZ.tiff, onde “W” é a dose do nutriente que foi utilizada, “I” representa tipo a FI, “r” representa as repetições contidas na imagem, o “Y” significa a época da coleta correspondente, “Nutriente” corresponde ao elemento estudado, “Z” representa as partes da planta que foram digitalizadas, que está presente na imagem, ou seja, par 1(ponta), parte 2 (meio ou terço médio) e par 3 (base).

Exemplificando, imagem T3_FI_rep1234_coleta1_ntrpotassio_par123, esta imagem contém as quatro repetições das folhas indicativas inteiras do estágio V4, cultivadas com a dose 3 de potássio.

3.3.7. *Processamento das imagens*

O estudo para ajustar o melhor método de análise de imagens foliares para determinação de sintomas de deficiência dos nutrientes estudados nos híbridos de milho foi realizado utilizando 2 (duas) metodologias: (a) análise de padrões de textura e (b) índices espectrais.

Em ambas metodologias, as imagens das FI conduzidas na dose 100% de nutriente (N ou K) foram comparadas com as imagens das FI conduzidas nas demais doses. Cada metodologia estudada buscou encontrar diferenças entre as imagens das folhas em cada dose e assim indentificá-las. Quanto maior a porcentagem de acertos dessa identificação, melhor a qualidade e precisão do método na classificação de sintomas de deficiência.

a) Análise de padrões de textura

Para as análises utilizando padrões de textura, as imagens foram processadas no Instituto de Física de São Carlos (IFSC/USP), pelo Grupo de Computação Científica (GCC), pertencente ao Grupo de Computação Interdisciplinar (FCM/GCI), coordenado pelo Prof. Dr. Odemir Martinez Bruno (IFSC/USP). Foi utilizado o sistema computacional MATLAB[®] 8.1.0.604 (R2013a), 64-bit, com o pacote de ferramentas para processamento de imagens.

Esta etapa verificou se os métodos de análise de imagens da superfície da folha, visando à detecção de deficiências nutricionais na cultura do milho, foram eficientes para diagnosticar diferença de sintomatologia de N e K nos diferentes híbridos estudados.

Depois de obtidas as imagens foliares das amostras (aquisição da imagem), foram realizadas as etapas: (1) *segmentação*, que consiste na subdivisão da imagem em regiões distintas, através de propriedades básicas, (2) *extração de características* e (3) *classificação* das imagens (Bruno, 2000; Gonzalez e Woods, 1993).

O processo de segmentação foi utilizado para separar a folha no processo de aquisição, para segmentar artefatos (ex: regiões danificadas das folhas, bordas, nervura central) ou ainda áreas de interesse (padrões na imagens relacionados a falta de algum nutriente), ou seja, partes das folhas (Figura 3.3.2). A etapa da segmentação selecionou regiões da imagem para serem analisadas. Uma análise preliminar das imagens demonstrou que os métodos utilizados seriam análise cromática e análise de textura, uma vez que cor e textura foram os principais atributos visuais que apresentaram relações com a nutrição do milho.

A análise por textura considera a distribuição e a organização dos pixels de uma determinada região da imagem. Neste contexto, métodos que utilizam medidas como

lacunaridade e dimensão fractal podem aferir a complexidade das imagens e, por meio desta, gerar assinaturas digitais para caracterizar a imagem (Backes e Bruno, 2006).

De cada parte da folha digitalizada foram extraídas, de forma aleatória e automática, “janelas” da superfície da folha, que seriam pequenas subdivisões (ou blocos) da imagem em regiões distintas (Figura 3.3.2), num total de 200 janelas para cada dose de nutriente. Cada janela extraída, que apresentou dimensões de 80x80 pixels (0,17 cm aproximadamente), foi orientada em posição horizontal e armazenada em formato sem compressão.

Figura 3.3.2. Processo de segmentação da imagem da folha digitalizada (Backes et al., 2009).

Foram avaliados distintos métodos de extração de características para análise de textura: Fourier, Descritor Fractal (Fractal), Local Binary Pattern (LBP), Gabor Wavelets (GW) e Gabor Wavelets + Fractal Descriptors (GWF), com o objetivo de encontrar o método que forneça a melhor separação entre as classes. Para todos os métodos estudados foram utilizadas imagens em escala de cinza.

Os métodos de estimativa do Fractal estudados trabalham com imagens binárias. O método de cálculo da dimensão Fractal foi estendido para trabalhar com estas imagens na proposta de Backes et al. (2009), em que a assinatura da imagem é calculada para todos os valores de reE onde E é o conjunto de distâncias euclidianas para um raio máximo r_{max} . Nesta técnica são apresentados variando o raio desde um raio de expansão de 1 a 20.

$$E = 1, \sqrt{2}, \sqrt{3}, \dots, r_{max}$$

$$\tilde{O}(r_{max}) = [\log V(1), \log V(\sqrt{2}), \log V(\sqrt{3}), \dots, \log V(r_{max})],$$

A transformada de Gabor bi-dimensional é uma função gaussiana bi-dimensional modulada numa senóide orientada com uma determinada frequência W e em uma determinada direção θ , sua forma bi-dimensional no domínio espaço $g(x,y)$ e de frequência $G(u,v)$ é dada pelas equações abaixo.

$$g(x, y) = \left(\frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \right) \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} \right) \right] + 2\pi j W x$$

$$G(u, v) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(u - W)^2}{\sigma_u^2} + \frac{v^2}{\sigma_v^2} \right] \right\}$$

A transformada de Gabor pode ser adaptada como wavelet, neste caso estas equações são usadas como wavelet mãe. Em seguida, um dicionário de filtros pode ser obtido por dilatações e rotações de $g_z(x, y)$ através da função gerada proposta em Manjunath e Ma (1996), abaixo:

$$g_{mn}(x, y) = a^{-m} g(x', y'),$$

Onde $a > 1$ e m, n especificam a escala e orientação respectiva, com $m = 0, 1, \dots, M - 1$ e $n = 0, 1, \dots, N - 1$. M é o número total de escalas e N é o número total de orientações.

O esquema de implementação do uso de extratores é similar em todos os trabalhos, a Figura 3.3.3 mostra o processo.

Figura 3.3.3. Processo de extração de características da imagem da folha digitalizada após o processo de segmentação da imagem (adaptado de Zuñiga e Bruno, 2010).

Para todos os métodos de extração estudados foi utilizado o método de classificação K-vizinhos mais próximos (KNN) e a redução de dimensionalidade do vetor de características usando “análise de componentes principais” (PCA).

O KNN é um método baseado na medida da distância entre objetos, e a distância mais comumente usada é a distância euclidiana (Duda, 2000). Seja o ponto no espaço N-dimensional $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ e $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$, a distância euclidiana N-dimensional (Euc) é definida como:

$$Euc = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + \dots + (p_n - q_n)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - q_i)^2}$$

Para o estudo de identificação de deficiência de N ou de K, foram realizadas 3 (três) abordagens:

Abordagem 1: Verificar a classificação de todas as doses, com híbridos isoladamente. Nesta abordagem consideraram-se 04 classes para cada híbrido (D1, D2, D3 e D4), sendo cada classe com 200 janelas, totalizando 800 janelas classificadas.

Abordagem 2: Verificar a classificação de todas as doses independentemente dos híbridos. Nesta abordagem consideraram-se 04 classes (D1, D2, D3 e D4), sendo cada classe com 600 janelas, totalizando 2400 classificadas.

Abordagem 3: Verificar a classificação de todas as doses e híbridos simultaneamente. Nesta abordagem consideraram-se 12 classes (H1D1, H1D2, H1D3, H1D4, H2D1, ..., H2D4, H3D1 ... H3D4), sendo cada classe com 200 janelas, totalizando 2400 classificadas.

Posteriormente, foi gerada a Porcentagem de Acerto Global (PAG), informação importante, que indica a porcentagem de imagens identificadas corretamente pelo classificador.

Além disso, para o melhor resultado de reconhecimento de deficiência de N e K, foi gerado o desvio padrão das classificações ou o “standard deviation” (std), que de acordo com Witten et al. (2011), estabelece uma medida de erro de classificação. Cada experimento foi rodado 10 vezes (“cross-validation 10-fold” ou validação cruzada 10-pastas). Aleatoriamente foi separado o conjunto de dados em 10 grupos e foi classificado 1 contra 9 (1 teste vs 9 treinamento). Esse processo foi repetido 10 vezes, variando o conjunto de teste. A taxa de acerto global obtida foi a média das 10 taxas de acerto das repetições. O desvio padrão (std) foi o desvio padrão dessas 10 taxas de acerto. Para cada rodada, tomou-se o acerto global e calculou-se o desvio padrão. É importante saber que para cada rodada foram utilizadas 90% das imagens para treinamento e 10% para o teste “cego”. Para cada rodada o conjunto de treinamento e teste foi selecionado ao azar e sem repetição mantendo o número de amostras constantes por cada classe.

b) Análise de índices espectrais obtidos de imagens digitais coloridas

Para as análises utilizando índices espectrais, as imagens foram processadas na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP), nas Agrárias, coordenado pelo Prof. Dr. Murilo Mesquita Baesso (FZEA/USP). Foi utilizado o sistema computacional MATLAB[®] R2012a com o pacote de ferramentas para processamento de imagens.

No processamento, foram retiradas características das imagens, condensando a informação nelas contidas. Dessa maneira, em vez de se utilizar a imagem original, utilizou-se um vetor com características que representa a informação desejada. Este trabalho partiu da hipótese de que o uso de características de 4 (quatro) índices espectrais levam a informação desejada para classificar o nível de deficiência de N ou de K na planta. Esses 4 índices espectrais calculados foram:

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

$$Vern = \frac{Vm}{Vm + Vd + Az}$$

$$Vn = \frac{Vd}{Vm + Vd + Az}$$

$$Rvv = \frac{Vd}{Vm}$$

em que,

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.

Essas características foram calculadas da janela da imagem que representava a refletância da folha.

Depois de obtidas as imagens foliares (aquisição da imagem), foram realizadas as etapas: (1) *segmentação*, (2) *extração de características* e (3) *classificação* das imagens (Gonzalez e Woods, 1993).

A etapa de segmentação para a análise de imagens através de índices espectrais foi realizada de forma aleatória e manualmente. Para cada híbrido e para cada repetição experimental, foram recortadas 10 janelas de 20x20 pixels, sendo que cada pixel teve o tamanho de 0,27mm, totalizando 40 janelas por dose de nutriente para cada híbrido, e consequentemente 160 janelas (4 doses x 4 repetições x 10 janelas) por híbrido. A fim de

evitar mistura de janelas entre os tratamentos, cada janela recortada recebeu numeração de 1 a 10 para as imagens de folhas da D1, 11 a 20 para as imagens de folhas da D2, 21 a 30 para as imagens de folhas da D3 e, finalmente, 31 a 40 para as imagens de folhas da D4. Cada conjunto de janelas de 1 a 40 foram salvas em pastas separadas e corretamente identificadas, completando as 4 (quatro) repetições para cada dose de nutriente de um mesmo híbrido, sendo que a média dos valores de pixels dessas janelas representou uma observação do vetor de característica (dentro da mesma dose de nutriente). Para cada híbrido, foram recortados 4 (quatro) repetições de janelas de 1 a 40, seguindo o mesmo raciocínio.

O vetor de características foi utilizado como variável de entrada de um classificador para discriminar as doses de N ou de K. Todas as combinações de índices possíveis foram testadas (Tabela 3.3.4).

Tabela 3.3.4. Vetores de características (X) que foram testados no desenvolvimento dos classificadores para discriminar diferentes doses de N ou de K em híbridos de milho.

Um índice	Dois índices	Três índices	Quatro índices
X= Evd	X= Evd e Vern	X= Evd, Vern e Vn	X= Evd, Vern, Vn e Rvv
X= Vern	X= Evd e Vn	X= Evd, Vern e Rvv	
X= Vn	X= Evd e Rvv	X= Evd, Vn e Rvv	
X= Rvv	X= Vern e Vn	X= Vern, Vn e Rvv	
	X= Vern e Rvv		
	X= Rvv e Vn		

A última etapa da análise foi o algoritmo para elaboração e avaliação de classificador estatístico utilizando validação cruzada.

O classificador estatístico também foi utilizado para definição do melhor vetor de características (Tabela 3.3.4). O erro de classificação foi estimado por validação cruzada deixando um de fora (Khattree e Maik, 2000). Uma observação foi separada e as funções discriminantes foram elaboradas com os restantes dos dados (39 amostras). Em seguida, a observação separada foi classificada. Esse procedimento foi repetido sucessivamente para cada amostra, ou seja, todas as 40 observações (4 tratamentos e 10 repetições) de cada dimensão de janela foram testadas.

O erro de classificação foi estimado pela elaboração de uma matriz de confusão (ou matriz de erro), conforme descrito por Congalton (1991). A matriz de confusão indica a quantidade de janelas classificadas corretamente (na diagonal principal) e é importante para se conhecer as classes difíceis de classificar.

A partir da matriz de confusão, também foi possível classificar 2 (dois) tipos de erros de classificação das imagens: *erro de omissão (EO)*, em que a janela não é classificada na classe a qual ela pertence; e *erro de inclusão (EI)*, em que a janela é incluída em uma classe a qual ela não pertence (Baesso, 2005). Neste estudo, os erros de omissão são visualizados nas linhas verticais e os erros de inclusão podem ser observados nas colunas.

A mensuração do desempenho dos classificadores foi determinada pela porcentagem de acerto global (PAG) de classificação e pelo coeficiente Kappa.

A PAG do classificador foi estimada pela seguinte equação:

$$PAG = \frac{CC}{n_t} \times 100$$

em que,

PAG = porcentagem de acerto global;

CC = número de amostras classificadas corretamente; e

N_t = número total de amostras.

Através da matriz de erro, foi possível usar uma importante ferramenta de avaliação do classificador: o coeficiente Kappa (K). O coeficiente Kappa é uma avaliação bem mais adequada que a PAG, devido ao fato de ser sensível não só à perda de acurácia global como um todo, mas também devido às variações dos erros de omissão e de inclusão (Pedreira e Santos, 1999). O coeficiente Kappa é uma medida de quanto a classificação das imagens foi diferente de uma classificação aleatória (Rosenfield e Fitzpatrick, 1986). Quando o valor do Kappa for negativo, a classificação foi pior que uma classificação aleatória; quando o valor for zero, a classificação foi igual a uma classificação aleatória; e quando positivo, a classificação foi melhor que uma classificação aleatória.

Os valores gerados pelo Kappa vão até 1.0, possibilitando a classificação das imagens da seguinte forma (Adami et al., 2002):

< 0 = péssima;

$0 - 0.20$ = ruim;

$0.20 - 0.40$ = razoável;

$0.40 - 0.60$ = boa;

$0.60 - 0.80$ = muito boa e

$0.80 - 1.0$ = excelente.

O coeficiente Kappa foi estimado pela seguinte equação:

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

em que,

- $\hat{K}$ = 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 inclusão);
- $x_{\oplus i}$ = total da coluna i (erro de omissão); e
- c = Número total de doses.

3.4. Resultados e discussão

3.4.1. Casa de vegetação

a) Análise química foliar

A concentração de N respondeu significativamente segundo modelos quadráticos para FI nos dois estádios avaliados (Figura 3.4.1). Os híbridos de milho conduzidos sem omissão de nutriente apresentaram concentração de N foliar superior àqueles conduzidos nas menores doses de N, concordando com Ciampitti e Vyn (2011) e Romualdo et al. (2014).

Figura 3.4.1. Concentração de N na folha indicativa de três híbridos de milho em V4 (a) e em R1 (b) em função da concentração de N na solução nutritiva. *Significativo a 5%.

Nos híbridos cultivados com 5% e 20% de N na solução, a concentração deste nutriente na FI encontrou-se abaixo dos níveis foliares de N adequados para o milho em R1, que de acordo com Raij e Cantarella (1996) deveriam estar entre 27 e 35 g kg⁻¹. As concentrações de N na FI para os híbridos conduzidos sem omissão de nutriente encontraram-se dentro dessa faixa adequada para o milho.

De acordo com a Figura 3.4.2, a concentração de K na FI aumentou com o acréscimo deste nutriente na solução nutritiva em todos os híbridos e estádios estudados, concordando com resultados obtidos por Akram (2013) em híbridos de milho. A omissão de K (D1) na solução nutritiva resultou em concentração de K na FI significativamente ($p < 0.05$) inferior do que nas plantas que receberam este nutriente na solução.

Notou-se que, nos híbridos cultivados com 5% e 20% de K na solução em R1, a concentração deste nutriente na FI encontrou-se abaixo dos níveis foliares adequados para o milho neste estágio de desenvolvimento, que de acordo com Fancelli e Dourado Neto (2000) devem encontrar-se entre 20 e 40 g kg⁻¹. A concentração de K na FI para os híbridos conduzidos sem omissão de nutriente encontrou-se dentro dessa faixa adequada para o milho.

Figura 3.4.2. Concentração de K na folha indicativa de três híbridos de milho em V4 (a) e em R1 (b) em função da concentração de K na solução nutritiva. *Significativo a 5%.

b) Análise de imagens digitais: Padrões de textura

A porcentagem de acerto global (PAG) e o desvio padrão de acertos (std) na Abordagem 1 dos métodos de extração de características baseados em padrões de textura de imagens da FI de híbridos de milho nos estádios V4 e R1, cultivados com doses de N em casa de vegetação estão apresentados na Tabela 3.4.1.

Tabela 3.4.1. Porcentagem de acerto global (PAG) e desvio padrão (std) dos métodos de extração de características baseados em padrões de textura de imagens da FI de 3 híbridos de milho isoladamente (Abordagem 1) nos estádios V4 e R1 submetidos a doses de N em solução nutritiva em casa de vegetação.

Nitrogênio								
V4								
H1			H2			H3		
Método	PAG	std	Método	PAG	std	Método	PAG	std
Fourier	100,00	0,00	Fourier	83,25	3,92	Fourier	100,00	0,00
LBP	80,50	5,99	GWF	78,50	6,03	LBP	99,75	0,77
GW	79,50	5,37	Fractal	76,00	4,28	Fractal	98,75	2,07
Fractal	79,25	7,17	LBP	75,00	6,88	GW	98,75	1,72
GWF	76,25	7,75	GW	74,75	5,20	GWF	78,25	6,69
R1								
H1			H2			H3		
Método	PAG	std	Método	PAG	std	Método	PAG	std
LBP	97,75	2,19	Fourier	90,75	3,92	Fourier	100,00	0,00
Fourier	97,25	1,84	GWF	68,75	4,89	GW	86,25	5,41
GW	97,25	2,99	GW	67,00	4,22	Fractal	83,75	5,53
Fractal	95,25	3,62	LBP	61,75	4,74	LBP	81,25	9,34
GWF	62,25	5,71	Fractal	58,00	10,66	GWF	76,00	6,30

LBP - Local Binary Pattern, GW - Gabor Wavelets e GWF - Gabor Wavelets + Fractal Descriptors.

Observou-se que a FI do H1 em V4 e do H3 em V4 e R1 apresentou 100% das janelas das imagens classificadas corretamente pelo método Fourier (Tabela 3.4.1), ou seja, todas as janelas (100%) das FI extraídas foram classificadas corretamente dentro de sua referida dose.

Entretanto, outros métodos também se destacaram como o GWF para o H2 e o LBP, Fractal e GW para o H3 no estágio V4, não apresentando diferença estatística entre eles. No estágio R1, os métodos LBP, Fourier, GW e Fractal apresentaram a maior porcentagem de acertos (PAG) para o H1, variando entre 97,25 e 97,75% de acertos, e não houve diferença estatística entre eles, ou seja mais de 97,25% das janelas das imagens foram corretamente identificadas em sua dose respectiva.

Notou-se que, quando os híbridos foram estudados separadamente (Abordagem 1), o método Fourier apresentou alta PAG em todos os híbridos e nos 2 (dois) estádios de desenvolvimento estudados (Tabela 3.4.1).

Nos estádios V4 e R1, os híbridos H1 e H3 apresentaram porcentagem de acertos (PAG) superiores ao do H2, isso evidencia maior dificuldade de classificação desse híbrido.

Na Tabela 3.4.2, estão apresentados a porcentagem de acerto global (PAG) e o desvio padrão (std) na Abordagem 1 dos métodos de extração de características baseados em padrões de textura de imagens da FI de híbridos de milho nos estádios V4 e R1, cultivados com doses de K em casa de vegetação.

Tabela 3.4.2. Porcentagem de acerto global (PAG) e desvio padrão (std) dos métodos de extração de características baseados em padrões de textura de imagens da FI de 3 híbridos de milho isoladamente (Abordagem 1) nos estádios V4 e R1 submetidos a doses de K em solução nutritiva em casa de vegetação.

Potássio								
V4								
H1			H2			H3		
Método	PAG	std	Método	PAG	std	Método	PAG	std
GW	97,75	2,19	Fourier	97,00	2,30	Fourier	99,75	0,77
Fourier	96,25	2,12	GW	89,50	4,97	LBP	99,25	1,18
LBP	95,25	5,33	Fractal	85,00	4,71	GW	98,25	2,31
Fractal	89,00	7,47	GWF	81,75	6,24	GWF	93,75	3,09
GWF	74,50	7,98	LBP	81,75	6,67	Fractal	92,50	2,81
R1								
H1			H2			H3		
Método	PAG	std	Método	PAG	std	Método	PAG	std
Fourier	90,25	3,81	GWF	60,00	9,79	LBP	94,75	2,91
GW	85,00	7,17	LBP	59,75	7,40	GW	91,50	4,47
LBP	83,00	6,43	Fractal	59,25	6,13	Fourier	88,50	4,89
Fractal	68,75	9,45	Fourier	58,75	10,09	Fractal	85,00	7,34
GWF	65,25	6,06	GW	54,50	7,15	GWF	67,25	10,29

LBP - Local Binary Pattern, GW - Gabor Wavelets e GWF - Gabor Wavelets + Fractal Descriptors.

No estágio V4, o método Fourier também apresentou as melhores classificações de identificação de deficiência de K em todos os híbridos, juntamente com o GW e LBP em H1 e H3, que não apresentaram diferença estatística. Observou-se pela PAG desses resultados, que

97,75% das janelas foram classificados corretamente em H1 pelo GW e que 97,0% e 99,75% das janelas foram classificados corretamente dentro da referida dose de K, em H2 e H3 respectivamente pelo método Fourier (Tabela 3.4.2).

As imagens de folhas de híbridos de milho submetidos a doses de K (Tabela 3.4.2) apresentaram elevada PAG para todos os híbridos estudados exceto para o H2 em R1. Neste estágio de desenvolvimento, os melhores métodos de extração de características foram Fourier e GW em H1 bem como LBP e GW em H3.

Os resultados obtidos neste estudo foram superiores aos encontrados por Silva et al. (2014), que estudando métodos de extração de características para identificação de deficiência de Mg em um híbrido de milho, verificaram 75,5% de acertos no estágio V4 utilizando Dimensão Fractal Volumétrica em imagens coloridas. Romualdo et al. (2014) estudando também métodos de extração de características para identificação de deficiência de N em um híbrido de milho (DKB 390), encontraram 82,5% de acertos no estágio V4 com o método GW; no estágio R1, esses autores obtiveram 96,5% de acertos utilizando Dimensão Fractal Volumétrica e 98,0% utilizando GW em imagens coloridas.

Na Tabela 3.4.3, estão apresentados a porcentagem de acerto global (PAG) e o desvio padrão (std) na Abordagem 2 dos métodos de extração de características baseados em padrões de textura de imagens da FI de híbridos de milho nos estádios V4 e R1, cultivados com doses de N ou de K em casa de vegetação.

Tabela 3.4.3. Porcentagem de acerto global (PAG) e desvio padrão (std) dos métodos de extração de características baseados em padrões de textura de imagens classificando todas as doses de N ou de K em solução nutritiva independente dos híbridos (Abordagem 2) nos estádios V4 e R1 em casa de vegetação.

Nitrogênio					
V4			R1		
Método	PAG	std	Método	PAG	std
Fourier	76,96	2,57	Fourier	74,29	2,31
GW	64,92	3,1	GW	61,92	3,06
Fractal	64,21	3,09	LBP	57	2,2
LBP	63,96	2,55	Fractal	52,63	1,18
GWF	59,33	2,81	GWF	47,67	2,13
Potássio					
V4			R1		
Método	PAG	std	Método	PAG	std
Fourier	76,75	3,38	Fourier	61,13	4,64
GW	68,92	3,31	GW	41,08	3,15
Fractal	67,67	3,01	LBP	41,08	2,59
LBP	67,5	3,03	Fractal	38,42	2,97
GWF	61,21	2,43	GWF	36,08	3,89

LBP - Local Binary Pattern, GW - Gabor Wavelets e GWF - Gabor Wavelets + Fractal Descriptors.

Nesta segunda abordagem, quando a classificação das imagens foi realizada independentemente dos híbridos, tanto nas plantas com doses de N ou K como nos dois estádios avaliados (V4 e R1), houve redução na PAG em relação ao estudo individualizado dos híbridos, porém ainda podem ser considerados acertos elevados.

Nesta abordagem, o Fourier foi o método com maior PAG, sendo igual a 76,96% e 74,29% para os híbridos com doses de N e PAG igual a 76,75% e 61,13% para os híbridos com doses de K em solução nutritiva nos estádios V4 e R1 respectivamente (Tabela 3.4.3).

Na Tabela 3.4.4, estão apresentados a porcentagem de acerto global (PAG) e o desvio padrão (std) dos métodos de extração de características baseados em padrões de textura de imagens da FI nos estádios V4 e R1, verificando a classificação de todas as doses de N ou de K e de todos os híbridos em casa de vegetação analisados simultaneamente.

Tabela 3.4.4. Porcentagem de acerto global (PAG) e desvio padrão (std) dos métodos de extração de características baseados em padrões de textura de imagens da FI de 3 híbridos de milho analisados simultaneamente (Abordagem 3) nos estádios V4 e R1 submetidos a doses de N ou de K em solução nutritiva em casa de vegetação.

Nitrogênio					
V4			R1		
Método	PAG	std	Método	PAG	std
Fourier	68,79	2,64	Fourier	58,08	3,03
GW	54,17	2,26	GW	40,75	3,89
Fractal	53,88	2,79	LBP	36,46	3,04
LBP	52,13	3,55	Fractal	34,96	3,55
GWF	46,79	2,9	GWF	24,87	2,99

Potássio					
V4			R1		
Método	PAG	std	Método	PAG	std
Fourier	73,46	2,76	Fourier	45,63	2,75
GW	61,88	2,02	LBP	27,54	2,01
Fractal	59,75	3,35	GW	26,71	2,08
LBP	59,29	2,16	Fractal	21,71	2,27
GWF	53,17	3,5	GWF	17,04	2,54

LBP - Local Binary Pattern, GW - Gabor Wavelets e GWF - Gabor Wavelets + Fractal Descriptors.

Notou-se que, quando a classificação das imagens da FI foi realizada com todos os híbridos simultaneamente, houve redução na PAG de todos os métodos de extração de características avaliados, quando comparada à classificação das imagens dos híbridos isolados (Abordagem 1), bem como quando comparada à classificação das imagens independentemente dos híbridos (Abordagem 2), tanto para a FI de plantas com doses de N como as com doses de K em solução nutritiva (Tabela 3.4.4).

O método Fourier foi o que apresentou a melhor classificação das imagens da FI dos híbridos cultivados com doses de N ou de K em solução nutritiva, nos 2 (dois) estádios

avaliados, evidenciada por acertos de 68,79% em V4 e a 58,08% em R1 para os híbridos com dose de N; e acertos igual a 73,46% em V4 e a 45,63% em R1 para os híbridos com dose de K, ou seja, por exemplo, nos híbridos de milho em V4 conduzidos com doses de K, 73,46% das imagens da FI foram classificadas corretamente dentro de cada doses.

Nota-se ainda, em todos os métodos estudados, que a porcentagem de acertos (PAG) foi superior no estádio V4 (Tabela 3.4.4), concordando com resultados obtidos por Silva et al. (2014), que estudaram métodos de extração de características para identificação de deficiência de Mg em um híbrido de milho, e verificaram a melhor classificação de imagens no estádio V4.

c) Análise de imagens digitais: Índices espectrais

Nitrogênio

A porcentagem de acerto global (PAG) e o coeficiente Kappa dos classificadores desenvolvidos para a FI de híbridos de milho no estádio V4 e R1, cultivadas com doses de N em casa de vegetação, estão apresentados nas Tabelas 3.4.5 e 3.4.6 respectivamente.

As janelas das imagens da FI dos híbridos no estádio V4 submetidos a doses de N em solução nutritiva apresentaram Kappa igual a 0,77 para H1; 1,0 para H2 e 0,67 para H3, indicando classificação considerada respectivamente muito boa, excelente e muito boa, de acordo com Adami et al. (2002). Notou-se pela PAG, que 83% das janelas da FI foram classificadas corretamente dentro da dose em H1, 100% foram classificadas corretamente em H2 e 75% foram classificadas corretamente em H3.

Na Tabela 3.4.5, também pode ser observado que para o H1, a classificação foi considerada muito boa em 9 (nove) casos, boa em 3 (três) casos e razoável em 1 (um) caso. Para o H2 a classificação foi considerada excelente em 11 casos, muito boa em 1 (um) caso e ruim em 1 (um) caso. Já a classificação do H3 foi considerada muito boa em 4 (quatro) casos, boa em 8 (oito) e ruim em 1 caso.

As imagens de folhas de milho no estádio R1 submetidos a doses de N (Tabela 3.4.6) apresentaram uma classificação muito boa para o H1 e H2 e excelente para o H3, com Kappa iguais a 0,70; 0,77 e 0,80 respectivamente para H1, H2 e H3. Observou-se pela PAG desses resultados, que 78% das janelas foram classificadas corretamente em H1, 83% foram classificadas corretamente em H2 e 85% foram classificadas corretamente em H3.

Tabela 3.4.5. Porcentagem de acerto global (PAG) e índice Kappa para cada combinação de índices espectrais utilizados como vetor de características da folha indicativa de 3 híbridos de milho no estágio V4 submetidos a doses de N na solução nutritiva em casa de vegetação.

H1			H2			H3		
Índices espectrais	PAG	Kappa	Índices espectrais	PAG	Kappa	Índices espectrais	PAG	Kappa
Evd, Vern e Vn	83	0,77	Evd	100	1,00	Vern e Rvv	75	0,67
Vn e Rvv	78	0,70	Evd e Vern	100	1,00	Vern	70	0,60
Evd e Vn	75	0,67	Evd e Vn	100	1,00	Evd e Vn	70	0,60
Vern, Vn e Rvv	75	0,67	Evd e Rvv	98	0,97	Vern, Vn e Rvv	70	0,60
Evd e Vern	73	0,63	Vern e Rvv	98	0,97	Evd	68	0,57
Evd e Rvv	73	0,63	Evd, Vern e Vn	98	0,97	Vn	68	0,57
Vern	70	0,60	Evd, Vern, Vn e Rvv	98	0,97	Evd e Vern	68	0,57
Vern e Vn	70	0,60	Vern, Vn e Rvv	95	0,93	Vern e Vn	68	0,57
Vern e Rvv	70	0,60	Vern e Vn	93	0,90	Evd e Rvv	63	0,50
Evd	63	0,50	Vn e Rvv	90	0,87	Vn e Rvv	63	0,50
Evd, Vern, Vn e Rvv	63	0,50	Vn	88	0,83	Evd, Vern e Vn	60	0,47
Vn	60	0,47	Vern	80	0,73	Evd, Vern, Vn e Rvv	58	0,43
Rvv	48	0,30	Rvv	38	0,17	Rvv	35	0,13

Tabela 3.4.6. Porcentagem de acerto global (PAG) e índice Kappa para cada combinação de índices espectrais utilizados como vetor de características da folha indicativa de 3 híbridos de milho no estágio R1 submetidos a doses de N na solução nutritiva em casa de vegetação.

H1			H2			H3		
Índices espectrais	PAG	Kappa	Índices espectrais	PAG	Kappa	Índices espectrais	PAG	Kappa
Evd e Vern	78	0,70	Vern, Vn e Rvv	83	0,77	Vern e Rvv	85	0,80
Evd e Rvv	78	0,70	Evd e Vern	80	0,73	Vn e Rvv	85	0,80
Vern e Vn	78	0,70	Evd e Rvv	80	0,73	Vern	83	0,77
Vern e Rvv	78	0,70	Vern e Vn	80	0,73	Evd e Vern	83	0,77
Vn e Rvv	78	0,70	Vern e Rvv	80	0,73	Evd e Rvv	83	0,77
Vern, Vn e Rvv	75	0,67	Vn e Rvv	80	0,73	Vern e Vn	83	0,77
Evd	70	0,60	Evd, Vern, Vn e Rvv	80	0,73	Evd	75	0,67
Vn	70	0,60	Evd, Vern e Vn	70	0,60	Evd e Vn	75	0,67
Evd, Vern, Vn e Rvv	70	0,60	Evd	68	0,57	Evd, Vern e Vn	75	0,67
Evd e Vn	63	0,50	Vn	68	0,57	Vern, Vn e Rvv	73	0,63
Evd, Vern e Vn	63	0,50	Vern	63	0,50	Evd, Vern, Vn e Rvv	73	0,63
Vern	60	0,47	Evd e Vn	63	0,50	Vn	68	0,57
Rvv	40	0,20	Rvv	53	0,37	Rvv	20	0,00

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

Na Tabela 3.4.6, observa-se ainda que para o H1 a classificação foi considerada muito boa em 9 (nove) casos, boa em 3 (três) e razoável em 1 (um) caso. No H2, foi muito boa em 8 (oito), boa em 4 (quatro) e razoável em 1 (um) caso. E para o H3, 2 (dois) casos a classificação foi considerada excelente, 9 (nove) como muito boa, 1 (um) caso boa e 1 (um) caso foi considerada péssima.

Observa-se que em todos os híbridos, tanto no estádio V4 como em R1, a pior classificação foi obtida utilizando o índice Rvv (razão verde-vermelho).

Nas Tabelas 3.4.7 e 3.4.8, estão apresentadas as matrizes de confusão, obtidas a partir da combinação de índices espectrais que obtiveram a melhor classificação do PAG e Kappa, dos híbridos de milho no estádio V4 e R1 respectivamente.

Tabela 3.4.7. Matriz de confusão obtida a partir da combinação de índices espectrais que apresentaram a melhor classificação das imagens da folha indicativa de 3 híbridos de milho no estádio V4 submetidos a doses de N na solução nutritiva em casa de vegetação.

	H1					H2					H3				
	D1	D2	D3	D4	EO (%)	D1	D2	D3	D4	EO (%)	D1	D2	D3	D4	EO (%)
D1	10	0	0	0	0	10	0	0	0	0	8	2	0	0	20
D2	0	9	0	1	10	0	10	0	0	0	1	8	1	0	20
D3	0	1	6	3	40	0	0	10	0	0	0	1	6	3	40
D4	0	1	1	8	20	0	0	0	10	0	0	0	2	8	20
EI (%)	0	18	14	33		0	0	0	0		11	27	33	27	

Obtidas através das combinações “Evd, Vern e Vn” para H1; “Evd”, “Evd e Vern” e “Evd e Vn” para H2 e “Vern e Rvv” para H3. EO= erro de omissão e EI = erro de inclusão.

Tabela 3.4.8. Matriz de confusão obtida a partir da combinação de índices espectrais que apresentaram a melhor classificação das imagens da folha indicativa de 3 híbridos de milho no estádio R1 submetidos a doses de N na solução nutritiva em casa de vegetação.

	H1					H2					H3				
	D1	D2	D3	D4	EO (%)	D1	D2	D3	D4	EO (%)	D1	D2	D3	D4	EO (%)
D1	9	1	0	0	10	8	2	0	0	20	7	3	0	0	30
D2	1	9	0	0	10	3	7	0	0	30	1	9	0	0	10
D3	0	1	6	3	40	0	0	9	1	10	0	0	9	1	10
D4	0	0	3	7	30	0	0	2	8	20	0	0	1	9	10
EI (%)	10	18	33	30		27	22	18	11		13	25	10	10	

Obtidas através das combinações “Evd e Vern”, “Evd e Rvv”, “Vern e Vn”, “Vern e Rvv” e “Vn e Rvv” para H1; “Vern e Vn” e “Vern, Vn e Rvv” para H2 e “Vern e Rvv” e “Vn e Rvv” para H3. EO= erro de omissão e EI = erro de inclusão.

O erro de omissão (EO) pode ser visualizado nas linhas horizontais, já o erro de inclusão (EI) é analisado visualizando as colunas. No estádio V4 (Tabela 3.4.7), na classe D3, o classificador cometeu 4 erros de omissão (1+3), num total de 10 janelas classificadas, esse erro representou 40%, portanto EO = 40%, ou seja, 40% das janelas foram classificadas em

uma classe (ou dose de nutriente) a qual ela não pertencia. Entretanto, para a mesma classe D3 (Tabela 3.4.8), o classificador cometeu 3 (três) erros de inclusão (deveria ser classificado dentro da D4 mas foi incluído na D3), num total de 9 janelas classificadas (na coluna). Esse erro representou 33%, portanto $EI = 33\%$, ou seja, 33% das janelas foram incluídas em uma classe a qual ela não pertencia.

No estádio V4 (Tabela 3.4.7), a maior dificuldade de classificação no H1 foi para as doses 15 e 30 mMol L^{-1} , D3 e D4 respectivamente. Na D3, 40% das janelas de imagens analisadas foram classificadas em uma classe incorreta ($EO = 40\%$) e na D4 o erro de omissão foi de 20%, ou seja, 20% das janelas de imagens analisados foram classificados em uma classe incorreta (e não na D4). No H3 a maior dificuldade de classificação foi na dose 15 mMol L^{-1} (D3), apresentando $EO = 40\%$.

No estádio R1 (Tabela 3.4.8), para o H1, as classes com maior dificuldade de serem classificadas foram as mesmas apresentadas do estádio V4 (15 e 30 mMol L^{-1}), e apresentaram EI iguais a 33 e 30% respectivamente. Entretanto, para o H2 foi a D2 (3 mMol L^{-1}) a classe mais difícil de ser classificada. Para o H3, a classe com maior dificuldade de classificação foi a D1 (1 mMol L^{-1}) apresentando EO igual a 30%, ou seja, 30% das janelas analisados foram classificadas em uma classe incorreta.

Pelas matrizes de confusão apresentadas, nos dois estádios de desenvolvimento estudados, é importante ressaltar que os erros de classificação ocorreram entre as classes imediatamente superiores ou inferiores à classe corretamente pertencente em todos os híbridos, exceto para a D2 no H1 em V4. Por exemplo, no estádio R1 (Tabela 3.4.7) a D1 do H1 teve 9 (nove) janelas corretamente classificadas como D1 e 1 janela classificada incorretamente como D2 (dose imediatamente superior a sua correta classificação). A D4 do H2 apresentou 8 janelas corretamente classificadas como D4 e 2 janelas classificadas incorretamente como D3 (dose imediatamente inferior).

No estádio R1, também houve uma boa separação entre janelas de folhas com omissão de N (1e 3 mMol L^{-1}), daquelas folhas que não passaram por omissão de nutriente (15 e 30 mMol L^{-1}).

Potássio

A porcentagem de acerto global (PAG) e o coeficiente Kappa dos classificadores desenvolvidos para a FI de plantas de milho nos estádios V4 e R1, cultivadas com doses de K em casa de vegetação, estão apresentados nas Tabelas 3.4.9 e 3.4.10 respectivamente.

Tabela 3.4.9. Porcentagem de acerto global (PAG) e índice Kappa para cada combinação de índices espectrais utilizados como vetor de características da folha indicativa de 3 híbridos de milho no estádio V4 submetidos a doses de K na solução nutritiva em casa de vegetação.

H1			H2			H3		
Índices espectrais	PAG	Kappa	Índices espectrais	PAG	Kappa	Índices espectrais	PAG	Kappa
Evd, Vern, Vn e Rvv	78	0,70	Vern, Vn e Rvv	75	0,67	Evd e Vern	68	0,57
Vern, Vn e Rvv	70	0,60	Evd e Rvv	73	0,63	Evd e Rvv	68	0,57
Vern	68	0,57	Evd e Vern	70	0,60	Vern e Vn	68	0,57
Evd e Vn	68	0,57	Vern e Vn	70	0,60	Vern e Rvv	68	0,57
Vern e Rvv	60	0,47	Vern e Rvv	70	0,60	Vn e Rvv	68	0,57
Evd, Vern e Vn	60	0,47	Vn e Rvv	70	0,60	Vern, Vn e Rvv	68	0,57
Evd	58	0,43	Evd, Vern, Vn e Rvv	70	0,60	Evd, Vern e Vn	58	0,43
Vn	58	0,43	Evd, Vern e Vn	68	0,57	Evd, Vern, Vn e Rvv	58	0,43
Evd e Vern	58	0,43	Evd	60	0,47	Evd	55	0,40
Evd e Rvv	58	0,43	Vn	60	0,47	Vn	55	0,40
Vern e Vn	58	0,43	Vern	58	0,43	Evd e Vn	53	0,37
Vn e Rvv	58	0,43	Evd e Vn	55	0,40	Rvv	40	0,20
Rvv	25	0,00	Rvv	53	0,37	Vern	35	0,13

Tabela 3.4.10. Porcentagem de acerto global (PAG) e índice Kappa para cada combinação de índices espectrais utilizados como vetor de características da folha indicativa de 3 híbridos de milho no estádio R1 submetidos a doses de K na solução nutritiva em casa de vegetação.

H1			H2			H3		
Índices espectrais	PAG	Kappa	Índices espectrais	PAG	Kappa	Índices espectrais	PAG	Kappa
Evd e Vern	65	0,53	Evd e Vern	90	0,87	Evd e Vern	78	0,70
Evd e Vn	65	0,53	Evd e Rvv	90	0,87	Vern e Vn	78	0,70
Vern e Vn	65	0,53	Vern e Vn	90	0,87	Evd e Rvv	73	0,63
Evd e Rvv	63	0,50	Vern e Rvv	90	0,87	Vn e Rvv	73	0,63
Vn e Rvv	63	0,50	Vn e Rvv	90	0,87	Vern e Rvv	68	0,57
Evd, Vern e Vn	63	0,50	Vern	85	0,80	Evd, Vern e Vn	68	0,57
Vern	60	0,47	Vern, Vn e Rvv	85	0,80	Vern, Vn e Rvv	68	0,57
Vern e Rvv	60	0,47	Evd, Vern e Vn	78	0,70	Evd, Vern, Vn e Rvv	68	0,57
Evd	58	0,43	Evd, Vern, Vn e Rvv	78	0,70	Evd e Vn	48	0,30
Vn	58	0,43	Evd	63	0,50	Vern	45	0,27
Evd, Vern, Vn e Rvv	58	0,43	Vn	63	0,50	Evd	43	0,23
Vern, Vn e Rvv	53	0,37	Evd e Vn	60	0,47	Vn	43	0,23
Rvv	33	0,10	Rvv	53	0,37	Rvv	40	0,20

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

As janelas de folhas de milho no estádio V4 submetidos a doses de K (Tabela 3.4.9) apresentaram uma classificação muito boa para H1 e H2 (Kappa = 0,70 e 0,67 respectivamente) e boa para o H3 (Kappa = 0,57). Notou-se que 78% das janelas foram classificadas corretamente em H1, 75% das janelas foram classificadas corretamente em H2 e 68% foram classificados corretamente em H3.

Para os híbridos no estádio V4, a classificação foi considerada muito boa em 2 (dois) casos, boa em 10 (dez) e ruim em 1 (um) no H1. Para o H2, a classificação foi considerada muito boa em 7 (sete) casos, boa em 5 (cinco) e razoável em 1 (um) caso. Para o H3 a classificação foi considerada boa em 10 (dez) casos, razoável em 2 (dois) caso e ruim em 1 (um), de acordo com critérios de Adami et al. (2002).

No estádio R1, as imagens de folhas de milho submetidos a doses de K em solução nutritiva (Tabela 3.4.10) apresentaram uma classificação muito boa para todos os híbridos estudados (Kappa = 0,77). Observou-se, pela PAG desses resultados, que 83% das janelas foram classificadas corretamente.

Para os híbridos estudados, de acordo com Adami et al. (2002), a classificação foi considerada muito boa em 9 (nove) casos, boa em 3 (três) e razoável em 1 (um) caso (Tabela 3.4.10).

Em todos os híbridos conduzidos com doses de K nos 2 (dois) estádios avaliados, a pior classificação foi obtida utilizando o índice Rvv (razão verde-vermelho), assim como ocorreu nas plantas submetidas a doses de N em solução nutritiva.

Nas Tabelas 3.4.11 e 3.4.12, estão apresentadas as matrizes de confusão, utilizando a maior classificação do PAG e Kappa, dos híbridos de milho no estádio V4 e R1, respectivamente, conduzidos com doses de K em solução nutritiva.

Tabela 3.4.11. Matriz de confusão obtida a partir da combinação de índices espectrais que apresentaram a melhor classificação das imagens da folha indicativa de 3 híbridos de milho no estádio V4 submetidos a doses de K na solução nutritiva em casa de vegetação.

	H1					H2					H3				
	D1	D2	D3	D4	EO (%)	D1	D2	D3	D4	EO (%)	D1	D2	D3	D4	EO (%)
D1	6	3	1	0	40	8	0	2	0	20	7	1	0	2	30
D2	1	7	2	0	30	0	8	0	2	20	0	6	2	2	40
D3	0	1	9	0	10	0	1	9	0	10	0	3	7	0	30
D4	1	0	0	9	10	2	2	1	5	50	2	1	0	7	30
EI (%)	25	36	25	0		20	27	25	29		22	45	22	36	

Obtidas através das combinações “Evd, Vern, Vn e Rvv” para H1, “Vern, Vn e Rvv” para H2 e “Evd e Vern”, “Evd e Rvv”, “Vern e Vn”, “Vn e Rvv” e “Vern, Vn e Rvv” para H3. EO= erro de omissão e EI = erro de inclusão.

No estádio V4 (Tabela 3.4.11), a maior dificuldade de classificação no H1 foi encontrada nas doses 0,3 e 1,2 mMol L⁻¹ de K (D1 e D2 respectivamente). Na D1, 40% das janelas analisados foram classificadas em uma classe incorreta (EO = 40%) e na D2 o erro de omissão foi de 30%, ou seja, 30% das janelas analisados foram classificados em uma classe a qual ela não pertencia. No H2 a maior dificuldade de classificação foi na dose 12,0 mMol L⁻¹ (D4), apresentando EO = 50%. No H3, o maior EO foi de 40% na D2 (1,2 mMol L⁻¹ de K). Nas demais doses de K o EO foi de 30%.

No estádio R1 (Tabela 3.4.12), a classe com maior dificuldade de classificação foi a D3 (6,0 mMol L⁻¹ de K) com EO = 40%. Todas as janelas da FI conduzidas com 0,3 mMol L⁻¹ de K (D1) foram corretamente classificadas em todos os híbridos estudados, apresentando EI e EO iguais a zero.

Tabela 3.4.12. Matriz de confusão obtida a partir da combinação de índices espectrais que apresentaram a melhor classificação das imagens da folha indicativa de 3 híbridos de milho no estádio R1 submetidos a doses de K na solução nutritiva em casa de vegetação.

	H1					H2					H3				
	D1	D2	D3	D4	EO (%)	D1	D2	D3	D4	EO (%)	D1	D2	D3	D4	EO (%)
D1	10	0	0	0	0	10	0	0	0	0	10	0	0	0	0
D2	0	9	0	1	10	0	9	0	1	10	0	9	0	1	10
D3	0	1	6	3	40	0	1	6	3	40	0	1	6	3	40
D4	0	1	1	8	20	0	1	1	8	20	0	1	1	8	20
EI (%)	0	18	14	33		0	18	14	33		0	18	14	33	

Obtidas através das combinações “Evd, Vern e Vn” para H1, H2 e H3. EO= erro de omissão e EI = erro de inclusão.

Segundo os critérios sugeridos por Adami et al. (2002), o classificador é tido como muito bom quando apresenta valor de Kappa igual e/ou superior a 0,6. Desta forma, na Tabela 3.4.13, estão apresentadas as frequências de ocorrência de classificadores com Kappa igual e/ou superior a 0,6 para as 2 (duas) épocas de aquisição de imagens nos 3 (três) híbridos estudados com doses de N ou K para cada combinação de índices espectrais.

Os melhores desempenhos normalmente ocorreram com a utilização de mais de um índice espectral no vetor de características do classificador (Tabela 3.4.13). Dessa maneira, a utilização de mais de um índice espectral facilitou a discriminação das diferentes doses de N ou de K utilizadas em solução nutritiva, concordando com os resultados obtidos por Baesso et al. (2007), estudando o uso de índices espectrais, obtidos a partir de imagens digitais, para discriminar feijoeiros submetidos a diferentes doses de N.

Tabela 3.4.13. Frequências de ocorrência de classificadores com Kappa igual ou superior a 0,6 para cada combinação de índices espectrais utilizados como vetor de características para híbridos de milho com doses de N ou K em casa de vegetação.

Índices espectrais	N*	K*
Evd	3	0
Vern	4	3
Vn	2	0
Rvv	0	0
Evd e Vern	5	4
Evd e Vn	4	3
Evd e Rvv	5	4
Vern e Vn	5	4
Vern e Rvv	6	4
Vn e Rvv	5	4
Evd, Vern e Vn	4	3
Vern, Vn e Rvv	6	5
Evd, Vern, Vn e Rvv	4	2

Evd - excesso de verde; Vern - vermelho normalizado; Vn - verde normalizado; Rvv - razão verde-vermelho. * Frequência de ocorrência máxima igual a 6 (duas épocas x três híbridos).

3.4.2. Campo

a) Análise química foliar

Na Figura 3.4.3, pode ser observado que o aumento de N na adubação resultou em maior concentração de N foliar em V4 e em R1, concordando com Romualdo et al. (2014), Izsáki (2009) e Bruns e Ebelhar (2006), que estudaram o efeito de doses de adubação nitrogenada na concentração de nutrientes no milho.

Figura 3.4.3. Concentração de N na folha indicativa de três híbridos de milho em V4 (a) e em R1 (b) em função da concentração de N na adubação. *Significativo a 5%.

Na Figura 3.4.4, nota-se que o incremento de K₂O na adubação resultou em maior concentração de K foliar em V4 e em R1, segundo modelos quadráticos para todos os híbridos, exceto para o H3 no estágio R1, concordando com Romualdo et al. (2014), que estudaram o efeito de doses de K₂O sobre a concentração de nutrientes do milho.

Figura 3.4.4. Concentração de K (b) na folha indicativa de três híbridos de milho em V4 (a) e em R1 (b) em função da concentração de K₂O na adubação. *Significativo a 5%.

b) Análise de imagens: Padrões de textura

A porcentagem de acerto global (PAG) e o desvio padrão (std) dos métodos de extração de características baseados em padrões de textura de imagens da FI nos estádios V4 e R1 no campo estão apresentados na Tabela 3.4.14, verificando a classificação de todas as doses de N com os híbridos isoladamente.

Tabela 3.4.14. Porcentagem de acerto global (PAG) e desvio padrão (std) dos métodos de extração de características baseados em padrões de textura de imagens da FI de 3 híbridos de milho isoladamente (Abordagem 1) nos estádios V4 e R1 submetidos a doses de N e cultivados no campo.

Nitrogênio								
V4								
H1			H2			H3		
Método	PAG	std	Método	PAG	std	Método	PAG	std
LBP	69,00	3,38	Fourier	66,25	6,59	LBP	65,75	9,72
Fourier	68,75	9,67	LBP	66,25	6,04	Fourier	63,50	8,01
GW	46,00	5,68	GW	47,00	5,99	GW	49,00	3,94
Fractal	45,00	6,04	Fractal	43,63	6,02	Fractal	44,88	5,32
GWF	44,50	4,72	GWF	43,38	5,34	GWF	44,13	4,17
R1								
H1			H2			H3		
Método	PAG	std	Método	PAG	std	Método	PAG	std
Fourier	69,00	4,60	LBP	86,50	5,03	LBP	90,75	4,26
LBP	64,75	9,39	Fourier	77,25	6,61	Fourier	87,50	6,12
GW	44,88	6,19	GW	44,63	6,67	GW	45,38	5,21
Fractal	42,13	6,35	Fractal	42,38	3,56	Fractal	38,75	6,26
GWF	34,00	4,71	GWF	33,00	5,04	GWF	30,50	5,66

LBP - Local Binary Pattern, GW - Gabor Wavelets e GWF - Gabor Wavelets + Fractal Descriptors.

Observou-se que houve uma redução na PAG de identificação de deficiência de N na FI dos híbridos conduzidos no campo (Tabela 3.4.14), em relação aos híbridos conduzidos em casa de vegetação, esse fato pode ser devido às variações naturais que podem ocorrer no campo, ao contrário das condições controladas de casa de vegetação.

Os método Fourier e LBP foram os que apresentaram a maior PAG em todos os híbridos e nos 2 (dois) estádios de desenvolvimento estudados (Tabela 3.4.14).

Ao contrário do que ocorreu em casa de vegetação, a identificação de deficiência foi melhor no estádio R1 do que no V4 para os híbridos H2 e H3. Esse resultado concorda com os encontrados por Romualdo et al. (2014). No estádio V4, foi observada porcentagem de acertos de 69% (Fourier) e de 68,75% (LBP) no H1; 66,25% (Fourier e LBP) no H2 e 65,75% (LBP) e 63,5% (Fourier). Entretanto, no estádio R1, a PAG foi de 69,0% (Fourier) e 64,75%

(LBP) no H1; 86,5% (LBP) e 77,25% (Fourier) no H2 e 90,75% (LBP) e 87,5% (Fourier) no H3.

Na Tabela 3.4.15, estão apresentados a porcentagem de acerto global (PAG) e o desvio padrão (std) dos métodos de extração de características baseados em padrões de textura de imagens da FI nos estádios V4 e R1, verificando a classificação de todas as doses de K₂O na adubação no campo com os híbridos isoladamente.

Tabela 3.4.15. Porcentagem de acerto global (PAG) e desvio padrão (std) dos métodos de extração de características baseados em padrões de textura de imagens da FI de 3 híbridos de milho isoladamente (Abordagem 1) nos estádios V4 e R1 submetidos a doses de K₂O na adubação e cultivados no campo.

Potássio								
V4								
H1			H2			H3		
Método	PAG	std	Método	PAG	std	Método	PAG	std
Fourier	67,00	8,15	LBP	64,75	6,82	Fourier	68,50	6,26
LBP	66,50	10,42	Fourier	63,00	4,68	LBP	67,50	6,56
GWF	43,13	5,38	GWF	47,88	4,13	Fractal	48,25	5,78
GW	41,88	5,63	GW	47,13	4,04	GWF	47,13	7,73
Fractal	40,88	5,24	Fractal	43,50	4,78	GW	45,25	7,61
R1								
H1			H2			H3		
Método	PAG	std	Método	PAG	std	Método	PAG	std
Fourier	69,50	7,89	Fourier	79,00	8,43	LBP	63,50	7,75
LBP	61,25	7,19	LBP	61,25	4,29	Fourier	60,00	10,21
GWF	32,75	5,20	Fractal	37,63	5,25	GWF	33,63	4,51
GW	32,25	5,97	GW	35,13	4,66	GW	32,88	7,75
Fractal	28,50	4,89	GWF	34,63	5,10	Fractal	31,13	3,93

LBP - Local Binary Pattern, GW - Gabor Wavelets e GWF - Gabor Wavelets + Fractal Descriptors.

Assim como ocorreu com os híbridos submetidos a doses de N na adubação, pode ser observada redução na PAG de deficiência de K na FI dos híbridos conduzidos no campo com doses de K₂O (Tabela 3.4.15), em relação aos híbridos conduzidos em casa de vegetação, exceto para o H2 em R1, esse fato também pode ser devido às variações naturais que podem ocorrer no campo, ao contrário das condições controladas de casa de vegetação. Mesmo assim, esses acertos podem ser considerados elevados, uma vez que a identificação visual de deficiência foi muito difícil, principalmente para os híbridos com 50% da dose de K₂O.

Os métodos Fourier e LBP foram os que apresentaram a maior PAG em todos os híbridos e nos 2 (dois) estádios de desenvolvimento estudados, exceto para o H2 em R1 que apresentou melhores resultados com apenas o Fourier (Tabela 3.4.15).

No estádio V4, foi observada porcentagem de acertos de 67% (Fourier) e 66,5% (LBP) no H1; 64,75% (LBP) e 63,0 (Fourier) no H2 e 68,5 % (LBP) e 67,5% (Fourier) no H3. Para o estádio R1, a PAG foi de 69,5% (Fourier) e 61,25% (LBP) no H1; 79,0% (Fourier) no H2 e 63,5% (LBP) e 60,0% (Fourier) no H3. Esses resultados foram superiores aos obtidos por Romualdo (2013), que estudando a identificação de deficiência nutricional por análise de imagens em um único híbrido de milho conduzido com doses de macronutrientes separadamente no campo, obteve PAG igual a 55,4% no estádio V4 e 52,4% no estádio R1.

Na Tabela 3.4.16, está apresentada a classificação de todas as doses de N ou de K₂O na adubação independentemente dos híbridos, indicando a PAG e o desvio padrão (std) dos métodos de extração de características baseados em padrões de textura de imagens da FI nos estádios V4 e R1 no campo.

Tabela 3.4.16. Porcentagem de acerto global (PAG) e desvio padrão (std) dos métodos de extração de características baseados em padrões de textura de imagens, classificando todas as doses de N ou de K₂O em na adubação independente dos híbridos (Abordagem 2) nos estádios V4 e R1 no campo.

Nitrogênio					
V4			R1		
Método	PAG	std	Método	PAG	std
LBP	46,21	3,67	Fourier	45,29	1,39
Fourier	45,37	3,25	LBP	38,83	2,81
GW	44,96	3,03	GW	37,71	3,09
Fractal	41,67	3,75	Fractal	35,17	3,38
GWF	41,50	3,4	GWF	31,75	4,36
Potássio					
V4			R1		
Método	PAG	std	Método	PAG	std
Fourier	43,96	2,45	Fourier	34,13	3,35
LBP	43,21	1,87	LBP	31,83	1,93
GW	41,54	1,55	GWF	31,71	2,24
Fractal	41,46	3,75	GW	31,04	4,09
GWF	41,33	3	Fractal	30,63	3,7

LBP - Local Binary Pattern, GW - Gabor Wavelets e GWF - Gabor Wavelets + Fractal Descriptors.

Nesta segunda abordagem, quando a classificação das imagens foi realizada independentemente dos híbridos, houve uma redução significativa na PAG em relação ao estudo individualizado dos híbridos, nas plantas com doses de N ou K₂O na adubação, bem como nos estádios V4 e R1.

Não foi observada diferença significativa entre os métodos de extração de características para a identificação de deficiência de N ou de K nos híbridos no estádio V4

conduzidos no campo com doses de N ou de K₂O na adubação. Os métodos apresentaram PAG entre 41,5% a 46,21% e 41,33% a 43,96% respectivamente N e K (Tabela 3.4.16).

No estágio R1, com a classificação realizada independente dos híbridos, o método Fourier apresentou a melhor PAG (45,29%), para os híbridos conduzidos no campo com doses de N na adubação. Entretanto, para os híbridos conduzidos no campo com doses de K₂O, os métodos de extração de características não apresentaram diferença estatística na classificação, com PAG variando entre 30,63% a 34,13%.

Na Tabela 3.4.17, estão apresentados a porcentagem de acerto global (PAG) e o desvio padrão (std) dos métodos de extração de características baseados em padrões de textura de imagens da FI nos estádios V4 e R1, verificando a classificação de todas as doses de N ou de K₂O e de todos os híbridos conduzidos no campo e analisados simultaneamente.

Tabela 3.4.17. Porcentagem de acerto global (PAG) e desvio padrão (std) dos métodos de extração de características baseados em padrões de textura de imagens da FI de 3 híbridos de milho analisados simultaneamente (Abordagem 3) nos estádios V4 e R1 submetidos a doses de N ou de K₂O na adubação conduzidos no campo.

Nitrogênio					
V4			R1		
Método	PAG	std	Método	PAG	std
Fourier	35,67	2,64	Fourier	31,67	2,69
LBP	34,46	3,06	LBP	22,92	3,87
GW	32,58	3,69	GW	21,96	3,22
Fractal	30,17	2,27	Fractal	19,58	1,68
GWF	28,63	3,35	GWF	15,42	1,99
Potássio					
V4			R1		
Método	PAG	std	Método	PAG	std
Fourier	34,71	4,49	Fourier	26,12	2,21
LBP	30,38	3,28	LBP	16,54	2,36
GW	29,92	2,7	Fractal	16,33	2,03
GWF	28,46	3,35	GW	16,04	1,87
Fractal	27,92	1,93	GWF	15	2,12

Notou-se na Abordagem 3 (classificação das imagens da FI realizada com todos os híbridos simultaneamente), redução na PAG de todos os métodos de extração de características avaliados, quando comparada à classificação das imagens na Abordagem 1 (híbridos isolados) e na Abordagem 2 (classificação das imagens independente dos híbridos), para a FI dos híbridos conduzidos com doses de N como as com doses de K₂O na adubação (Tabela 3.4.17).

No estágio V4, os métodos Fourier, LBP e GW apresentaram a melhor classificação de doses de N e os métodos Fourier, LBP, GW e GWF apresentaram a melhor classificação de doses de K na FI de híbridos de milho conduzidos no campo. Entretanto, no estágio R1, o método que apresentou a melhor classificação de deficiência de N ou de K foi o Fourier, com PAG igual a 31,67% e 26,12% para os híbridos conduzidos no campo com doses de N ou de K₂O respectivamente.

Notou-se ainda em todos os métodos estudados que a porcentagem de acertos (PAG) foi superior no estágio V4 (Tabelas 3.4.16 e 3.4.17), concordando com resultados obtidos por Silva et al. (2014) que, estudando métodos de extração de características para identificação de deficiência de Mg em um híbrido de milho, verificaram a melhor classificação de imagens no estágio V4.

c) Análise de imagens: Índices espectrais

Nitrogênio

A porcentagem de acerto global (PAG) e o coeficiente Kappa dos classificadores desenvolvidos para a FI de híbridos de milho no estádio V4 e R1, cultivados com doses de N no campo, estão apresentados nas Tabelas 3.4.18 e 3.4.19 respectivamente.

No estádio V4, as imagens de folhas de milho submetidos a doses de N apresentaram uma classificação razoável para o H1 e H3, apresentando Kappa iguais a 0,27 e 0,37 e PAG igual a 45% e 53% respectivamente. As imagens do H2 mostraram classificação ruim (PAG = 35% e Kappa = 0,11).

De acordo com Adami et al. (2002), pode-se dizer que para o H1 a classificação das imagens foi considerada razoável em 6 (seis) casos e ruim em 7 (sete) casos. Para o H2 todas as combinações de índices avaliados apresentaram classificação ruim. O H3 apresentou 8 (oito) casos classificados como razoável e 5 (cinco) classificados como ruim (Tabela 3.4.18).

Considerando os critérios estabelecidos por Adami et al. (2002), a classificação melhorou do estádio V4 (Tabela 3.4.18) para o estádio R1 (Tabela 3.4.19) para os híbridos cultivados no campo. Esses resultados concordaram com os obtidos por Baesso (2005) que, avaliando os índices espectrais das imagens como características para discriminar diferentes concentrações de N em folhas de feijoeiro, também observou melhora na classificação de imagens das folhas de plantas em estádio mais avançado em relação aos estádios anteriores avaliados.

As imagens de folhas de milho no estádio R1 submetidos a doses de N (Tabela 3.4.19) apresentaram uma classificação muito boa para o H1 e boa para o H3, com Kappa iguais a 0,60 e 0,53 respectivamente e classificação razoável para o H2. Observou-se pela PAG desses resultados, que 70% das janelas foram classificadas corretamente em H1, 53% das janelas foram classificadas corretamente em H2 e 65% foram classificados corretamente em H3.

Na Tabela 3.4.19, observa-se ainda que no H1 a classificação foi considerada muito boa em 1 (um) caso, boa em 1 caso, razoável em 8 (oito casos) e péssima em 3 (três) casos. No H2, foi razoável em 4 (quatro), ruim em 7 (sete) casos e péssima em 2 (dois) casos. Para o H3, a classificação foi considerada boa para 9 (nove) casos e razoável em 4 (quatro).

Pode ser observado também na Tabela 3.4.19, que os índices “Evd”, “Vn” no H1 e H2 e a combinação “Evd e Vn” no H1 apresentaram Kappa negativo, indicando que a classificação por esses índices foi pior do que a aleatória.

Tabela 3.4.18. Porcentagem de acerto global (PAG) e índice Kappa para cada combinação de índices espectrais utilizados como vetor de características da folha indicativa de 3 híbridos de milho no estágio V4 submetidos a doses de N na adubação no campo.

H1			H2			H3		
Índices espectrais	PAG	Kappa	Índices espectrais	PAG	Kappa	Índices espectrais	PAG	Kappa
Rvv	45	0,27	Evd	35	0,11	Rvv	53	0,37
Evd, Vern, Vn e Rvv	45	0,27	Vn	35	0,11	Vern, Vn e Rvv	50	0,33
Evd, Vern e Vn	43	0,23	Evd e Vern	28	0,01	Evd, Vern, Vn e Rvv	45	0,27
Vern, Vn e Rvv	43	0,23	Evd e Rvv	28	0,01	Evd e Vern	43	0,23
Evd e Rvv	40	0,20	Vern e Vn	28	0,01	Evd e Rvv	43	0,23
Vn e Rvv	40	0,20	Vern e Rvv	28	0,01	Vern e Vn	43	0,23
Vern e Rvv	38	0,17	Vn e Rvv	28	0,01	Vern e Rvv	43	0,23
Evd	35	0,13	Evd e Vn	28	0,01	Vn e Rvv	43	0,23
Vern	35	0,13	Vern	20	0,00	Evd, Vern e Vn	35	0,13
Vn	35	0,13	Rvv	20	0,00	Evd	30	0,07
Evd e Vern	35	0,13	Evd, Vern e Vn	23	0,00	Vn	30	0,07
Evd e Vn	35	0,13	Vern, Vn e Rvv	25	0,00	Evd e Vn	28	0,03
Vern e Vn	35	0,13	Evd, Vern, Vn e Rvv	25	0,00	Vern	20	0,00

Tabela 3.4.19. Porcentagem de acerto global (PAG) e índice Kappa para cada combinação de índices espectrais utilizados como vetor de características da folha indicativa de 3 híbridos de milho no estágio R1 submetidos a doses de N na adubação no campo.

H1			H2			H3		
Índices espectrais	PAG	Kappa	Índices espectrais	PAG	Kappa	Índices espectrais	PAG	Kappa
Vern, Vn e Rvv	70	0,60	Vern, Vn e Rvv	53	0,37	Evd e Vern	65	0,53
Evd, Vern, Vn e Rvv	58	0,43	Rvv	50	0,33	Evd e Rvv	65	0,53
Evd e Vern	53	0,37	Vern	43	0,23	Vern e Vn	65	0,53
Evd e Rvv	53	0,37	Evd, Vern e Vn	43	0,23	Vn e Rvv	65	0,53
Vern e Vn	53	0,37	Evd e Vern	38	0,17	Vern e Rvv	63	0,50
Vern e Rvv	53	0,37	Evd e Rvv	38	0,17	Evd, Vern e Vn	63	0,50
Vn e Rvv	53	0,37	Vern e Rvv	38	0,17	Vern, Vn e Rvv	60	0,47
Evd, Vern e Vn	50	0,33	Vn e Rvv	38	0,17	Evd, Vern, Vn e Rvv	58	0,43
Vern	45	0,27	Evd e Vn	35	0,13	Vern	55	0,40
Rvv	43	0,23	Vern e Vn	35	0,13	Evd	48	0,30
Evd	23	-0,03	Evd, Vern, Vn e Rvv	35	0,13	Vn	48	0,30
Vn	23	-0,03	Evd	20	-0,07	Rvv	40	0,20
Evd e Vn	20	-0,07	Vn	20	-0,07	Evd e Vn	40	0,20

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

Nas Tabelas 3.4.20 e 3.4.21, estão apresentadas as matrizes de confusão, utilizando a maior classificação do PAG e Kappa, dos híbridos de milho no estádio V4 e R1, respectivamente, cultivados no campo.

Tabela 3.4.20. Matriz de confusão obtida a partir da combinação de índices espectrais que apresentaram a melhor classificação das imagens da folha indicativa de 3 híbridos de milho no estádio V4 submetidos a doses de N na adubação no campo.

	H1					H2					H3				
	D1	D2	D3	D4	EO (%)	D1	D2	D3	D4	EO (%)	D1	D2	D3	D4	EO (%)
D1	1	6	2	1	90	1	0	7	4	92	8	0	2	0	20
D2	4	6	0	0	40	3	0	3	4	100	0	8	1	1	20
D3	0	3	3	4	70	2	0	7	1	30	4	3	1	2	90
D4	1	0	1	8	20	1	1	2	6	40	1	5	0	4	60
EI (%)	83	60	50	38		86	100	63	60		38	50	75	43	

Obtidas através das combinações “Rvv” e “Evd, Vern, Vn e Rvv” para H1; “Evd” para H2 e “Rvv” para H3. EO= erro de omissão e EI = erro de inclusão.

No estádio V4 (Tabela 3.4.20), pode-se observar que a maior dificuldade de classificação no H1 foi para as doses 0 e 140 kg ha⁻¹ de N (D1 e D3 respectivamente). Na D1, 90% das janelas analisados foram classificados em uma classe incorreta (EO = 90%) e na D3 o erro de omissão foi de 70%, ou seja, 70% das janelas analisadas foram classificados em uma classe a qual ela não pertencia. Para o H2, as 2 (duas) classes de plantas com omissão de nutrientes (0 e 70 kg ha⁻¹ de N) foram as mais difíceis de serem classificadas; tanto que 92% e 100% das janelas de folhas dos híbridos com 0 e 70 kg ha⁻¹ de N, respectivamente, foram classificadas incorretamente. Para o H3, foi a dose de 140 kg ha⁻¹ de N (D3) que apresentou maior dificuldade de classificação (EO = 90%).

Tabela 3.4.21. Matriz de confusão obtida a partir da combinação de índices espectrais que apresentaram a melhor classificação das imagens da folha indicativa de 3 híbridos de milho no estádio R1 submetidos a doses de N na adubação no campo.

	H1					H2					H3				
	D1	D2	D3	D4	EO (%)	D1	D2	D3	D4	EO (%)	D1	D2	D3	D4	EO (%)
D1	7	2	1	0	30	6	4	0	0	40	6	3	1	0	40
D2	2	8	0	0	20	5	4	1	0	60	1	6	1	2	40
D3	0	1	6	3	40	0	2	5	3	50	1	2	6	1	40
D4	0	0	3	7	30	0	1	3	6	40	0	2	0	8	20
EI (%)	22	27	40	30		45	64	44	33		25	54	25	27	

Obtidas através das combinações “Vern , Vn e Rvv” para H1; “Vern , Vn e Rvv” para H2 e “Evd e Vern”, “Evd e Rvv”, “Vern e Vn” e “Vn e Rvv” para H3. EO= erro de omissão e EI = erro de inclusão.

No estádio R1 (Tabela 3.4.21), observou-se que, para o H1, a classe com maior dificuldade de ser classificada foi a D3 (140 kg ha⁻¹ de N), que apresentou EO igual a 40%. Para o H2 foi a D2 (70 kg ha⁻¹ de N) a classe mais difícil de ser classificada, e para o H3 as

classes com maior dificuldade de classificação foram a D1, D2 e D3, apresentando EO igual a 40%, ou seja, 40% das janelas analisados foram classificados em uma classe incorreta.

Potássio

A porcentagem de acerto global (PAG) e o coeficiente Kappa dos classificadores desenvolvidos para a FI de plantas de milho no estágio V4 e R1, cultivadas com doses de K_2O no campo, estão apresentados nas Tabelas 3.4.22 e 3.4.23 respectivamente.

As janelas de folhas de milho no estágio V4 submetidos a doses de K_2O na adubação apresentaram uma classificação boa para H1, muito boa para H2 e razoável para o H3, com PAG e Kappa iguais a 63% e 0,50; 73% e 0,63; 45% e 0,27, respectivamente.

Para os híbridos no estágio V4, a classificação, de acordo com Adami et al. (2002), foi considerada boa em 5 (cinco) casos, razoável em 7 (sete) e ruim em 1 (um). Para o H2, a classificação foi considerada muito boa em 1 (um) caso, boa em 7 (sete), razoável em 2 (dois) e ruim em 3 (três) casos. E para o H3, a classificação foi considerada razoável em 6 (seis) casos e ruim em 7 (sete).

No estágio R1, as imagens de folhas de milho submetidos a doses de K_2O na adubação (Tabela 3.4.23) apresentaram uma classificação boa para H1 e H3, com Kappa igual a 0,50 e 0,57 respectivamente; e muito boa para o H2 (Kappa = 0,77). Observou-se pela PAG desses resultados, que 63%, 73% e 45% das janelas foram classificadas corretamente em H1, H2 e H3 respectivamente.

Considerando os critérios estabelecidos por Adami et al. (2002), a classificação melhorou no estágio R1 (Tabela 3.4.23) quando comparado ao V4 (Tabela 3.4.9) para H2 e H3 cultivados no campo. Esses resultados concordam com os obtidos por Baesso (2005).

Observou-se na Tabela 3.4.23, que para os híbridos estudados no estágio R1, de acordo com Adami et al. (2002), a classificação foi considerada boa em 9 (nove) casos, razoável em 1 (um) caso e ruim em 3 (três) para o H1. Para o H2, a classificação foi considerada muito boa em 7 (sete) casos, boa em 3 (três) e razoável em outros 3 casos. E para o H3, houve 3 (três) classificações como boa e 10 (dez) como razoável.

Observou-se ainda, que os índices “Evd” e “Vn” para o H1 no estágio R1 apresentaram Kappa iguais a zero (Tabela 3.4.23), indicando que a classificação foi igual a uma classificação aleatória.

Tabela 3.4.22. Porcentagem de acerto global (PAG) e índice Kappa para cada combinação de índices espectrais utilizados como vetor de características da folha indicativa de 3 híbridos de milho no estágio V4 submetidos a doses de K na adubação no campo.

H1			H2			H3		
Índices espectrais	PAG	Kappa	Índices espectrais	PAG	Kappa	Índices espectrais	PAG	Kappa
Vern e Vn	63	0,50	Vern, Vn e Rvv	73	0,63	Evd, Vern e Vn	45	0,27
Vn e Rvv	63	0,50	Evd e Vern	65	0,53	Evd, Vern, Vn e Rvv	43	0,23
Evd e Vern	60	0,47	Evd e Rvv	65	0,53	Evd	40	0,20
Evd e Rvv	60	0,47	Vern e Vn	65	0,53	Vn	40	0,20
Vern e Rvv	60	0,47	Vn e Rvv	65	0,53	Evd e Vn	40	0,20
Evd, Vern e Vn	53	0,37	Vern e Rvv	63	0,50	Vern, Vn e Rvv	40	0,20
Vern, Vn e Rvv	53	0,37	Evd, Vern, Vn e Rvv	60	0,47	Rvv	33	0,10
Evd	50	0,33	Rvv	58	0,43	Evd e Vern	33	0,10
Evd, Vern, Vn e Rvv	50	0,33	Vern	53	0,37	Evd e Rvv	33	0,10
Vn	48	0,30	Evd, Vern e Vn	53	0,37	Vern e Vn	33	0,10
Vern	40	0,20	Evd	38	0,17	Vern e Rvv	33	0,10
Evd e Vn	40	0,20	Vn	38	0,17	Vn e Rvv	33	0,10
Rvv	30	0,07	Evd e Vn	28	0,03	Vern	30	0,07

Tabela 3.4.23. Porcentagem de acerto global (PAG) e índice Kappa para cada combinação de índices espectrais utilizados como vetor de características da folha indicativa de 3 híbridos de milho no estágio R1 submetidos a doses de K na adubação no campo.

H1			H2			H3		
Índices espectrais	PAG	Kappa	Índices espectrais	PAG	Kappa	Índices espectrais	PAG	Kappa
Evd e Vern	63	0,50	Evd e Rvv	83	0,77	Rvv	68	0,57
Vern e Vn	63	0,50	Vn e Rvv	83	0,77	Evd, Vern e Vn	58	0,43
Vern e Rvv	63	0,50	Evd, Vern e Vn	83	0,77	Evd, Vern, Vn e Rvv	58	0,43
Evd e Rvv	60	0,47	Evd e Vern	80	0,73	Evd e Rvv	53	0,37
Vn e Rvv	60	0,47	Vern e Vn	80	0,73	Vern e Rvv	53	0,37
Evd, Vern e Vn	60	0,47	Vern e Rvv	80	0,73	Vn e Rvv	53	0,37
Rvv	58	0,43	Vern, Vn e Rvv	75	0,67	Vern, Vn e Rvv	53	0,37
Vern	55	0,40	Vern	63	0,50	Vern	50	0,33
Vern, Vn e Rvv	55	0,40	Evd, Vern, Vn e Rvv	63	0,50	Evd e Vern	50	0,33
Evd, Vern, Vn e Rvv	43	0,23	Rvv	60	0,47	Vern e Vn	50	0,33
Evd e Vn	28	0,03	Evd	50	0,33	Evd e Vn	45	0,27
Evd	25	0,00	Vn	50	0,33	Evd	43	0,23
Vn	25	0,00	Evd e Vn	48	0,30	Vn	43	0,23

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

Nas Tabelas 3.4.24 e 3.4.25, estão apresentadas as matrizes de confusão, utilizando a maior classificação do PAG e Kappa, dos híbridos de milho no estádio V4 e R1, respectivamente, conduzidos com doses de K₂O na adubação conduzidos no campo.

Tabela 3.4.24. Matriz de confusão obtida a partir da combinação de índices espectrais que apresentaram a melhor classificação das imagens da folha indicativa de 3 híbridos de milho no estádio V4 submetidos a doses de K₂O na adubação no campo.

	H1					H2					H3				
	D1	D2	D3	D4	EO (%)	D1	D2	D3	D4	EO (%)	D1	D2	D3	D4	EO (%)
D1	5	1	1	3	50	7	1	1	1	30	4	4	0	2	60
D2	1	7	1	1	30	0	9	0	1	10	3	4	0	3	60
D3	0	2	8	0	20	0	0	9	1	10	0	3	7	0	30
D4	2	2	1	5	50	2	1	3	4	60	3	3	1	3	70
EI (%)	38	42	27	44		22	18	31	43		60	71	13	63	

Obtidas através das combinações “Vern e Vn” e “Vn e Rvv” para H1; “Vern , Vn e Rvv” para H2 e “Evd, Vern e Vn” e “Vn e Rvv” para H3. EO= erro de omissão e EI = erro de inclusão.

Tabela 3.4.25. Matriz de confusão obtida a partir da combinação de índices espectrais que apresentaram a melhor classificação das imagens da folha indicativa de 3 híbridos de milho no estádio R1 submetidos a doses de K na adubação no campo.

	H1					H2					H3				
	D1	D2	D3	D4	EO (%)	D1	D2	D3	D4	EO (%)	D1	D2	D3	D4	EO (%)
D1	8	2	0	0	20	10	0	0	0	0	6	4	0	0	40
D2	3	6	0	1	40	0	9	0	1	10	4	6	0	0	40
D3	0	0	6	4	40	0	1	6	3	40	0	0	7	3	30
D4	0	2	3	5	50	0	1	1	8	20	1	0	1	8	20
EI (%)	27	40	33	50		0	18	14	33		45	40	13	27	

Obtidas através das combinações “Evd e Vern”, “Vern e Vn” e “Vn e Rvv” para H1; “Evd e Rvv”, “Vn e Rvv” e “Evd, Vern e Vn ”para H2 e “Rvv” para H3. EO= erro de omissão e EI = erro de inclusão.

No estádio V4 (Tabela 3.4.24), pode-se observar que a maior dificuldade de classificação no H1 e H2 foi encontrada nas doses 0 e 260 kg ha⁻¹ de K₂O (D1 e D4 respectivamente). Em H1, 50% das janelas analisadas foram classificadas em uma classe incorreta (EO = 50%) e em H2 o erro de omissão foi de 30 e 60% nessas classes. Já no H3 a maior dificuldade de classificação foi na dose 260 kg ha⁻¹ de K₂O (D4), apresentando EO = 70%.

No estádio R1 (Tabela 3.4.25), observou-se que a classe com maior dificuldade de classificação foi a D4 no H1 (EO = 50%), D3 no H2 (EO = 40%) e D1 e D2 no H3 (EO = 40%).

No estádio R1, pelas matrizes de confusão apresentadas, foi importante ressaltar que a maior parte dos erros de classificação ocorreram entre as classes imediatamente superiores ou inferiores à classe corretamente pertencente em todos os híbridos.

3.5. Conclusões

Os sintomas de deficiência ou de excesso de N ou K podem ser identificados pelas metodologias de análise de imagens digitais estudadas.

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

O método baseado na textura de imagens que apresenta o melhor desempenho foi o Fourier, para todos os híbridos e nos estádios V4 e R1, exceto para H3 no R1 em casa de vegetação.

A manifestação dos sintomas de deficiência nutricional para N e K foi distinta para os híbridos.

A metodologia de extração teve melhor desempenho quando estudada níveis de N ou K isoladamente para cada híbrido, reduzindo a taxa de acertos quando analisou níveis e híbridos conjuntamente.

Nas doses dentro de cada híbrido, os acertos são superiores aos da classificação considerando as doses independentemente do híbrido, indicando diferenças entre os híbridos. No campo, existe boa porcentagem de acertos quando os híbridos são estudados individualmente, entretanto quando estudada a abordagem 2, esse acerto diminui muito.

Independentemente dos métodos de análise, os melhores resultados são encontrados no estádio R1.

A identificação do estado nutricional para N ou K dos híbridos através das duas metodologias foi superior para as condições de casa de vegetação.

Sugere-se a realização de novos estudos visando aperfeiçoar as metodologias, baseados na textura de imagens e em índices espectrais, para a identificação das imagens no campo.

4. ADUBAÇÃO NITROGENADA E POTÁSSICA NA FERTILIDADE DO SOLO, NUTRIÇÃO E PRODUTIVIDADE DE HÍBRIDOS DE MILHO.

RESUMO – O milho (*Zea mays* L.) é uma cultura que apresenta grande potencial de crescimento produtivo e é uma das culturas mais exigentes em fertilizantes. O nitrogênio (N) é um dos elementos mais absorvidos pela cultura, e muitas vezes não é suprido adequadamente nas adubações. O potássio (K) é o segundo macronutriente em teor contido nas plantas, atrás apenas do requerimento em N. A melhoria na eficiência de utilização de fertilizantes tem um grande potencial para melhorar a produtividade global da produção de milho. O objetivo deste trabalho foi verificar a fertilidade do solo, a nutrição mineral e a produtividade de híbridos de milho (*Zea mays* L.), cultivados no campo com doses crescentes de nitrogênio (N) ou de potássio (K), bem como verificar a eficiência agrônômica de tais nutrientes. O trabalho foi realizado em Neossolo Quartzarênico. Os tratamentos foram 3 híbridos de milho: DKB390PróR2, Pioneer 30F35 e Syngenta Status e 4 doses de N: 0, 70, 140 e 280 kg ha⁻¹, ou 4 doses de K: 0, 65, 130 e 260 kg ha⁻¹ de K₂O, equivalente a respectivamente 0, 50, 100 e 200% da dose recomendada, com 4 repetições. Em V4 e R1, foi avaliada a sintomatologia visual das plantas, a concentração foliar de macro e micronutrientes. No final do ciclo, avaliou-se produtividade do milho e fertilidade do solo, nas camadas 0,0-0,1m e 0,1-0,2 m e em duas posições (linha e entrelinha da cultura), bem como a eficiência de uso de N (EUN), eficiência de recuperação de N (ERN) e eficiência interna de N (EIN) dos três híbridos estudados. O incremento de adubação nitrogenada promoveu respostas significativas na concentração foliar de N e na produtividade. Os teores de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) do solo variaram significativamente com o aumento das doses de N. Todos os parâmetros de fertilidade avaliados variaram significativamente com as camadas, entretanto somente matéria orgânica, P e K variaram significativamente com a posição de amostragem (linha e entrelinha). A maior EUN do estudo foi observada em H2, com 15.5 kg de grãos kg⁻¹ de N aplicado. O K foliar também aumentou significativamente com o incremento de adubação potássica, ajustando-se ao modelo quadrático em todos os híbridos. O aumento de K₂O na adubação promoveu variação significativa ($p < 0.01$) de K no solo. Houve diferença significativa de K no solo entre as camadas estudadas e também na posição de amostragem (linha e entrelinha), porém a interação entre elas não foi significativa. O K no solo na posição da linha ascendeu de acordo com modelo quadrático para as doses estudadas. O pH, a V% e o Mg do solo não variaram significativamente ($p < 0.01$) com o incremento de K₂O no solo e nem com a posição de amostragem, entretanto variaram significativamente entre as camadas avaliadas. A adição de fertilizante potássico na adubação promoveu aumentos significativos ($p < 0.01$) na produtividade dos híbridos de milho que responderam segundo modelo quadrático para H1 e linear para H2 e H3 e, de acordo com a equação de regressão, a produtividade máxima de H1 foi de 6080 kg ha⁻¹ na dose de 148.7 kg ha⁻¹ de K₂O. O rendimento dos híbridos de milho aumentou com o aumento de adubação potássica segundo modelos quadráticos. A aplicação crescente de adubação nitrogenada altera os teores de P, K, Ca e Mg do solo. Em todos os híbridos estudados, a aplicação de N promove aumentos na concentração foliar de N, implicando em respostas quadráticas na produtividade de grãos. O incremento de K₂O na adubação contribui para aumentar a concentração de K no solo e K na planta, além de promover aumento significativo de produtividade do milho em todos os híbridos.

Palavras-chaves: macronutrientes, *Zea mays* L.; deficiência nutricional, eficiência agrônômica.

4.1. Introdução

O milho é uma das culturas mais importantes da produção mundial de cereais (Peng et al., 2013) e passou de uma produção mundial de 820 milhões de toneladas em 2009 (FAO, 2012) para 1,02 bilhões de toneladas em 2013 (FAO, 2015).

No cenário mundial, o Brasil situa-se como o terceiro maior produtor de milho, sendo superado apenas pelos Estados Unidos e pela China. Apesar do alto potencial produtivo desta cultura, evidenciado por produtividades de grãos de até 11 t ha⁻¹ alcançadas em condições experimentais por Malvestiti (2013), a produtividade média no Brasil é de apenas 5,2 t ha⁻¹, abaixo de 10,0 e 6,0 t ha⁻¹, obtidas nos Estados Unidos e na China, principais produtores desta cultura respectivamente (FAO, 2015).

De acordo com Chen et al. (2011), o aumento na produção de milho é necessário para atender às demandas de alimentação animal e de biocombustíveis, já que o milho é insumo para produção de centenas de produtos, bem como na cadeia produtiva de suínos e aves, onde são consumidos aproximadamente 70% do milho produzido no mundo e entre 70 e 80% do milho produzido no Brasil (EMBRAPA, 2014). De acordo com Alvarez et al. (2006), ele é muito utilizado como concentrado para alimentação de animais, e a demanda por proteína de origem animal cresceu significativamente na última década, o que consequentemente aumentou a procura por este cereal. Além disso, os Estados Unidos (EUA) adotaram um programa de utilização do etanol como combustível produzido principalmente a partir do milho (Figueira, 2005).

Há, no entanto, um desafio global crescente de atender o aumento na demanda de alimentos, e a proteção da qualidade do meio ambiente, e este desafio deve ser cumprido, especialmente nos sistemas de produção de milho, arroz e trigo (Cassman et al., 2002). A dificuldade de atender esta crescente demanda e a forte perspectiva de expansão de mercados externos para o milho e seus derivados alertam a pesquisa para a necessidade de trabalhos que objetivem obter maior eficiência na atividade e maior competitividade no mercado.

Nos últimos anos a atividade agrícola tem sofrido profundas modificações em razão do aumento do custo de produção, com reflexos na rentabilidade da cultura, especialmente em grãos como o milho (Araújo et al., 2008). Em sistemas mais tecnificados, os gastos com correção do solo e adubação representam, em média, 40 a 45% do custo de produção (Coelho e Alves, 2003). A adubação é reconhecidamente o fator que mais afeta a produtividade e a sustentabilidade da atividade, de modo que o consumo de fertilizante pela cultura do milho

tem crescido acentuadamente nos últimos anos no Brasil, em função do aumento por unidade de área (Araújo et al., 2008).

As limitações ambientais para a agricultura requerem que o manejo da adubação seja ajustado às exigências das culturas determinadas pelo rendimento esperado (Lemaire, et al., 2008). Para o estabelecimento de um programa apropriado de adubação é necessário identificar os principais problemas inerentes à nutrição da planta e, posteriormente, determinar quais os nutrientes são limitantes, suas quantidades, épocas e formas de aplicação corretas (Martinez et al., 2003).

O potássio (K) é um importante macronutriente para as plantas que, com o nitrogênio (N) e o fósforo (P), desempenha um papel importante no desenvolvimento da planta (Marschner, 1995). É o cátion mais importante e abundante em células de plantas vivas e desempenha um papel crucial em muitos processos fisiológicos fundamentais para as plantas, incluindo a fotossíntese, transporte e translocação de produtos de assimilação. Consequentemente, afeta o crescimento e desenvolvimento das plantas (Wang e Wu, 2013). O K tem uma ampla gama de funções na nutrição de plantas, incluindo a manutenção de gradientes de potencial elétrico através da membrana celular, a geração de turgescência, e a ativação de numerosas enzimas. É também essencial para a síntese de proteínas e regulação do movimento dos estômatos (Marschner, 1995). De acordo com Malavolta (2006), o K é ativador enzimático, aumenta o teor de carboidratos, estimula o enchimento de grãos, promove o armazenamento de açúcar e amido, aumenta a utilização da água bem como promove o aumento da resistência a secas, geadas e pragas.

Alcançar e manter a produção de alimentos requer também uma estratégia de gestão racional de K com base em melhor compreensão da relação entre o rendimento da cultura e a taxa de aplicação de K na adubação (Wu et al., 2013).

O nitrogênio (N) é um dos elementos mais absorvidos pelas gramíneas e muitas vezes não é suprido adequadamente (Foloni et al., 2009). Ele apresenta-se em quantidades insuficientes na quase totalidade dos solos, estando predominantemente ligado aos compostos orgânicos (EMBRAPA, 1996) e a disponibilidade deste nutriente geralmente limita a produtividade das plantas (Epstein e Bloom, 2006).

Lemaire et al. (2008) afirmaram que, em sistemas de cultivo, as práticas de adubação nitrogenada podem fornecer uma quantidade suficiente de N para que as plantas atinjam o potencial de rendimento permitido pelas condições climáticas reais. Entretanto, para garantir que esse potencial de rendimento seja alcançado, muitas vezes os produtores aplicam quantidades de fertilizantes maiores do que a quantidade estritamente necessária para alcançar

o rendimento máximo. Outra incerteza levando os agricultores a aplicarem uma quantidade muito grande de N é que não existe ainda um método de análise para medir a disponibilidade de N no solo e que possa ser utilizado em laboratórios de rotina devido à dinâmica desse elemento (Raij, 1991). A dificuldade na obtenção desse método está, em grande parte, ligada às transformações do N no solo, as quais são influenciadas pelas condições ambientais (EMBRAPA, 1996). Desta forma, a definição da dose utilizada na adubação nitrogenada na cultura do milho no Brasil é baseada na expectativa de produtividade, no histórico da área e no tipo de solo (Raij e Cantarella, 1996).

A economia de N da cultura é um fator crítico na produção de grãos, e sua importância se reflete em um grande esforço de pesquisa. Daí a necessidade de quantificar a absorção de N pela cultura, a eficiência de uso de N e de seus componentes, bem como a concentração de N na cultura e suas partes (Sadras e Lemaire, 2014).

O aumento da produtividade agrícola e a diminuição dos custos produtivos passaram a ser fundamentais após a globalização da economia. Estes dois objetivos podem ser conciliados pela combinação do potencial genético das plantas com o uso eficiente dos nutrientes (Horn et al., 2006).

A aplicação de fertilizantes tem sido uma das responsáveis pelo aumento na produtividade da cultura. No entanto, a eficiência de utilização de nutrientes é baixa em todo o mundo (Moll et al., 1982). São poucos os relatos na literatura a respeito da demanda de nutrientes para os diversos híbridos de milho utilizados na atualidade necessitando de estudos. Sistemas de recomendação de fertilizantes (como uma variedade ou híbrido recém-criados) devem ser investigados em ensaios de campo (Fodor et al., 2013).

O estabelecimento de práticas de manejo que aperfeiçoem as práticas de aplicação de fertilizantes pode contribuir para aumentar a produtividade nas lavouras e reduzir o custo produtivo. (Pauletti, 1998; Foloni et al., 2009). Nos últimos anos, a busca por uma agricultura com menor consumo energético e ecologicamente sustentável tem estimulado a pesquisa a identificar mecanismos responsáveis pela maior eficiência nutricional (Tomaz et al., 2003).

4.2. Objetivos

O objetivo deste trabalho foi verificar a fertilidade do solo, a nutrição mineral e a produtividade de híbridos de milho (*Zea mays* L.), cultivados no campo com doses crescentes de nitrogênio (N) ou de potássio (K), bem como verificar a eficiência agrônômica de tais nutrientes.

4.3. Material e Métodos

4.3.1. Localização do experimento e cultura estudada

A cultura estudada foi o milho (*Zea mays* L.), conduzido a campo na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP), campus de Pirassununga/SP, em solo de baixa disponibilidade de N e K, em área de produção com condições de cultivo comercial.

4.3.2. Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido no campo 120 da FZEA/USP, em área de baixa fertilidade, em um Neossolo Quartzarênico (RT) classificado de acordo com a EMBRAPA (2013), temperatura média igual a 21,6 °C e precipitação acumulada do período experimental de 896,4mm. Os dados meteorológicos de precipitação e temperatura média do período experimental estão apresentados na Figura 4.3.1.

Figura 4.3.1. Precipitação (mm) e temperatura média (°C) descendias no período de janeiro a junho de 2012, obtidos na estação meteorológica da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP).

As características químicas do solo da área experimental estão na Tabela 4.3.1.

Tabela 4.3.1. Análise química do solo da área experimental na camada 0,0 a 0,20m.

pH	P (res) mg/dm ³	S	K	Ca	Mg	Al	H+Al	M.O	SB	CTC	V	m	B	Cu	Fe	Mn	Zn
								g/kg	mmolc/dm ³		%						
5,1	6	6	0,4	12	7	1	22	21	19	41	47	3	0,4	4,6	6	7,6	0,8

O solo apresentava 86,0 e 90,0 g kg⁻¹ de argila e 888 e 877 g kg⁻¹ de areia respectivamente nas camadas de 0-0,2m e 0,2-0,4m.

No mês de novembro de 2011, foi aplicado 1,5 toneladas por hectares (t ha⁻¹) de calcário (CaO=35,5%; MgO=10% e PRNT=65%) para elevação da saturação por bases (V) a 70%, conforme recomendação de Raij e Cantarella (1996) para a cultura do milho. Anteriormente à semeadura, foi feita a dessecação da área utilizando a associação de 2,4D/glyphosate.

4.3.3. Delineamento experimental

O delineamento experimental foi em blocos casualizados (DBC) em esquema fatorial 4x3 (quatro doses de nutrientes e três híbridos de milho), em 4 (quatro) blocos, totalizando 48 parcelas por experimento. Cada parcela apresentava 6 (seis) linhas de 6 metros (m) cada linha e espaçamento de 0,8m nas entrelinhas, resultando numa área útil de 28,8m² por parcela.

Os experimentos no campo foram independentes para cada elemento, desta forma, cada experimento foi constituído pela omissão *individual* de N e K nas parcelas.

Os tratamentos constaram de 3 (três) híbridos de milho: DKB390 Prór2® (H1), Pioneer 30F35® (H2) e Syngenta Status® (H3) e 4 (quatro) doses de adubação: D1 = omissão completa do elemento, D2 = 50% da dose recomendada, D3 = 100% da dose recomendada (dose completa) e D4 = 200% da dose recomendada (dose excedente). Essas doses de nutrientes corresponderam respectivamente a 0, 70, 140 e 280 kg ha⁻¹ de N (no experimento com doses de N) e 0, 65, 130 e 260 kg ha⁻¹ de K₂O (no experimento com doses de K). Os demais macronutrientes foram aplicados nas concentrações recomendadas, conforme apresentado na Tabela 4.3.2, além de 2 kg ha⁻¹ Zn no plantio.

Tabela 4.3.2. Quantidade de nutrientes (N, P₂O₅ e K₂O), em kg ha⁻¹, aplicados na semeadura e na cobertura de híbridos de milho conduzidos com doses de N ou de K na adubação.

		Doses de N (kg ha ⁻¹)				Doses de K (kg ha ⁻¹)			
		D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4
Semeadura	N	0	15	30	60	30	30	30	30
	P ₂ O ₅	100	100	100	100	100	100	100	100
	K ₂ O	50	50	50	50	0	25	50	100
Cobertura	N	0	55	110	220	110	110	110	110
	K ₂ O	80	80	80	80	0	40	80	160

As adubações de semeadura e cobertura para cada nutriente foram estabelecidas com base na análise inicial do solo e de acordo com a recomendação de Raij e Cantarella (1996) para a cultura do milho para uma produtividade esperada de 10-12 toneladas por hectare. As

fontes de nutrientes utilizadas foram uréia protegida (45% de N), cloreto de potássio – KCl (60% de K₂O) e superfosfato simples (18% de P₂O₅).

Em 06 de fevereiro de 2012, o milho foi semeado manualmente com auxílio de régua (6 sementes/metro), dispostos no campo conforme croqui da Figura 4.3.2.

Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3	Bloco 4
H2D1	H1H1	H1D3	H1D2
H2D3	H3D1	H2D1	H1D3
H3D4	H2D3	H1D4	H3D2
H2D4	H3D2	H3D1	H3D4
H1D1	H3D4	H3D2	H2D2
H3D3	H2D4	H2D4	H1D1
H1D4	H2D1	H2D2	H3D3
H1D3	H3D3	H3D4	H1D4
H1D2	H2D2	H3D3	H2D2
H3D1	H1D3	H1D2	H2D1
H3D2	H1D4	H1D1	H3D1
H2D2	H1D2	H1D2	H1D2

Figura 4.3.2. Croqui da disposição dos tratamentos na área experimental (para os experimentos com doses de N ou K).

A adubação de cobertura foi realizada 30 dias após a semeadura do milho (estádio V4), manualmente em superfície ao lado da linha de semeadura utilizando uréia protegida e KCl, levemente incorporados ao solo para evitar possíveis perdas de N por volatilização.

Na Figura 4.3.3, pode-se observar as plantas de milho 40 dias após a semeadura.

Figura 4.3.3. Vista geral do experimento de campo com doses de N (à esquerda) e K (à direita) aos 40 dias após a semeadura do milho.

4.3.4. Avaliações

a) Sintomas visuais e análise química foliar

Além da observação visual dos sintomas de deficiência de N ou K, foram coletadas amostras foliares para análise química. As amostras, num total de 6 subamostras por parcela, foram colhidas em 2 (dois) estádios: V4 (antes da adubação de cobertura) e R1. Foi coletada a *folha indicativa do estágio* (FI) de desenvolvimento do milho (folha 4 e folha oposta e abaixo da espiga, respectivamente em V4 e em R1). As folhas foram lavadas com água deionizada, levadas à estufa de circulação forçada, a 65°C até peso constante e moídas, em moinho tipo Wiley. Na última coleta (R1), foram separados o terço médio das folhas e retiradas as nervuras para determinação da concentração de macro e micronutrientes (Figura 4.3.4).

Figura 4.3.4. Folha coletada para análise química foliar (a) e vista superior do experimento de campo no estágio R1.

Todas as amostras moídas foram colocadas em sacos plásticos identificados e encaminhadas ao laboratório para determinação da concentração de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) na FI, segundo métodos descritos por Bataglia et al. (1983).

As amostras foram digeridas por via úmida com ácido sulfúrico para análise de N, e com ácido nítrico-perclórico para análise de P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn. A concentração de N foi determinada através de destilação de amônia em destilador, seguido de titulação. A concentração de P do material foi dado pelo método colorimétrico; a de K por fotometria de chama; a de S pelo método de turbidimetria e a concentração de Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn por espectrofotometria de absorção atômica.

As análises químicas foliares foram realizadas no Laboratório de Ciências Agrárias na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, da Universidade de São Paulo, Campus de Pirassununga/SP.

b) Produtividade de grãos

Ao final do ciclo da cultura, foi avaliada a produtividade do milho, coletando todas as espigas dentro de 2 linhas de plantas espaçadas 0,8 m e 4 m de comprimento, perfazendo área total de 6,4 m². Após a colheita, as espigas foram secas ao ar para posterior despalha e debulha. A produtividade de grãos dos híbridos de milho foi ajustada para 13% de umidade e posteriormente para produtividade em toneladas por hectare (t ha⁻¹).

c) Índices nutricionais de N

Em função dos resultados de produtividade de grãos e de concentração de N foliar, foram calculadas:

- Eficiência de uso de nitrogênio (EUN) em milho: definida como grãos produzidos por unidade de fertilizante nitrogenado aplicado (Ciampitti e Vyn, 2011), foi calculada como a razão entre o incremento no rendimento de grãos (Pr) fertilizado com 140 kg ha⁻¹ de N (fert) e não fertilizado – 0 kg ha⁻¹ de N (não fert) para a adubação nitrogenada aplicada (Cassman et al., 2003). A seguinte equação foi utilizada para o cálculo EUN:

$$EUN = \frac{(Pr_{fert} - Pr_{naofert})}{N_{aplicado}}$$

onde Pr_{fert} é o rendimento de grãos, em kg ha⁻¹, a 13% de umidade, de um tratamento que recebeu 140 kg ha⁻¹ de N, e $Pr_{naofert}$ é o rendimento de grãos que não recebeu N na adubação.

- Eficiência de recuperação de N (ERN): Seguindo o mesmo raciocínio do cálculo da EUN, a ERN foi calculada como:

$$ERN = \frac{(NF_{fert} - NF_{naofert})}{N_{aplicado}}$$

onde NF_{fert} é o de N foliar, em g kg⁻¹, das amostras de plantas adubadas com 140 kg ha⁻¹ de N, e $NF_{naofert}$ é o de N foliar correspondente das amostras de plantas que não receberam fertilizante nitrogenado.

- Eficiência interna de N (EIN): foi calculada como:

$$EIN = \frac{(Pr_{fert} - Pr_{naofert})}{(NF_{fert} - NF_{naofert})}$$

d) Índices nutricionais de K

Em função dos resultados de produtividade de grãos e de concentração de K foliar, foram calculadas:

- Eficiência de uso de potássio (EUK) em milho: calculada como a razão entre o incremento no rendimento de grãos (Pr) fertilizado com 130 ou 260 kg ha⁻¹ de K₂O (fert) e não fertilizado – 0 kg ha⁻¹ de K (não fert) para a adubação potássica aplicada (Cassman et al., 2003). A seguinte equação foi utilizada para o cálculo EUK:

$$EUK = \frac{(Pr_{fert} - Pr_{naofert})}{K_{2Oaplicado}}$$

onde *Pr_{fert}* é o rendimento de grãos, em kg ha⁻¹, a 13% de umidade. *Pr_{naofert}* é o rendimento de grãos que não recebeu K₂O na adubação. Para esse estudo, *Pr_{fert}* – *Pr_{naofert}* foram utilizados os doses de aplicação 0 e 130 kg ha⁻¹ de K₂O e 0 e 260 kg ha⁻¹ de K₂O.

- Eficiência de recuperação de K (ERK): Seguindo o mesmo raciocínio do cálculo da EUK, a ERK foi calculada como:

$$ERK = \frac{(KF_{fert} - KF_{naofert})}{K_{aplicado}}$$

onde *KF_{fert}* é o de K foliar, em g kg⁻¹, das amostras de plantas adubadas com 130 ou 260 kg ha⁻¹ de K₂O, e *KF_{naofert}* é o de K foliar correspondente das amostras de plantas que não receberam fertilizante potássico.

- Eficiência interna de K (EIK): foi calculada como:

$$EIK = \frac{(Pr_{fert} - Pr_{naofert})}{(KF_{fert} - KF_{naofert})}$$

e) Amostragem de solo

Após a colheita dos grãos, foi realizada amostragem de solo para avaliação da fertilidade de solo, conforme recomendações de Raij et al. (2001).

As amostras foram coletadas em zig zag em cada parcela experimental, nas camadas de a) 0,0-0,10 m e b) 0,10-0,20 m e em duas posições: a) *linha* e b) *entrelinha* da cultura, sendo cada amostra composta por 4 (quatro) subamostras (4 na linha e 4 na entrelinha).

As análises químicas das amostras de solo também foram realizadas no Laboratório de Ciências Agrárias na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, da Universidade de São Paulo, Campus de Pirassununga/SP.

4.3.5. Forma de análise dos resultados

O delineamento experimental foi em blocos casualizados em esquema fatorial 4x3 (quatro doses de nutrientes e três híbridos de milho), em quatro blocos. O modelo matemático indicado foi o seguinte:

$$Y_{ijk} = m + H_i + N_j + HN_{ij} + W_k + e_{ijk}$$

onde,

Y_{ijk} é o valor observado na parcela que recebeu os tratamentos ij que se encontram no bloco k ;

m é a média geral do experimento;

H_i é o efeito dos híbridos de milho;

N_j é o efeito das doses de nutrientes aplicados na parcela;

W_k é o efeito devido ao bloco k em que se encontra a parcela;

e_{ijk} é o efeito dos fatores não controlados na parcela que recebeu os tratamentos ij no bloco k .

Nos casos em que o teste F foi significativo somente para N_j , foi realizada uma única análise de regressão para todos os híbridos. Nos casos em que o teste F foi significativo para NH_{ij} , ou seja, se houve interação entre os híbridos estudados e as doses de nutrientes aplicadas, o desdobramento visou estudar as doses dentro do H_i . Neste caso, foram realizadas três análises de regressão, sendo uma para cada híbrido e foram avaliadas através da significância dos coeficientes de regressão.

4.4. Resultados e discussão

4.4.1. Nitrogênio

a) Sintomas de deficiência de N

Os sintomas visuais de deficiência de N em plantas de milho cultivadas no campo foram observados aos 30 dias após a semeadura (estádio V4), inicialmente nas folhas mais velhas das plantas que não receberam N na adubação (D1) (Figuras 4.4.1a e 4.4.1b). Foram caracterizados por clorose da ponta para a base da folha na forma de "V" invertido em direção à nervura central, seguida de necrose. Esses sintomas observados estão de acordo com os relatados por diversos trabalhos descritos na literatura (Romualdo et al., 2014; Epstein e Bloom, 2006; Malavolta, 2006; Havlin et al., 2005).

Figura 4.4.1. Sintomas de deficiência de N nas folhas mais velhas de plantas de milho cultivadas com omissão de N na adubação (a e b); estande do milho cultivado sem adubação nitrogenada (c) e com adubação completa – D3 (d) aos 30 dias após a semeadura (estádio V4).

De acordo com Raij (1991), o fato das folhas mais novas das plantas permanecerem verdes em condições de deficiência de N é um indicativo da mobilidade do nutriente nas plantas. As proteínas translocam-se das folhas deficientes e são reutilizadas nas folhas mais novas.

As plantas cultivadas com omissão completa de N na adubação (D1) apresentaram crescimento visualmente reduzido e estande menor quando comparado às plantas que receberam adubação completa de N (D3). Além disso, no estágio V4, as plantas com adubação completa apresentavam uma coloração verde mais intensa do que as plantas sem N na adubação (Figura 4.4.1c e 4.4.1d). Concordando com Malavolta (2006) e Bruns e Ebelhar (2006), que afirmam que a deficiência de N provoca redução da síntese de proteínas, afetando os processos de fotossíntese e respiração, com isso ocorre a redução no crescimento das plantas.

No estágio R1, foi verificado ainda senescência precoce das folhas mais velhas do milho (requeima do milho), além de amarelecimento generalizado das folhas das plantas com omissão completa de N na adubação (Figura 4.4.2).

Esse sintoma pode ser explicado pelo fato de o N ser um nutriente móvel na planta e que, quando o suprimento desse nutriente é insuficiente, esse se desloca das folhas e órgãos mais velhos para os mais novos. Consequentemente, os sintomas de deficiência aparecem inicialmente nas folhas mais velhas e, no milho, é conhecida como “requeima” das folhas baixas (Coelho et al., 2006).

Na Figura 4.4.2, pode-se observar ainda a FI no estágio R1, com coloração amarelada nas plantas com omissão total de N (Figura 4.4.2a) e um verde intenso nas plantas que receberam a o dobro da dose de N recomendada (Figura 4.4.2b) no mesmo estágio de desenvolvimento. Esse sintoma de amarelecimento foliar em plantas deficientes em N é muito relatado na literatura (Romualdo et al., 2014; Epstein e Bloom, 2006; Malavolta, 2006; Havlin et al., 2005) e é explicado pelo fato de o N ser também um elemento importante na estrutura da clorofila (Havlin et al., 2005).

Figura 4.4.2. Coloração da folha oposta e abaixo da espiga de plantas com omissão de N (a) e plantas com 200% da adubação nitrogenada (b); “requeima” das folhas velhas de plantas de milho com omissão de N na adubação (c) comparada às folhas mais velhas de plantas de milho com a adubação completa (d) em R1.

b) Análise química foliar

Na Tabela 4.4.1, estão apresentados as médias e o coeficiente de variação da concentração de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) na folha indicativa (FI) dos híbridos de milho no estágio V4 submetidos a doses de N no campo. Pelos resultados obtidos, constatou-se que a interação entre doses de N e híbridos de milho foi significativa ($p < 0,05$) na FI apenas para a concentração de N e S (Tabela 3.4.1).

Pode-se dizer, portanto, que para a concentração desses nutrientes, cada híbrido respondeu à aplicação de N na adubação de forma independente um do outro. Isso está de acordo com Uribe et al. (2009), que afirmavam existir diferenças genotípicas significativas na absorção de N e eficiência de utilização de N em híbridos de milho.

Tabela 4.4.1. Médias e coeficiente de variação (C.V) da concentração de macronutrientes na folha indicativa (FI) de três híbridos de milho no estágio V4 conduzidos com doses de N na adubação no campo.

N kg ha ⁻¹	Híbrido	N	P	K	S	Ca	Mg
g kg ⁻¹							
0	H1	16,4**	3,4 ^{ns}	21,0 ABa	1,9**	3,6 ^{ns}	2,4 ^{ns}
70		17,5**	2,8 ^{ns}	20,5 ABa	2,2**	4,4 ^{ns}	2,4 ^{ns}
140		20,4**	3,2 ^{ns}	21,5 ABa	1,7**	4,0 ^{ns}	2,5 ^{ns}
280		20,7**	3,0 ^{ns}	19,3 ABa	2,0**	4,2 ^{ns}	3,0 ^{ns}
0	H2	15,4**	3,0 ^{ns}	21,4 Aa	1,7**	4,3 ^{ns}	2,5 ^{ns}
70		18,1**	2,9 ^{ns}	20,9 Aa	2,2**	4,1 ^{ns}	2,5 ^{ns}
140		18,7**	2,7 ^{ns}	23,2 Aa	2,0**	4,4 ^{ns}	2,2 ^{ns}
280		18,5**	2,9 ^{ns}	20,3 Aa	2,2**	3,9 ^{ns}	2,3 ^{ns}
0	H3	16,7**	3,0 ^{ns}	19,1 Ba	2,0**	3,8 ^{ns}	2,3 ^{ns}
70		18,0**	3,2 ^{ns}	19,9 Ba	1,8**	4,4 ^{ns}	2,7 ^{ns}
140		19,9**	2,9 ^{ns}	20,1 Ba	1,7**	4,4 ^{ns}	2,8 ^{ns}
280		20,0**	3,0 ^{ns}	18,6 Ba	2,1**	4,3 ^{ns}	2,4 ^{ns}
C.V. (%)		6,1	13,4	8,1	12,4	10,7	10,4

Letras maiúsculas referem-se à comparação entre os híbridos numa mesma dosagem de N e as minúsculas comparam médias das dosagens de N dentro de um mesmo híbrido. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%. CV (%) = coeficiente de variação. **Diferença estatística significativa a 1% de probabilidade entre as dosagens de N ou interação entre dose de N e híbridos de milho. ^{ns} Diferença não significativa a 1% de probabilidade.

As concentrações de P, K, Ca e Mg em V4 não variaram significativamente ($p < 0,01$) dentro de cada híbrido com o aumento da adubação nitrogenada (Tabela 4.4.1). Entretanto, a resposta à adubação nitrogenada entre os híbridos foi significativamente diferente ($p < 0,05$) para as concentrações de K na FI (Tabela 4.4.1), que apresentou menor concentração no H3.

Na Figura 4.4.3, pode-se observar as médias e o coeficiente de variação da concentração de N e S na FI em V4 para as doses de adubação nitrogenada. Como era esperado, o incremento de N na adubação resultou em maior concentração de N foliar em V4, segundo modelos quadráticos, concordando com Romualdo et al. (2014), Izsáki (2009) e Bruns e Ebelhar (2006), que estudaram o efeito de doses de adubação nitrogenada na concentração de nutrientes e na produtividade do milho.

A regressão entre a concentração foliar de S em V4 e adubação de N foi não significativa ($p < 0,05$), apresentado uma concentração média igual a 2,0 g kg⁻¹ de S.

Figura 4.4.3. Concentração de N (a) e S (b) na folha indicativa de três híbridos de milho no estágio V4 em função da concentração de N na adubação. *Significativo a 5%.

Na Tabela 4.4.2, estão apresentados as médias e o coeficiente de variação da concentração de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) na FI dos híbridos de milho em R1, submetidos a doses de N no campo. Nota-se que apenas a concentração de Mg na FI não apresentou resposta significativa ($p < 0.05$) ao aumento de N na adubação. Para os demais macronutrientes essa resposta foi significativa (Tabela 4.4.2), sendo, portanto realizado o desdobramento para cada um deles em função das doses de N na adubação (Figura 4.4.4).

Tabela 4.4.2. Médias e coeficiente de variação (C.V) da concentração de macronutrientes na folha indicativa (FI) de três híbridos de milho no estágio R1 conduzidos a doses de N na adubação no campo.

N kg ha ⁻¹	Híbrido	N	P	K	S	Ca	Mg
g kg ⁻¹							
0	H1	24,1**	2,1**	22,9**	2,1**	4,3**	2,8 ^{ns}
70		26,2**	2,0**	25,1**	0,9**	4,9**	2,7 ^{ns}
140		27,0**	2,4**	20,0**	1,6**	4,9**	2,9 ^{ns}
280		34,8**	2,5**	19,4**	2,3**	6,9**	2,8 ^{ns}
0	H2	23,5**	1,9**	22,1**	0,3**	5,4**	2,4 ^{ns}
70		32,2**	2,2**	22,3**	0,8**	4,9**	2,9 ^{ns}
140		36,7**	2,0**	17,7**	2,3**	5,5**	2,9 ^{ns}
280		37,3**	2,4**	30,4**	2,1**	6,4**	2,5 ^{ns}
0	H3	23,3**	2,3**	19,4**	1,2**	4,7**	2,7 ^{ns}
70		41,0**	2,3**	24,2**	1,6**	4,0**	2,1 ^{ns}
140		43,1**	2,9**	18,1**	1,9**	4,2**	2,3 ^{ns}
280		40,6**	2,7**	22,6**	1,2**	4,4**	3,0 ^{ns}
C.V. (%)		3,7	10,5	14,1	18,3	10,8	15,1

Letras maiúsculas referem-se à comparação entre os híbridos numa mesma dosagem de N e as minúsculas comparam médias das dosagens de N dentro de um mesmo híbrido. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%. CV (%) = coeficiente de variação. **Diferença estatística significativa a 1% de probabilidade entre as dosagens de N ou interação entre dose de N e híbridos de milho. ^{ns} Diferença não significativa a 1% de probabilidade.

A interação entre doses de N na adubação e híbridos de milho em R1 foi significativa para a concentração de N, K, Ca e S e não significativa para concentração de P na FI (Figura 4.4.4).

Figura 4.4.4. Concentração de N (a), P (b), K (c), Ca (d) e S (e) na folha indicativa de três híbridos de milho no estágio R1 em função da concentração de N na adubação. *Significativo a 5%.

Como esperado, a concentração de N na FI no estágio R1 aumentou significativamente ($p < 0.05$) com o incremento da adubação nitrogenada segundo modelos lineares para H1 e H2 e quadrático para H3 (Figura 4.4.4a). A concentração de P também aumentou significativamente ($p < 0.05$) com as doses crescentes de N, segundo modelo linear (Figura

4.4.4b). Esses resultados concordam com os obtidos por Romualdo et al. (2014) e Ciampitti e Vyn (2011).

A concentração máxima de N foliar em R1, obtida a partir da equação de regressão, foi de 34.8 (H1), 37.3 (H2) e 45.5 g kg⁻¹ (H3), encontradas na maior adubação nitrogenada aplicada (280 kg ha⁻¹ de N) em H1 e H2, que apresentaram equações lineares, e em 200 kg ha⁻¹ de N na adubação em H3.

A regressão foi não significativa (p<0,05) para a concentração de K foliar em H1 e H3, apresentando valores de 21.9 e 21.1 g kg⁻¹ de K, respectivamente. Já para o H2, a regressão foi significativa (p<0.05) e ajustou-se ao modelo quadrático. Nota-se neste caso que a concentração foliar de K em H2 no estágio R1 foi superior nas plantas que receberam a maior dose de adubação nitrogenada (Figura 4.4.4c).

A concentração de Ca foliar em R1 aumentou significativamente (p<0.05) com o aumento da dose de N na adubação em H1 e H2, segundo modelos quadráticos. Entretanto, em H3 a regressão foi não significativa (Figura 4.4.4d).

A concentração de S na FI variou significativamente (p<0.01) em todos os híbridos no estágio R1 com o incremento de N na adubação, respondendo segundo modelos quadráticos (Figura 4.4.4e). As concentrações de S neste trabalho estão próximas daquelas encontradas por Bonfim-Silva e Monteiro (2010), para capim-braquiária submetido a doses de N em solução nutritiva. Mattos e Monteiro (2003) afirmaram que o N foi o grande responsável pela melhoria nas características nutricionais das gramíneas e que seu efeito tem mostrado ser dependente do S.

De acordo com Raij e Cantarella et al. (1996), os níveis foliares adequados de nutrientes para a cultura do milho no estágio de desenvolvimento R1, devem ser de N=27-35 g kg⁻¹; P=2,0-4,0 g kg⁻¹; K=17-35 g kg⁻¹; Ca=2,5-8,0 g kg⁻¹; Mg=1,5-5,0 g kg⁻¹; S=1,5-3,0 g kg⁻¹. Com base nessas informações, observa-se na Tabela 4.4.2, que as concentrações dos macronutrientes na FI estão dentro dos níveis adequados, exceto para a concentração de N nas plantas em que este nutriente foi omitido totalmente.

As médias e o coeficiente de variação da concentração de micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn) na FI dos híbridos de milho em V4 e em R1 submetidos a doses de N no campo estão apresentados nas Tabelas 4.4.3 e 4.4.4 respectivamente.

A interação entre doses de N e híbridos de milho foi significativa apenas para a concentração de Cu, Fe, Mn e Zn na FI no estágio V4 (Tabela 4.4.3) e para Zn na FI em R1 (Tabela 4.4.4).

Tabela 4.4.3. Efeito do fornecimento de adubação nitrogenada sobre a concentração de micronutrientes na folha indicativa (FI) no estágio V4 de três híbridos de milho no campo.

N kg ha ⁻¹	Híbrido	B	Cu	Fe	Mn	Zn
mg kg ⁻¹						
0	H1	21,1 ^{ns}	19,0**	162,5**	70,9**	45,2 **
70		21,2 ^{ns}	17,0**	205,9**	99,8**	34,6 **
140		21,6 ^{ns}	17,9**	186,7**	128,0**	34,8 **
280		20,2 ^{ns}	14,0**	173,8**	95,9**	31,5 **
0	H2	21,6 ^{ns}	17,5**	149,6**	93,7**	34,0 **
70		21,0 ^{ns}	17,6**	141,6**	129,3**	34,6 **
140		18,6 ^{ns}	20,9**	158,7**	130,1**	49,8 **
280		20,7 ^{ns}	19,7**	167,7**	88,3**	40,4 **
0	H3	20,5 ^{ns}	16,9**	156,4**	73,9**	39,6 **
70		20,0 ^{ns}	12,4**	155,7**	129,1**	46,9 **
140		19,9 ^{ns}	16,0**	183,3**	92,0**	37,2 **
280		21,3 ^{ns}	11,2**	158,6**	84,5**	50,9 **
C.V. (%)		6,0	10,5	4,5	17,9	14,5

Letras maiúsculas referem-se à comparação entre os híbridos numa mesma dosagem de N e as minúsculas comparam médias das dosagens de N dentro de um mesmo híbrido. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%. CV (%) = coeficiente de variação. **Diferença estatística significativa a 5% de probabilidade entre as dosagens de N ou interação entre dose de N e híbridos de milho. ^{ns} Diferença não significativa a 5% de probabilidade.

Tabela 4.4.4. Efeito do fornecimento de adubação nitrogenada sobre a concentração de micronutrientes na folha indicativa (FI) no estágio R1 de três híbridos de milho no campo.

N kg ha ⁻¹	Híbrido	B	Cu	Fe	Mn	Zn
mg kg ⁻¹						
0	H1	19,1 ^{ns}	16,9 ^{ns}	156,5 ^{ns}	87,0 ^{ns}	29,3**
70		20,2 ^{ns}	15,6 ^{ns}	129,0 ^{ns}	96,7 ^{ns}	30,7**
140		19,8 ^{ns}	17,1 ^{ns}	142,7 ^{ns}	83,0 ^{ns}	45,5**
280		18,3 ^{ns}	15,1 ^{ns}	127,0 ^{ns}	71,0 ^{ns}	21,3**
0	H2	18,9 ^{ns}	16,2 ^{ns}	154,8 ^{ns}	90,7 ^{ns}	30,8**
70		20,0 ^{ns}	17,7 ^{ns}	179,0 ^{ns}	76,3 ^{ns}	38,0**
140		17,8 ^{ns}	18,2 ^{ns}	157,0 ^{ns}	83,0 ^{ns}	44,7**
280		19,6 ^{ns}	14,7 ^{ns}	158,3 ^{ns}	84,7 ^{ns}	42,0**
0	H3	18,7 ^{ns}	17,2 ^{ns}	172,3 ^{ns}	81,0 ^{ns}	31,3**
70		18,6 ^{ns}	16,6 ^{ns}	153,3 ^{ns}	73,7 ^{ns}	32,7**
140		17,9 ^{ns}	18,6 ^{ns}	166,7 ^{ns}	87,3 ^{ns}	43,4**
280		19,3 ^{ns}	16,6 ^{ns}	171,3 ^{ns}	84,0 ^{ns}	29,0**
C.V. (%)		9,9	4,9	9,2	13,4	10,9

Letras maiúsculas referem-se à comparação entre os híbridos numa mesma dosagem de N e as minúsculas comparam médias das dosagens de N dentro de um mesmo híbrido. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%. CV (%) = coeficiente de variação. **Diferença estatística significativa a 1% de probabilidade entre as dosagens de N ou interação entre dose de N e híbridos de milho.

A concentração de B na FI não variou significativamente ($p < 0,01$) com as doses de N e nem com os híbridos estudados nos dois estádios avaliados (Tabelas 4.4.3 e 4.4.4).

A concentração de Cu na FI do milho em V4 reduziu com o aumento da adubação nitrogenada em H1 e H3 segundo modelos lineares (Figura 4.4.5a). Discordando dos resultados obtidos por Bruns e Ebelhar (2006), que constatarem aumento na concentração foliar de Cu com o acréscimo de adubação nitrogenada. No estágio R1, não houve diferença significativa ($p < 0,05$) para este parâmetro com o aumento de N e híbridos de milho (Tabela 4.4.4).

A concentração de Fe na FI do milho no estágio V4 apresentou um aumento com o acréscimo de adubação nitrogenada, respondendo segundo modelos quadráticos em H1 e H3 e linear em H2 (Figura 4.4.5b). No estágio R1, não houve diferença significativa ($p < 0,05$) para este parâmetro com o aumento de N e híbridos de milho (Tabela 4.4.4).

Figura 4.4.5. Concentração de Cu (a), Fe (b) e Mn (c) na folha indicativa de três híbridos de milho no estágio V4 em função da concentração de N na adubação. *Significativo a 5%.

A interação entre doses de N e híbridos de milho foi não significativa para a concentração de Mn na FI no estágio V4, que respondeu segundo modelo quadrático com o aumento de N na adubação (Fig 5.5c).

A concentração de Zn da FI no estágio V4 variou significativamente ($p < 0,01$) com o fornecimento de N (Figura 4.4.5) e respondeu segundo modelos quadráticos, entretanto com um baixo R^2 principalmente em H2 e H3. Já no estágio R1, a concentração de Zn na FI foi influenciada positivamente pelo acréscimo de N na adubação segundo modelos quadráticos (Figura 4.4.6). A concentração desse micronutriente aumentou significativamente ($p < 0,05$) com o incremento de adubação nitrogenada e reduziu na maior dose de N (280 kg ha^{-1}) em todos os híbridos estudados, concordando com os resultados obtidos por Bruns e Ebelhar (2006), que estudaram o efeito de doses de N e K na concentração de nutrientes nas folhas de milho.

Raij e Cantarella et al. (1996) afirmaram que o fornecimento de nutrientes para o milho no início do florescimento pode ser considerado como satisfatório se as concentrações foliares de micronutrientes na FI de milho estiverem entre $10\text{-}25 \text{ mg kg}^{-1}$ de B, $6\text{-}20 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cu, $30\text{-}250 \text{ mg kg}^{-1}$ de Fe, $20\text{-}200 \text{ mg kg}^{-1}$ de Mn e $15\text{-}100 \text{ mg kg}^{-1}$ de Zn. Comparando os resultados desse estudo com esses níveis adequados, pode-se observar que as mudanças causadas pela adubação nitrogenada para as concentrações dos micronutrientes mantiveram-se dentro dos limites satisfatórios.

Figura 4.4.6. Concentração de Zn na folha indicativa de três híbridos de milho no estágio R1 em função da concentração de N na adubação. *Significativo a 5%.

Bonfim-Silva e Monteiro (2010) afirmaram que o suprimento de nutrientes constitui-se importante fator na nutrição da planta, tendo em vista que a disponibilidade de nutrientes exerce grande influência na nutrição da planta, que se reflete no desenvolvimento vegetal.

c) Produtividade de grãos

A produtividade de milho foi significativamente influenciada ($p < 0,05$) pelas doses de N em todos os híbridos, que responderam à adubação nitrogenada segundo modelos quadráticos, conforme se pode observar na Figura 4.4.7. A produtividade de H1 e H2 foi

superior ao H3 até a D3, entretanto na maior dose de N aplicada (280 kg ha^{-1}), H3 apresentou produtividade superior aos demais híbridos.

Figura 4.4.7. Produtividade de grãos (kg ha^{-1}) de 3 híbridos de milho cultivados com doses de N no campo. **Significativo a 1%. CV (%) = 9,1.

A deficiência de N ocorreu significativamente ($p < 0,05$) nas plantas onde houve omissão de N na adubação e reduziu a produtividade de grãos nos 3 híbridos estudados (Figura 4.4.7), concordando com os resultados obtidos por Chen et al. (2014b), Peng et al. (2013), Meena et al. (2013), Ciampitti e Vyn (2012), Izsáki (2009) e Bruns e Ebelhar (2006), que estudaram a concentração de N para maximizar o rendimento de grãos de milho. Kurwakumire et al. (2014), estudando a resposta do milho à adubação nitrogenada em diferentes regiões, observaram que a produtividade de milho foi superior nas plantas que receberam a adubação nitrogenada. Ciampitti e Vyn (2011) estudaram a os efeitos de interação entre densidade de plantas e doses de N em cobertura ($0, 165$ e 330 kg ha^{-1} de N) em híbridos de milho transgênico e convencional e verificaram que as doses de N afetaram a produtividade de grãos neste estudo, mas o efeito entre os híbridos foi insignificante.

Pavinato et al. (2008) afirmam que o N é um dos principais nutrientes para praticamente todas as culturas e que, particularmente para o milho, ele desempenha papel importante no acúmulo de proteína e na produtividade de grãos. Segundo Echarte et al. (2008), a deficiência de N diminui a interceptação de luz pela planta, a produção de foto-assimilados, e consequentemente reduzem o rendimento de grãos final.

A produtividade de grãos máxima obtida foi igual a 6971 (H1), 7200 (H2) e 6426 kg ha^{-1} (H3), correspondendo respectivamente a $121,1$; $138,9$ e $143,1 \text{ kg ha}^{-1}$ de N (Figura 4.4.7). Wu et al. (2014), estudando a dose ótima de N para milho em diferentes condições de solo e clima da China, também verificaram menor produtividade do milho conduzido sem aplicação

de fertilizante nitrogenado. Em seu estudo, as plantas conduzidas com a dose recomendada de N na adubação atingiram a produtividade média foi de 8700 kg ha⁻¹.

A produtividade de grãos foi menor na maior dosagem de N aplicada (Figura 4.4.7), concordando com Ju et al. (2009), que afirmam que o uso excessivo de fertilizantes nitrogenados não aumenta significativamente a produção de grãos, e diminui a eficiência de uso de nitrogênio (EUN), além de afetar negativamente a qualidade ambiental.

Plank (1989) afirmou que pequenas alterações na concentração de N para algumas culturas podem resultar em grandes efeitos sobre o rendimento e o crescimento das plantas. Portanto, é importante que o nível N seja mantido dentro dos limites prescritos da faixa de suficiência pelo uso apropriado de fertilizante N.

d) Índices de eficiência de N

A maior eficiência de uso de N (EUN) do estudo foi observada em H2, com 15.5 kg de grãos kg⁻¹ de N aplicado (Tabela 4.4.5). Pode-se dizer, portanto que o H2 é mais eficiente em converter o N disponível no solo em produção de grãos dentro de um sistema de cultivo. Segundo Cassman et al. (2003), a melhoria da EUN em milho precisa ser alcançada para reduzir os impactos ambientais negativos associados à adubação nitrogenada (por exemplo, as perdas de N para a superfície e águas subterrâneas) e ainda para reduzir os custos dos fertilizantes nitrogenados por unidade de produção de grãos produzidos.

Por outro lado, o H3 atingiu a maior ERN, com 0,142 g de N foliar kg⁻¹ de N aplicado, indicando maior capacidade da planta em recuperar o N do fertilizante nitrogenado aplicado (Tabela 4.4.5).

Notou-se claramente maior absorção de N quando a adubação foi adicionada, alterando a eficiência interna em uma ampla faixa (69,2 a 502,2 kg de grãos kg⁻¹ de N foliar). O H1 apresentou maior EIN, ou seja, produziu mais grãos de milho por unidade de N foliar (502,2 kg de grãos g⁻¹ de N foliar), mostrando maior capacidade das plantas em transformar o N absorvido pela cultura em grãos (Tabela 4.4.5).

Tabela 4.4.5. Produtividade e concentração foliar médios, eficiência de uso de N (EUN), eficiência de recuperação de N (ERN) e eficiência interna de N (EIN) por ha em três híbridos de milho, em função de 0 e 140 kg ha⁻¹ de N.

Hib.	N foliar médio		Produtividade média		EUN kg grãos. kg ⁻¹ N aplicado	ERN g N foliar. kg ⁻¹ N aplicado	EIN kg grãos. g ⁻¹ N foliar
	0 kg ha ⁻¹ de N	140 kg ha ⁻¹ de N	0 kg ha ⁻¹ de N	140 kg ha ⁻¹ de N			
H1	24.0	27.0	5942.7	7468.8	10.9	0.022	502.2
H2	23.5	36.7	5593.8	7765.6	15.5	0.095	164.0
H3	23.3	43.1	5286.5	6661.5	9.8	0.142	69.2

Esses resultados estão de acordo com os encontrados por Ciampitti e Vyn (2011) que, estudando a resposta de eficiências de N em híbridos de milho cultivados com doses de adubação nitrogenada, observaram EUN e ERN próximas das obtidas neste estudo.

e) Análise química do solo

Na Tabela 4.4.6, está apresentada a análise química do solo submetido a doses de N na adubação.

Tabela 4.4.6. pH (CaCl₂), matéria orgânica (MO), fósforo (P resina), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e saturação por bases (V%) de solo cultivado com milho com doses de N em duas posições (linha e entrelinha da cultura) e em duas camadas (0,0 a 0,10 m e 0,10 e 0,20 m).

N kg ha ⁻¹	Posição	Camada	pH (CaCl ₂)	MO g kg ⁻¹	P resina	K mmolc dm ⁻³	Ca	Mg	V %
0	linha	0 a 10	5,9Aa	21,2Aa	16,3a	1,7Aa	29,3A	15,5A	72,6Aa
		10 a 20	5,7Ab	16,6Ab	12,7b	1,2Ab	23,8A	13,8A	65,9Ab
	entrelinha	0 a 10	5,7Aa	20,8Ba	22,7a	1,4Ba	27,3A	13,8A	66,3Ba
		10 a 20	5,5Ab	15,9Bb	21,0b	1,2Aa	24,5A	13,3A	61,6Bb
70	linha	0 a 10	5,8Aa	21,0Aa	12,3a	2,3Aa	24,0A	15,0A	72,7Aa
		10 a 20	5,5Ab	17,6Ab	11,8b	1,5Ab	21,7A	12,5A	64,6Ab
	entrelinha	0 a 10	5,7Aa	19,2Ba	12,8a	1,1Ba	25,7A	12,5A	67,8Ba
		10 a 20	5,5Ab	17,0Bb	10,8b	1,4Aa	24,3A	12,3A	61,5Bb
140	linha	0 a 10	5,8Aa	20,8Aa	12,3a	2,0Aa	24,3A	14,5A	70,3Aa
		10 a 20	5,5Ab	19,0Ab	10,7b	1,5Ab	22,0A	13,3A	63,2Ab
	entrelinha	0 a 10	5,7Aa	21,8Aa	14,3a	1,6Ba	23,7A	13,3A	68,6Aa
		10 a 20	5,6Ab	17,4Bb	14,0a	1,5Aa	20,3A	12,3A	64,1Ab
280	linha	0 a 10	5,8Aa	24,7Aa	14,0a	1,6Aa	27,3A	13,5A	70,3Aa
		10 a 20	5,5Ab	18,6Ab	12,0b	1,3Ab	23,7A	11,8A	61,3Ab
	entrelinha	0 a 10	5,8Aa	20,3Ba	11,7a	0,7Ba	30,3A	13,3A	71,2Aa
		10 a 20	5,5Ab	16,9Bb	11,8a	0,9Aa	24,0A	12,3A	63,8Ab
C.V. %			3,66	9,49	15,81	18,32	12,60	11,53	8,75

Letras maiúsculas referem-se à comparação entre os as posições de amostragem (linha ou entrelinha) numa mesma dosagem de N e as minúsculas comparam médias das camadas (0,0-0,1 ou 0,1-0,2) dentro da mesma posição amostrada. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%. CV (%) = coeficiente de variação.

O pH (CaCl₂) e a saturação por bases (V%) do solo não variaram significativamente ($p < 0,05$) com o incremento de N no solo e nem com a posição de amostragem, entretanto responderam significativamente entre as camadas avaliadas, sendo superiores na camada superficial (0,0 a 0,10 m), conforme se pode observar na Tabela 4.4.6.

A matéria orgânica não variou significativamente ($p < 0,05$) com as doses de N, mas houve diferença significativa entre as posições e as camadas avaliadas. Este parâmetro foi

superior na camada de 0,0 a 0,10 m e na linha de plantio em todas as doses de N aplicadas, exceto na dose de N igual a 140 kg ha^{-1} , em que não apresentou diferença significativa entre as posições avaliadas.

Houve diferença significativa ($p < 0,05$) de P no solo em todas as camadas estudadas, exceto na entrelinha com doses de N iguais a 140 e 280 kg ha^{-1} , que não apresentaram diferença significativa ($p < 0,05$) entre as camadas (Tabela 4.4.6). O fertilizante fosfatado foi aplicado na linha de plantio, e por ser pouco móvel no solo, ficou localizado em maior concentração na linha e na camada superficial.

O K foi superior na camada 0,0 a 0,10 m nas amostragens feitas na linha de plantio em todas as doses de N aplicadas (Tabela 4.4.6). Devido provavelmente pela aplicação do fertilizante ser feita na linha de plantio e, mesmo sendo um nutriente móvel no solo, ainda apresentou-se em maior concentração na camada superficial do solo.

As concentrações de Ca e Mg no solo não apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$) para a posição de amostragem (Tabela 4.4.6), o que pode ser explicado pelo fato desses nutrientes serem aplicados através da calagem em área total. Estes parâmetros apresentaram diferença significativa entre as camadas, sendo superior na camada de 0 a 0,10 m, concordando com Malavolta (2006) que afirma que a aplicação de calcário leva ao acúmulo de Ca e Mg na superfície do solo.

A interação entre doses de N e posições de amostragem foi significativa ($p < 0,05$) para a concentração de P no solo, a qual decresceu com o aumento de N, segundo modelos quadráticos (Figura 4.4.8a). A interação entre doses de N e K no solo foi não significativa (Figura 4.4.8b). Entretanto este parâmetro respondeu significativamente ($p < 0,05$) ao aumento de N na adubação. Pode-se observar que o K do solo aumentou com o incremento de N até 140 kg ha^{-1} , mas na dose 280 kg ha^{-1} , houve uma redução drástica desse nutriente no solo. Malavolta (2006) afirmou que existe uma forte relação entre esses dois elementos, ocorrendo inibição na absorção de um elemento, geralmente parcial e reversível, em função da presença de concentração suficiente do outro.

Figura 4.4.8. Fósforo (a), potássio (b), cálcio (c) e magnésio (d) no solo do experimento de campo com doses de N no solo; em duas posições – linha e entrelinha da cultura (a) ou em 2 camadas – 0,0 a 0,10 m e 0,10 e 0,20 m (c,d).

A interação entre doses de N e camadas amostradas foi significativa para os teores de Ca e Mg no solo. O Ca (Figura 4.4.8c) e Mg (Figura 4.4.8d) responderam significativamente ($p < 0,01$) ao incremento de N na adubação segundo modelos quadráticos.

4.4.2. Potássio

a) Sintomas de deficiência de K

Os sintomas visuais de deficiência de K observados nos híbridos cultivados no campo estão nas Figuras 4.4.9 e 4.4.10.

Figura 4.4.9. Sintomas de deficiência de K nas folhas mais velhas de plantas de milho cultivadas com omissão de K na adubação aos 30 dias após a semeadura.

Figura 4.4.10. Sintomas de deficiência de K nas folhas mais velhas de plantas de milho cultivadas com omissão de K na adubação (à esquerda) comparada a uma planta sem deficiência (à direita) no estágio R1.

No campo, foi observado que as plantas que não receberam K na adubação manifestaram clorose ao longo das margens das folhas velhas, movendo-se gradualmente em direção à nervura principal e às folhas novas da planta e depois necróticas (Figura 4.4.9), concordando com resultados obtidos por Romualdo et al. (2014), Prabhu et al. (2007), Minjian et al. (2007) e Malavolta (2006).

No estágio R1, os híbridos de milho com omissão de K na adubação manifestaram as margens de folhas velhas com necrose (Figura 4.4.10). De acordo com Fonseca et al. (2008) e Yost et al. (2011) a deficiência de K mostra-se inicialmente como amarelecimento progredindo para o bronzeamento ao longo das margens das folhas velhas.

De acordo com Taiz e Zeiger (2009) e Malavolta (2006), o primeiro sintoma visível de deficiência de potássio em plantas é a clorose em machas ou marginal, que então evolui para necrose, principalmente nos ápices foliares, nas margens e entre as nervuras. As folhas também podem curvar-se e secar. No milho, os efeitos no caule resultam em tendência maior ao tombamento.

b) Análise química foliar

Na Tabela 4.4.7, estão apresentados as médias e o coeficiente de variação da concentração de macronutrientes (N, P, K, Ca Mg e S) na folha indicativa (FI) dos híbridos de milho no estágio V4 submetidos a doses de K₂O no campo. Constatou-se que a interação entre doses de N e híbridos de milho foi significativa ($p < 0,05$) na FI apenas para a concentração de N e K (Tabela 4.4.7). Pode-se dizer, portanto, que para a concentração desses nutrientes, cada híbrido respondeu à aplicação de K₂O na adubação de forma independente um do outro.

As concentrações de P, S, Ca e Mg em V4 não variaram significativamente ($p < 0,01$) dentro de cada híbrido com o aumento da adubação nitrogenada (Tabela 4.4.7). Entretanto, a resposta à adubação potássica entre os híbridos foi diferente significativamente ($p < 0,05$) para as concentrações de P na FI (Tabela 4.4.7), que apresentou maior concentração no H3.

Tabela 4.4.7. Médias e coeficiente de variação (C.V) da macronutrientes na folha indicativa (FI) no estágio V4 de três híbridos de milho submetidos a doses de K₂O na adubação no campo.

K ₂ O kg ha ⁻¹	Híbrido	N	P	K	S	Ca	Mg
g kg ⁻¹							
0	H1	32,2**	2,9 Ba	17,5**	2,2 ^{ns}	3,2 ^{ns}	2,4 ^{ns}
65		32,2**	2,9 Ba	18,3**	1,9 ^{ns}	3,2 ^{ns}	2,3 ^{ns}
130		31,9**	2,9 Ba	19,8**	1,9 ^{ns}	2,9 ^{ns}	2,2 ^{ns}
260		32,9**	2,5 Ba	19,3**	1,8 ^{ns}	3,0 ^{ns}	2,0 ^{ns}
0	H2	27,9**	2,6 Ba	18,3**	1,8 ^{ns}	3,0 ^{ns}	2,1 ^{ns}
65		32,1**	2,7 Ba	18,8**	2,0 ^{ns}	3,0 ^{ns}	2,1 ^{ns}
130		31,5**	2,6 Ba	19,2**	2,2 ^{ns}	2,7 ^{ns}	2,2 ^{ns}
260		31,7**	3,0 Ba	20,5**	2,1 ^{ns}	3,4 ^{ns}	2,2 ^{ns}
0	H3	32,2**	3,1 Aa	18,8**	1,9 ^{ns}	3,1 ^{ns}	2,4 ^{ns}
65		32,5**	3,1 Aa	20,9**	1,9 ^{ns}	2,9 ^{ns}	2,3 ^{ns}
130		33,7**	3,3 Aa	21,8**	2,1 ^{ns}	3,1 ^{ns}	2,2 ^{ns}
260		32,5**	3,1 Aa	20,0**	2,1 ^{ns}	3,3 ^{ns}	2,2 ^{ns}
CV (%)		3,8	10,8	5,2	9,2	10,0	11,7

Letras maiúsculas referem-se à comparação entre os híbridos numa mesma dosagem de K₂O e as minúsculas comparam médias das dosagens de K₂O dentro de um mesmo híbrido. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%. CV (%) = coeficiente de variação. **Diferença estatística significativa a 1% de probabilidade entre as dosagens de K₂O ou interação entre dose de K₂O e híbridos de milho.

Na Figura 4.4.11, pode-se observar os desdobramentos dos híbridos para a concentração de N e K na FI em V4 para as doses de K₂O na adubação. Como era esperado, o incremento de K₂O resultou em maior concentração de K foliar em V4, segundo modelos quadráticos (Figura 4.4.11b), concordando com Romualdo et al. (2014), que estudaram o efeito de doses de K₂O sobre a concentração de nutrientes e na produtividade do milho.

A regressão entre a concentração foliar de N em V4 e adubação de K₂O foi não significativa ($p < 0,05$) para H1 e H3, apresentado uma concentração média igual a 32,3 e 32,7 g kg⁻¹ de N respectivamente, mas foi significativa para H2, respondendo segundo modelo quadrático. Notou-se em H2, que a concentração foliar de N na FI foi menor quando o K foi omitido da adubação.

Figura 4.4.11. Concentração de N (a) e K (b) na folha indicativa de três híbridos de milho no estágio V4 em função da concentração de K₂O na adubação. *Significativo a 5%.

As médias e o coeficiente de variação da concentração de macronutrientes (N, P, K, Ca Mg e S) na folha indicativa (FI) dos híbridos de milho no estágio R1 submetidos a doses de K₂O no campo estão apresentados na Tabela 4.4.8.

Tabela 4.4.8. Concentração de macronutrientes na folha indicativa (FI) no estágio R1 de 3 híbridos de milho submetidos a doses de K₂O no campo.

K ₂ O kg ha ⁻¹	Híbrido	N	P	K	S	Ca	Mg
g kg ⁻¹							
0	H1	26,5 ^{ns}	2,0 Ba	18,7**	1,6 ^{ns}	3,8 ^{ns}	2,5 Aa
65		26,8 ^{ns}	1,9 Ba	23,4**	1,3 ^{ns}	4,3 ^{ns}	2,6 Aa
130		25,3 ^{ns}	2,0 Ba	27,2**	0,9 ^{ns}	4,1 ^{ns}	2,6 Aa
260		27,5 ^{ns}	1,9 Ba	27,2**	1,4 ^{ns}	3,6 ^{ns}	2,6 Aa
0	H2	28,4 ^{ns}	2,0 Aa	19,2**	1,4 ^{ns}	4,1 ^{ns}	2,5 Aa
65		29,9 ^{ns}	2,1 Aa	22,6**	1,1 ^{ns}	4,2 ^{ns}	2,6 Aa
130		26,4 ^{ns}	2,3 Aa	25,1**	1,1 ^{ns}	4,0 ^{ns}	2,6 Aa
260		25,6 ^{ns}	2,1 Aa	27,5**	1,0 ^{ns}	4,0 ^{ns}	2,3 Aa
0	H3	26,2 ^{ns}	2,0 Aa	20,7**	0,9 ^{ns}	4,1 ^{ns}	2,3 Ba
65		27,1 ^{ns}	2,2 Aa	23,6**	1,0 ^{ns}	3,8 ^{ns}	2,2 Ba
130		26,7 ^{ns}	2,2 Aa	24,6**	1,2 ^{ns}	3,7 ^{ns}	2,0 Ba
260		26,6 ^{ns}	2,1 Aa	26,8**	1,1 ^{ns}	3,6 ^{ns}	2,1 Ba
CV (%)		9,8	9,6	4,6	20,1	11,9	12,9

Letras maiúsculas referem-se à comparação entre os híbridos numa mesma dosagem de K₂O e as minúsculas comparam médias das dosagens de K₂O dentro de um mesmo híbrido. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%. CV (%) = coeficiente de variação. **Diferença estatística significativa a 1% de probabilidade entre as dosagens de K₂O ou interação entre dose de K₂O e híbridos de milho.

As concentrações de N, S e Ca na FI em R1 não apresentaram diferenças significativas ($p < 0.05$) com o aumento de K na adubação e também entre os híbridos e estão dentro do adequado estabelecido para o milho em R1 por Raij e Cantarella et al. (1996), que é de N=27-35 g kg⁻¹; S=1,5-3,0 g kg⁻¹ e Ca=2,5-8,0 g kg⁻¹.

A concentração de K na FI em R1 variou significativamente ($p < 0.05$) com o aumento da adubação potássica (Tabela 4.4.8). De acordo com Raij e Cantarella et al. (1996), a concentração adequada de K na FI do milho deve ser de 17-35 em g kg^{-1} , desta forma a concentração de K na FI de H1 e H2 submetidos à omissão completa de K_2O na adubação, está abaixo do adequado.

As concentrações de P e Mg na FI (Tabela 4.4.8) estão adequadas para esta folha de milho no estágio R1, que de acordo com Raij e Cantarella et al. (1996), os níveis adequados de P e Mg para a cultura do milho no estágio de desenvolvimento R1, devem ser de $\text{P}=2,0\text{-}4,0 \text{ g kg}^{-1}$ e $\text{Mg}=1,5\text{-}5,0 \text{ g kg}^{-1}$.

A interação entre doses de K e híbridos de milho foi não significativa para todos os macronutrientes, exceto para o K. Pode-se observar que a concentração de P e Mg não variou significativamente com as doses de K_2O aplicadas, entretanto variou entre os híbridos estudados. A menor concentração de P na FI foi encontrada no H1, enquanto que a menor concentração de Mg na FI foi obtida no H3 (Tabela 4.4.8).

Na Figura 4.4.12, pode-se observar que o K na FI aumentou significativamente ($p < 0.05$) com o incremento de adubação potássica, ajustando-se a modelos quadráticos em H1 e H2 e linear em H3.

Figura 4.4.12. Concentração de K na folha indicativa de três híbridos de milho no estágio R1 em função da concentração de K_2O na adubação. *Significativo a 5%.

Com os resultados de análise foliar, obteve-se bom ajustamento nas equações de regressão entre a concentração de K no tecido foliar e a aplicação de K_2O na adubação (R^2 igual a 0.99 para H1 e H2 e 0.93 para H3). A concentração de K no tecido foliar dos híbridos foi significativamente ($p < 0.05$) afetada pela disponibilidade do nutriente no solo (Figura 4.4.12). O coeficiente de determinação (R^2) indicou que 99% (H1 e H2) e 93% (H3) da variação da concentração de K na folha pode ser atribuída à variação da concentração de K do solo. Esses resultados concordaram com os encontrados por Scherer (1998) em soja.

Houve grande acúmulo de K na FI de todos os híbridos, com intervalos de concentração médios de 18,4 a 27,8 em H1 e H2 e 20,0 a 27,2 em H3, concordando com resultados obtidos por Akram (2013), Clover e Mallarino (2013) e por Mallarino e Higashi (2009). De acordo com Epstein e Bloom (2006), o teor foliar de K pode aumentar consideravelmente pelo efeito chamado “consumo de luxo”, em que quantidades consideráveis do cátion são estocadas nos vacúolos celulares quando há disponibilidade para a planta. Neste caso, as concentrações de K podem ser consideradas como “altas” e não são esperados incrementos produtivos pela aplicação de K ao solo de cultivo ou pelo aumento da concentração deste nutriente à solução nutritiva (EMBRAPA, 2004; Borket et al., 1993).

A concentração máxima de K na FI em R1 foi de 29,0 e 28,0 g kg⁻¹ respectivamente nas doses 225,0 (H1) e 300, 0 (H2) kg ha⁻¹ de K₂O (Figura 4.4.12). Ou seja, concentração de K foliar muito próxima entre os dois híbridos, entretanto com adubação potássica 33% superior em H2. Akram (2013) observou máxima concentração de K foliar em híbridos de milho no mesmo estágio de desenvolvimento com 175 kg ha⁻¹ de K₂O, e mínimo também foi observado no controle onde não foi aplicado K.

As médias e o coeficiente de variação da concentração de micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn) na FI dos híbridos de milho em V4 e em R1 submetidos a doses de K₂O no campo estão apresentados nas Tabelas 4.4.9 e 4.4.10 respectivamente.

Tabela 4.4.9. Efeito do fornecimento de adubação potássica sobre a concentração de micronutrientes na folha indicativa (FI) no estágio V4 de três híbridos de milho no campo.

K ₂ O kg ha ⁻¹	Híbrido	B	Cu	Fe	Mn	Zn
mg kg ⁻¹						
0	H1	18,0 Aa	8,2**	119,0 *	94,9**	27,7**
65		17,9 Aa	10,7**	112,8*	84,4**	25,9**
130		18,3 Aa	9,9**	105,3*	74,3**	26,7**
260		18,1 Aa	11,4**	109,9*	81,3**	28,9**
0	H2	16,7 Ba	12,6**	118,3*	78,2**	28,8**
65		17,3 Ba	13,7**	110,7*	89,7**	34,4**
130		16,8 Ba	9,2**	102,2*	90,5**	38,5**
260		16,8 Ba	10,0**	108,9*	73,6**	27,8**
0	H3	16,0 Ba	8,4**	109,0*	74,5**	38,3**
65		16,1 Ba	12,2**	111,1*	72,5**	35,3**
130		17,2 Ba	12,0**	107,0*	77,5**	35,8**
260		16,9 Ba	12,4**	107,7*	80,2**	31,5**
CV (%)		3,3	13,6	7,2	8,1	9,7

Letras maiúsculas referem-se à comparação entre os híbridos numa mesma dosagem de K₂O e as minúsculas comparam médias das dosagens de K₂O dentro de um mesmo híbrido. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%. CV (%) = coeficiente de variação. **Diferença estatística significativa a 1% de probabilidade entre as dosagens de K₂O.

Tabela 4.4.10. Efeito do fornecimento de adubação potássica sobre a concentração de micronutrientes na folha indicativa (FI) no estágio R1 de três híbridos de milho no campo.

K ₂ O kg ha ⁻¹	Híbrido	B	Cu	Fe	Mn	Zn
mg kg ⁻¹						
0	H1	20,3 ^{ns}	11,5 Aba	141,9**	124,9**	36,0**
65		19,2 ^{ns}	11,1 Aba	137,5**	155,3**	31,7**
130		21,0 ^{ns}	12,0 Aba	135,2**	143,9**	23,5**
260		19,5 ^{ns}	11,8 Aba	146,1**	131,0**	35,4**
0	H2	20,9 ^{ns}	11,3 Ba	123,4**	124,7**	33,0**
65		21,3 ^{ns}	10,7 Ba	125,7**	124,4**	25,8**
130		18,8 ^{ns}	11,0 Ba	129,3**	159,7**	36,1**
260		19,9 ^{ns}	11,0 Ba	127,6**	159,9**	30,8**
0	H3	19,8 ^{ns}	12,1 Aa	134,0**	147,9**	32,4**
65		20,2 ^{ns}	11,6 Aa	145,2**	126,1**	33,3**
130		19,6 ^{ns}	13,4 Aa	133,3**	124,0**	26,8**
260		20,0 ^{ns}	12,7 Aa	157,3**	119,5**	27,5**
CV (%)		10,1	13,2	4,8	12,0	12,1

Letras maiúsculas referem-se à comparação entre os híbridos numa mesma dosagem de K₂O e as minúsculas comparam médias das dosagens de K₂O dentro de um mesmo híbrido. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%. CV (%) = coeficiente de variação. **Diferença estatística significativa a 1% de probabilidade entre as dosagens de K₂O ou interação entre dose de K₂O e híbridos de milho.

A concentração foliar de Cu, Fe, Mn e Zn no estágio V4 variaram significativamente ($p < 0.05$) como o aumento de K na adubação e também entre os híbridos estudados (Tabela 4.4.9). A concentração foliar de B neste estágio não variou significativamente com o aumento da adubação potássica, mas variou entre os híbridos estudados. Notou-se que o H1 foi o que apresentou a maior concentração de B na FI no estágio V4 (Tabela 4.4.9).

No estágio R1, a concentração de B na FI não variou significativamente ($p < 0.05$) com o aumento das doses de K, bem como entre os híbridos (Tabela 4.4.10). A concentração de Cu na FI variou apenas entre os híbridos estudados, e foi superior no H3. O H2 apresentou a menor concentração de B na FI (Tabela 4.4.10). Somente a concentração de Fe, Mn e Zn em R1 responderam significativamente ($p < 0.05$) ao aumento de K na adubação e entre os híbridos estudados (Tabela 4.4.10).

A interação entre doses de adubação potássica e híbridos de milho foi significativa ($p < 0.05$) para a concentração de Cu, Mn e Zn na FI em V4 (Figura 4.4.13) e Fe, Mn e Zn (Figura 4.4.14) em R1.

Figura 4.4.13. Concentração de Cu (a), Fe (b), Mn (c) e Zn (d) na folha indicativa de três híbridos de milho no estágio V4 em função da concentração de K_2O na adubação. *Significativo a 5%.

A concentração de Cu na FI do milho em V4 aumentou com o incremento de K na adubação em H1 e H3, segundo modelo linear e quadrático, respectivamente. Entretanto em H2 houve redução na concentração de Cu com o aumento da adubação potássica (Figura 4.4.13a). No estágio R1, não houve diferença significativa ($p < 0,05$) para este parâmetro com o aumento de K_2O na adubação (Tabela 4.4.10).

A concentração de Fe na FI no estágio V4 (Figura 4.4.13b) e para H3 do estágio R1 (Figura 4.4.14b) variou significativamente ($p < 0,05$) com as doses de K_2O , respondendo segundo modelos quadráticos. Entretanto, para os H1 e H2 no estágio R1, a análise de regressão foi não significativa e a concentração desse nutriente foi de 140,2 e 126,5 mg kg⁻¹ respectivamente.

A concentração de Mn na FI variou significativamente ($p < 0,05$) com as doses de K_2O na adubação em H1 e H2 no estágio V4 (Figura 4.4.13c) e em todos os híbridos no estágio R1 (Figura 4.4.14b) segundo modelos quadráticos. Entretanto, a regressão foi não significativa para este nutriente em H3 no estágio V4 (76,0 mg kg⁻¹ de Mn).

Figura 4.4.14. Concentração de Fe (a), Mn (b) e Zn (c) na folha indicativa de três híbridos de milho no estágio R1 em função da concentração de K₂O na adubação. *Significativo a 5%.

A concentração de Zn na FI variou significativamente com o aumento de K₂O na adubação em H2 e H3 no estágio V4 (Figura 4.4.13d) bem como em H1 e H3 no estágio R1 (Figura 4.4.14c).

c) Produtividade do milho

A adição de fertilizante potássico na adubação promoveu aumentos significativos ($p < 0,01$) na produtividade dos híbridos de milho que responderam segundo modelo quadrático para H1 e linear para H2 e H3 (Figura 4.4.15). Esses resultados concordam com os encontrados em vários trabalhos da literatura (Clover e Mallarino, 2013; Wu et al., 2013; Niu et al., 2011; e Mallarino e Higashi, 2009) estudando a resposta de produtividade do milho à adição de doses de adubação potássica. Saleh et al. (2010) também observaram que o rendimento de grãos de milho foi correlacionado positivamente com o aumento da concentração de K no solo. Os híbridos de milho também diferiram significativamente ($p < 0,05$) para este parâmetro, concordando com resultados encontrados por Akram (2013).

Figura 4.4.15. Produtividade de grãos (kg ha^{-1}) de 3 híbridos de milho cultivados com doses de K_2O no campo. **Significativo a 5%. CV (%) = 13,2.

O aumento da produtividade do milho devido à adubação potássica, (diferença entre a produtividade máxima e a obtida com a omissão completa de K na adubação) em média foi de 2,0; 2,1 e 2,2 t ha^{-1} , respectivamente para H1, H2 e H3.

A produtividade máxima de H1 foi de 6080 kg ha^{-1} na dose de 148,7 kg ha^{-1} de K_2O . Esses resultados concordam com os encontrados por Wu et al. (2007) que, estudando a aplicação de doses de K em híbridos de milho, verificaram altas respostas na produtividade do milho para a aplicação do K.

Segundo Coelho et al. (2005) o tamanho da espiga não é tão afetado pela deficiência de K no milho, mas há um comprometimento na produção, pois as extremidades dos grãos não se desenvolvem e as espigas ficam com os grãos não compactamente enfileirados no sabugo.

Akram (2013) afirma que a produção de grãos é o resultado final de muitos processos complexos morfológicas e fisiológicas que ocorrem durante o crescimento e desenvolvimento da cultura.

d) Índices de eficiência de K

A partir dos resultados de produtividade de grãos e K foliar dos híbridos de milho em função de doses de K_2O na adubação, pode-se observar a eficiência de uso (EUK), de recuperação (ERK) e interna (EIK) do nutriente aplicado em cada híbrido estudado (Tabela 4.4.11).

Tabela 4.4.11. Eficiência de uso de K (EUK), eficiência de recuperação de K (ERK) e eficiência interna de K (EIK) por ha em 3 (três) híbridos de milho, em função de 0 e 130 kg ha^{-1} de K_2O (130K) ou 0 e 260 kg ha^{-1} de K_2O (260K).

Híbrido	EUK (kg grãos. kg^{-1} K_2O aplicado)		ERK (g K foliar. kg^{-1} K_2O aplicado)		EIK (kg grãos. g^{-1} K foliar)	
	130K	260K	130K	260K	130K	260K
H1	3,6	15,1	0,04	0,07	99,4	221,7
H2	7,8	16,3	0,04	0,05	223,5	311,0
H3	8,6	10,3	0,03	0,04	313,8	274,2

As EUK, ERK e EIK (Tabela 4.4.11) foram superiores quando foi aplicado o dobro da dose recomendada de K_2O (260K).

A maior EUK do estudo foi observada em H2 na dose 260 kg ha^{-1} de K_2O . Entretanto quando a dose de K_2O foi reduzida para 130 kg ha^{-1} , o híbrido mais eficiente para o uso de K foi o H3. Portanto, pode-se dizer portanto que o H2 é mais eficiente em converter o K_2O disponível no solo em produção de grãos dentro de um sistema de cultivo, quando a adubação potássica for realizada em doses elevadas (260 kg ha^{-1} de K_2O). Quando a aplicação de K_2O for realizada dentro da recomendada (130 kg ha^{-1} de K_2O), o híbrido mais eficiente em converter o K_2O disponível no solo em produção de grãos foi o H3 (Tabela 4.4.11).

Fato similar pode ser observado com a EIK, em que na dose dobrada (260K) foi o H2 o mais eficiente, ou seja, produziu mais grãos de milho por unidade de K foliar. Por outro lado, quando a dose de K_2O foi de 130 kg ha^{-1} , a EIK foi superior no H3, mostrando nestas condições maior capacidade das plantas em transformar o K_2O absorvido pela cultura em grãos (Tabela 4.4.11).

O H1 atingiu a maior ERK na dose dobrada de K_2O (260K), o que indicou que este híbrido apresentou maior capacidade da planta em recuperar o K_2O do fertilizante potássico aplicado. Entretanto, na dose 130 kg ha^{-1} de K_2O , H1 e H2 apresentaram ERK similares e superiores ao H3 (Tabela 4.4.5).

e) *Análise química do solo*

Na Tabela 4.4.12, está apresentada a análise química do solo submetido a doses de K_2O na adubação. Pode-se observar que o teor de S não variou significativamente ($p < 0,05$) com o incremento de K_2O no solo, nem com a posição de amostragem e nem com as camadas avaliadas.

Tabela 4.4.12. pH (CaCl₂), fósforo (P resina), enxofre (S), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), H+Al e saturação por bases (V%) do solo do experimento de campo com doses de K_2O em duas posições (linha e entrelinha da cultura) e em duas camadas (0,0 a 0,10 m e 0,10 e 0,20 m).

K ₂ O kg ha ⁻¹	Posição	Camada	pH (CaCl ₂)	P res	S	K	Ca	Mg	V
				mmolc dm ⁻³					
0	linha	0 a 10	5,9 Aa	12,7 Aa	9,0 ^{ns}	0,7 Aa	29,5 Aa	12,5 Aa	71,6 Aa
		10 a 20	5,7 Ab	10,5 Ab	10,8 ^{ns}	0,5 Ab	27,3 Ab	11,0 Ab	66,4 Ab
	entrelinha	0 a 10	5,8 Aa	12,3 Aa	11,0 ^{ns}	0,6 Ba	27,3 Aa	12,0 Aa	68,6 Aa
		10 a 20	5,6 Ab	11,3 Ab	6,8 ^{ns}	0,4 Bb	25,5 Ab	11,8 Ab	65,6 Ab
65	linha	0 a 10	5,7 Aa	9,8 Aa	6,5 ^{ns}	0,9 Aa	24,5 Aa	12,5 Aa	67,7 Aa
		10 a 20	5,5 Ab	9,3 Ab	4,5 ^{ns}	0,7 Ab	23,8 Ab	12,0 Ab	61,1 Ab
	entrelinha	0 a 10	5,8 Aa	12,0 Aa	6,5 ^{ns}	0,6 Ba	25,8 Aa	12,0 Aa	69,3 Aa
		10 a 20	5,5 Ab	9,0 Ab	8,5 ^{ns}	0,5 Bb	23,5 Ab	11,0 Ab	62,1 Ab
130	linha	0 a 10	5,8 Aa	10,5 Aa	8,0 ^{ns}	1,6 Aa	25,0 Aa	11,8 Aa	70,2 Aa
		10 a 20	5,6 Ab	9,5 Ab	7,0 ^{ns}	1,3 Ab	22,8 Ab	11,5 Ab	65,4 Ab
	entrelinha	0 a 10	5,7 Aa	11,0 Aa	7,7 ^{ns}	0,9 Ba	26,0 Aa	12,3 Aa	68,2 Aa
		10 a 20	5,5 Ab	9,3 Ab	6,8 ^{ns}	0,5 Bb	21,7 Ab	11,3 Ab	63,0 Ab
260	linha	0 a 10	5,8 Aa	10,5 Aa	5,0 ^{ns}	1,8 Aa	24,8 Aa	12,5 Aa	70,0 Aa
		10 a 20	5,6 Ab	10,3 Ab	5,8 ^{ns}	1,4 Ab	22,3 Ab	11,3 Ab	65,2 Ab
	entrelinha	0 a 10	5,8 Aa	9,5 Aa	6,0 ^{ns}	1,1 Ba	25,5 Aa	12,0 Aa	66,0 Aa
		10 a 20	5,5 Ab	8,5 Ab	6,3 ^{ns}	0,9 Bb	22,3 Ab	11,5 Ab	62,4 Ab
C.V. %			4,6	8,4	14,4	9,5	6,9	11,4	9,1

Letras maiúsculas referem-se à comparação entre os as posições de amostragem (linha ou entrelinha) numa mesma dosagem de K_2O e as minúsculas comparam médias das camadas (0,0-0,1 ou 0,1-0,2) dentro da mesma posição amostrada. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%. CV (%) = coeficiente de variação.

O pH, o V% e o Mg do solo não variaram significativamente ($p < 0,01$) com o incremento de K_2O no solo e nem com a posição de amostragem, mas variaram significativamente entre as camadas avaliadas, conforme se pode observar na Tabela 4.4.12.

O aumento de K_2O na adubação promoveu variação significativa ($p < 0,01$) de K no solo (Figura 4.4.16a). Houve diferença significativa de K no solo entre as camadas estudadas e também na posição de amostragem (linha e entrelinha), mas a interação entre elas não foi significativa. O K no solo na posição da linha ascendeu de acordo com modelo quadrático para as doses estudadas.

A concentração de Ca no solo respondeu significativamente ($p < 0,01$) ao incremento de K_2O na adubação segundo modelos quadráticos negativos; e com diferença significativa entre as camadas avaliadas e não significativa para a posição de amostragem (Figura 4.4.16b).

Figura 4.4.16. Concentração de potássio (a), cálcio (b) e enxofre (c) no solo do experimento de campo com doses de K_2O em 2 camadas (0,0 a 0,10 m e 0,10 e 0,20 m) e em duas posições (linha e entrelinha da cultura).

Deon (2007) afirmou que as maiores concentrações de K na solução nutritiva podem causar a redução da concentração foliar de Ca na soja, o que pode ser responsável por desordens nutricionais em alguns casos. Xu et al. (2006) sugeriam que as células de plantas podem requerer Ca^{2+} em condições de deficiência de K^+ .

4.5. Conclusões

A produtividade dos híbridos de milho é afetada pelas doses de N ou de K aplicadas. Em todos os híbridos estudados, a aplicação de N ou K_2O na adubação promove aumento na concentração destes nutrientes no tecido foliar, implicando em respostas quadráticas na produtividade de grãos. A produtividade apresenta diferenças entre os híbridos, sendo superior para o H2.

A aplicação crescente de adubação nitrogenada altera os teores de P, K, Ca e Mg do solo. O incremento de K_2O na adubação contribui para aumentar a concentração de K no solo e redução da concentração de Ca no solo.

A aplicação de doses de N ou de K interfere na eficiência uso, de recuperação e interna de tais nutrientes nos híbridos estudados.

5. REFERÊNCIAS

- ADAMI, M.; PINHEIRO, E. S.; MOREIRA, M. A. Aplicação de diferentes algoritmos para a classificação de imagens etm+/landsat- 7 no mapeamento agrícola. in: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE PERCEPCIÓN REMOTA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN ESPACIAL, 10., Cochabamba. Anais... Bolívia, 2002.
- AKRAM, M. Effect of potassium nutrition on solute accumulation, ion composition and yield of maize hybrids grown under saline conditions. *Journal of Plant Nutrition*, v.36, p.143–163, 2013.
- ALVAREZ, C.G.D; PINHO, R.G.V.; BORGES, I.D. Avaliação de características agronômicas e de produção de forragem e grãos de milho em diferentes densidades de semeadura e espaçamentos entre linhas. *Ciência e Agrotecnologia*. Lavras, v.30, n.3, p.402-408, 2006.
- ÁLVAREZ-FERNÁNDEZ, A.; GARCÍA-MARCO, S.; LUCENA, J. J. Evaluation of synthetic iron (III)-chelates (EDDHMA/Fe³⁺) and the novel EDDHSA/Fe³⁺ to correct iron chlorosis. *European Journal of Agronomy*, v.22, p.119-130, 2005.
- AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J. Estimativa da adubação nitrogenada para o milho em sistemas de manejo e culturas de cobertura do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Viçosa, v.24, n.3, p.553-560, 2000.
- AMARAL FILHO, J.P.R.; FORNASIERI FILHO, D.; FARINELLI R.; BARBOSA, J.C. Espaçamento, densidade populacional e adubação nitrogenada na cultura do milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Viçosa, v.29, n.3, p.467-473, 2005.
- ARAÚJO, F. F.; TIRITAN, C. S.; PEREIRA, H. M.; CAETANO JÚNIOR, O. Desenvolvimento do milho e fertilidade do solo após aplicação de lodo de curtume e fosforita. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande, v.12, n.5, p.507-511, 2008.
- ARGENTA, G; SILVA, P.R.F., MIELNICZUK, J.; BORTOLINI, C.G. Parâmetros de planta como indicadores do nível de nitrogênio na cultura do milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. Brasília, v.37, n.4, p.519-527, 2002.
- AREF, F. Evaluation of application methods and rates of zinc and boron on nitrogen, phosphorus and potassium contents of maize leaf. *Journal of Plant Nutrition*. v.35, p.1210-1224, 2012.
- ARNON, I. Mineral nutrition of maize. Bern: International Potash Institute, 1975. 452p.
- BAESSO, M.M. Análise do status de nitrogênio no feijoeiro utilizando análise de imagens. Viçosa, 2005, 66p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa.
- BAESSO, M. M.; PINTO, F. A. C.; QUEIROZ, D. M.; VIEIRA, L. B.; ALVES, E. A. Determinação do "status" nutricional de nitrogênio no feijoeiro utilizando imagens digitais coloridas. *Engenharia Agrícola*. Jaboticabal, v.27, n.2, p.520-528, 2007.

BALDOCK, J. O.; SCHULTE, E. E. Plant analysis with standardized scores combines DRIS and sufficiency range approaches for maize. *Agronomy Journal*. v.88, p.448–456, 1996.

BALKO, L. G.; RUSSELL, W. A. Effects of rates of nitrogen fertilizer on maize inbred lines and hybrid progeny. I. Prediction of yield response. *Maydica*, v.85, p.65-79, 1980.

BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. Método de análises química de plantas. Campinas: Instituto Agrônômico, 1983. 48 p. (Boletim Técnico, 78).

BATISTA, K., 2002. Respostas do capim-marandu a combinações de doses de nitrogênio e enxofre. Piracicaba. 91p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (USP).

BATISTA, K.; MONTEIRO, F.A. Nitrogen and sulphur in marandu Grass: relationship between supply and concentration in leaf tissues. *Scientia Agricola*, v.64, p.44-51, 2007.

BACKES, A. R.; BRUNO, O. M. Segmentação de texturas por análise de complexidade. *INFOCOMP*, v.5, n.1, p.87-95, 2006.

BACKES, A.R.; CASANOVA, D.; BRUNO, O.M. Plant leaf identification based on volumetric fractal dimension. *Int. J. Patt. Recogn. Artif. Intell.* v.23, p.1145, 2009.

BONFIM-SILVA, E.M; MONTEIRO, F.A. Nitrogen and sulphur in the fertilization and in diagnostic leaves and in degrading roots of signal grass (Nitrogênio e enxofre na adubação e em folhas diagnósticas e raízes do capim-braquiária em degradação). *Revista Brasileira de Zootecnia*. v.39, p.1641-1649, 2010.

BORKET, C.M.; SILVA, D.N.; SFREDO, G.J. Calibração de potássio nas folhas de soja em latossolo roxo distrófico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.17, p.227-230, 1993.

BRAGA, G. J. 2001. Resposta do capim-mombaça (*Panicum maximum* Jacq.) a doses de nitrogênio e intervalos de corte. Pirassununga. 121p. Dissertação (Mestrado) – FZEA (USP).

BRUNO, O. M. Paralelismo em visão natural e artificial. 2000. Tese (Doutorado) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000.

BRUNS, A.; EBELHAR, M.W. Nutrient uptake of maize affected by nitrogen and potassium fertility in a humid subtropical environment. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. v.37, p.275–293, 2006.

BULL, L.T. Influência da relação K/(Ca+Mg) do solo na produção de matéria seca e na absorção de potássio por gramínea e leguminosa forrageira. 1986. 107p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.

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

CASSMAN, K.G.; DOBERMANN, A.; WALTERS, D. Agroecosystems,nitrogen: use efficiency, and nitrogen management. *Ambio*. v.31, p.132–140, 2002.

CASSMAN, K.G.; DOBERMANN, A.; WALTERS, D.T.; YANG, H. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annual Review of Environment and Resources*. v.28, p.315–358, 2003.

CHEN, X.P.; CUI, Z.L.; VITOUSEK, P.M.; CASSMAN, K.G.; MATSON, P.A. Integrated soil-crop system management for food security. *Proc Natl Acad Sci USA*. v.108, p.6399–6404, 2011.

CHEN, X.; ZHANG, J., CHEN, Y.; LI, Q.; CHEN, F.; YUAN, L.; MI, G. Changes in root size and distribution in relation to nitrogen accumulation during maize breeding in China. *Plant Soil*. v.374, p.121–130, 2014a.

CHEN, Y.; XIAO, C.; CHEN, X.; LI Q.; ZHANG, J.; CHEN, F.; YUAN, L.; MI, G. Characterization of the plant traits contributed to high grain yield and high grain nitrogen concentration in maize. *Field Crops Research*. v.159, p.1–9, 2014b.

CIAMPITTI, I. A.; VYN T. J. A comprehensive study of plant density consequences on nitrogen uptake dynamics of maize plants from vegetative to reproductive stages. *Field Crops Research*. V.121, p.2–18, 2011.

CIAMPITTI, I.A.; VYN, T.J. Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: A review. *Field Crops Research*. v.133, p.48–67, 2012.

CLARKSON, D.T.; HANSON, J.B. The mineral nutrition of higher plants. *Annu. Rev. Plant Physiol*. v.31, p.239–298, 1980.

CLOVER, M.W.; MALLARINO, A.P. Corn and soybean tissue potassium content responses to potassium fertilization and relationships with grain yield nutrient management & soil & plant analysis. *Soil Science Society of America Journal*. v.77, p.630-642, 2013.

COELHO, A. M.; ALVES, V. M. C. Adubação fosfatada na cultura do milho. In: *Simpósio sobre fósforo na agricultura brasileira*, Piracicaba, 2003. *Anais*. Piracicaba, Potafos/Anda, 2003. 31p. CD-ROM.

COELHO, A.M. O potássio na cultura do milho. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T.L. Potássio na agricultura brasileira. Piracicaba: Associação brasileira para pesquisa da potassa e do fosfato (POTAFOS), 2005. p.611-658.

COELHO, A. M.; RIBEIRO, B. N.; RESENDE, F. A.; TEIXEIRA, G. K. P. Eficiência agrônômica do cloreto de amônio e bicarbonato de amônio como fontes de nitrogênio para a cultura do milho. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 26.; SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE A LAGARTADO-CARTUCHO, SPODOPTERA FRUGIPERDA, 2.; SIMPÓSIO SOBRE COLLETOTRICHUM GRAMINICOLA, 1., 2006, Belo Horizonte. *Anais*. Sete Lagoas: ABMS, Embrapa Milho e Sorgo, 2006. CD-ROM.

COELHO, A. M. Manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2007. 11 p. (Circular Técnica, 96).

COLOZZA, M.T. Rendimento e diagnose foliar dos capins aruana e mombaça cultivados em Latossolo Vermelho-Amarelo adubado com doses de nitrogênio. 1998. 127f. Tese (Doutorado

em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos. – v.1, n.3 (2013) – Brasília: Conab, 2013 - v. Mensal Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em 06 mar 2015.

CONGALTON, R.G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. Remote sensing thematic accuracy assessment: A compendium, n 37, p.35-46, 1991.

CONGALTON, R.G.; MEAD, R.A. A quantitative method to test for consistency and correctness in photo interpretation. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, v.49, p.69-74, 1983.

CONSOLMAGNO NETO, D. Combinações de doses de potássio e magnésio na produção e nutrição mineral do capim-Tanzânia. 2006. 82p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

DAGBENONBAKIN, G.D.; SRIVASTAVA, A.K.; GAISER, T.; GOLDBACH, H. Maize nutrient assessment in benin republic: case of upper ouémé catchment. Journal of Plant Nutrition. v. 36, p.587-606, 2013.

DEON, M.D. Crescimento e nutrição mineral da soja submetida a excesso de P, S, K, Ca e Mg em solução nutritiva. 2007. 71p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

DIKSHOORN, W., AND VAN WIJK, A. L. The sulphur requirements of plants as evidence by the sulphur-nitrogen ratio in the organic matter. Plant Soil.v. 26, p.129-157, 1967.

DOLAN L; DAVIES J. Cell expansion in roots. Curr. Opin. Plant Biol. v.7, p.33–39, 2004.

DUDA, R.O.H.P. Pattern classification, 2000, 654p.

DUVICK, D.N. Genetic progress in yield of United States Maize (*Zea mays* L.). Mydica v.50, p.193–202, 2005.

EBELHAR, S. A., KAMPRATH E.J.; MOLL, R. H. Effects on nitrogen and potassium on growth and cation composition of corn genotypes differing average ear number. Agronomy Journal, Madison, v.79, p.875–881, 1987.

ECHARTE, L., ROTHSTEIN, S., TOLLENAAR, M. The response of leaf photosynthesis and dry matter accumulation to nitrogen supply in an older and a newer maize hybrid. Crop Sci. 48, 656–665, 2008.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Recomendações técnicas para o cultivo do milho. 2.ed. Brasília: Serviço de Produção de Informação – SPI, 1996. 204p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, 1999. 412p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. Tecnologias de produção de soja: região central do Brasil 2005. Londrina Emprapa Soja, 2004. 239p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Milho – cultivares para 2012/2013. Embrapa milho e sorgo. 2012. Disponível em: <<http://www.cnpms.embrapa.br/milho/cultivares/index.php>>. Acesso em 20 setembro 2012.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos / Humberto Gonçalves dos Santos ... [et al.]. – 3 ed. rev. ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2013. 353 p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Cultivo do milho: Economia da Produção. Embrapa milho e sorgo. Sistema de produção. 2010. Disponível em: <http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_6_ed/economia.htm>. Acesso em 4 junho 2014.

EPSTEIN, E. Nutrição mineral das plantas: princípios e perspectivas. Trad. e notas de Malavolta, E. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. e Editora da Universidade de São Paulo, 1975. 341p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas. Trad. Nunes, M.E.T. Londrina: Editora Planta, 2006. 403p.

FAGERIA, V.D. Nutrient interactions in crop plants. Journal of Plant Nutrition, New York, v.24, p.1269-1290, 2001.

FANCELLI, A. L. Plantas alimentícias: guia para aulas, estudo e discussão. Piracicaba: Centro Acadêmico “Luiz de Queiroz”, ESALQ/USP, Piracicaba, 1986. 131p.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. Produção de milho. Guaíba, Ed. Agropecuária, 2000. 360p.

FANCELLI, A. L. Nutrição e adubação de milho. In: FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Milho. Manejo e produtividade**. Piracicaba: USP/ESALQ/LPV, p.60-97, 2009.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponível em: <<http://faostat.fao.org>>. Acesso em 9 fev. 2015.

FELICITY, V.; CROTTY, FYCHAN, R.; THEOBALD, V.J.; SANDERSON, R.; CHADWICK, D.R.; MARLEY, C.L. The Impact of Using Alternative Forages on the Nutrient Value within Slurry and Its Implications for Forage Productivity in Agricultural Systems. Plos One. v.9, 2014.

FIELD, C. B., CAMPBELL, J. E., LOBELL, D. B. Biomass energy: the scale of the potential resource. Trends Ecol. Evol. v.23, p.65–72, 2008.

FIGUEIRA, S. R. Os programas de álcool como combustível nos EUA, no Japão e na União Européia e as possibilidades de exportação do Brasil. Piracicaba, 2005. 245p. Tese (Doutorado) – Escola Superior Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

FODOR, N.; CSATHÓ, P.; ÁRENDÁS, T.; RADIMSZKY, L.; NÉMETH, T. FODOR, N.; CSATHÓ, P.; ÁRENDÁS, T.; RADIMSZKY, L.; NÉMETH, T. Crop nutrient status and nitrogen, phosphorus, and potassium balances obtained in field trials evaluating different fertilizer recommendation systems on various soils and crops in Hungary. Communications in Soil Science and Plant Analysis. v.44, p.996–1010, 2013.

FOLONI, J.S.S.; ECHER, F.R.; CRESTE, J.E.; VILASBOAS, G.A. Ureia e nitrato de amônio via pulverização foliar no trigo. *Cultura Agronômica*. v.18, p.83-94, 2009.

FONSECA, I. M.; PRADO, R. M.; ALVES, A. U.; GONDIM, A. R. O. Crescimento e nutrição do sorgo (BR304) em solução nutritiva. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v.8, p.113-124, 2008.

FONTES, P. C. R. Diagnóstico do estado nutricional das plantas. Viçosa: Editora UFV (Universidade Federal de Viçosa), 2004. 122p.

FONTES, P. C. R.; DIAS, E. N.; GRAÇA, R. N. Acúmulo de nutrientes e método para estimar doses de nitrogênio e de potássio na fertirrigação do pimentão. *Horticultura Brasileira*. Brasília, v.23, n.2, p.275-280, 2005.

FORNASIERI FILHO, D. A cultura do milho. Jaboticabal: FUNEP, 1992. 273p.

GAMBOA, A. La fertilizacion del maíz. Berna, Instituto Internacional de la Potassa, 1980. 72p. (Boletim IIP, 5).

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. Digital Image Processing. Addison-Wesley Publishing Company, 1993. 716p.

GRIGNANI, G., ZAVATTARO, L., SACCO, D., MONACO, S. Production, nitrogen and carbon balance of maize-based forest systems. *Eur. J. Agron.* 26, 442–453, 2007.

GUIMARÃES, T.G.; FONTES, P.C.R.; ROBERTO, P.; PEREIRA, G.; ALVAREZ, V.H.; MONNERAT, P.H. Teores de clorofila determinados por medidor portátil e sua relação com formas de nitrogênio em folhas de tomateiro cultivados em dois tipos de solo. *Bragantia*. Campinas, v.58, n.01, p.209-216, 1999.

IZSÁKI, Z. Effect of nitrogen supply on nutritional status of maize. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. v.40, p.960–973, 2009.

HAN, Y.J.; HAYES, J.C. Soil cover determination by image analysis of textural information. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.33, n.2, p.681-686, 1990.

HAVLIN, J. L.; BEATON, J.D.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. Soil Fertility and Nutrient Management: An Introduction to Nutrient Management. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall. 2005.

HEINRICHS, R.; MOREIRA, A.; FIGUEIREDO, P. A. M.; MALAVOLTA E. Atributos químicos do solo e produção do feijoeiro com a aplicação de calcário e manganês. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Viçosa, v.32, n.3, p.1157-1164, 2008.

HINSINGER, P.; BRAUMAN, A.; DEVAU, N.; GÉRARD, F.; JOURDAN, C.; LACLAU, J.; CADRE, E.L.; JAILLARD, B.; PLASSARD, C. Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail. *Plant Soil*. v.348, p.29–61, 2011.

HOAGLAND, D.R.; ARNON, D. I. The water culture method for growing plants without soils. Berkeley: California Agricultural Experimental Station, 1950. 347p.

HORN, D.; ERNANI, P.R.; SANGOI, L.; SCHWEITZER, C.; CASSOL, P.C. Nutrient uptake kinetics and morphological traits of roots of maize cultivars with contrasting genetic variability (Parâmetros cinéticos e morfológicos da absorção de nutrientes em cultivares de milho com variabilidade genética contrastante). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v.30, p.77-85, 2006.

HUBERT, B.; ROSENGRANT, M.; VAN BOEKEL, M. The future of food: scenarios for 2050. *Crop Science*. v.50, p.S33-S50, 2010.

HUDSON, W.D.; RAMM, C.W. Correct formulation of the Kappa coefficient of agreement. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v.53, n.4, p.421-422, 1987.

KHANAL, S.; ANEXA, R.P.; GELDERC, B.K.; WOLTER, C. Nitrogen balance in Iowa and the implications of corn-stover harvesting. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. v.183, p.21-30, 2014.

KHATTREE; R.; MAIK, D.N. Multivariate data reduction and discrimination with SAS software. Cary, NC: SAS Institute Inc., 2000.

KURWAKUMIRE, N.; CHIKOWO, R.; MTAMBANENGWE F.; MAPFUMO, P.; SNAPP, S.; JOHNSTON, A.; ZINGORE, S. Maize productivity and nutrient and water use efficiencies across soil fertility domains on smallholder farms in Zimbabwe. *Field Crops Research*. v.164, p.136-147, 2014.

LEMAIRE, G.; JEUFFROY, M.H., GASTAL, F. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage Theory and practices for crop N management. *European Journal of Agronomy*. v.28, p.614-624, 2008.

LEIGH, R.A.; WYN JONES R.G. A hypothesis relating critical potassium concentrations for growth to the distribution and functions of this ion in the plant cell. *New Phytol*. v.97, p.1-13, 1984.

LORDKAEW, S.; DELL, B., JAMJOD, S.; RERKASEM, B. Boron deficiency in maize. *Plant Soil*. v.342, p.207-220, 2011.

JU, X.T.; XING, G.X.; CHEN, X.P.; ZHANG, S.L.; ZHANG, L.J.; LIU, X.J.; CUI, Z.L.; YIN, B.; CHRISTIE, P.; ZHU, Z.L.; ZHANG, F.S. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. *Proc Natl Acad Sci USA*. v.106, p.3041-3046, 2009.

MALAVOLTA, E. Manual de nutrição de plantas. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.

MALAVOLTA, E.; CROCOMO, O. J. O potássio e a planta. In: POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, Londrina, 1982. Anais, Piracicaba, Instituto Da Potassa e Fosfato: Instituto Internacional da Potassa, p.95-162, 1982.

MALAVOLTA, E.; MORAES; M.F. Fundamentos do nitrogênio e do enxofre na nutrição mineral de plantas cultivadas. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S.; VITTI, G.C (Ed.). Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira. Piracicaba: Internacional Plant Nutrition Institute – Brasil, 2007. p.189-249.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas. Princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319p.

MALLARINO, A.P.; HIGASHI, S.L. Assessment of potassium supply for corn by analysis of plant parts. *Soil Science Society of America Journal*. v.73, p.2177-2183, 2009.

MALVESTITI, G.S. Adubação de nitrogênio, fósforo e potássio e custo de produção de milho convencional e geneticamente modificado. Pirassununga, 2013, 95p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo.

MANJUNATH B S AND MA W Y. Texture features for browsing and retrieval of image data. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* v.18(8), p.837-842, 1996.

MARIN, M. A. Sistema de visão artificial para a diagnose nutricional de ferro, boro, zinco e cobre em plantas de milho. Pirassununga, 2012, 127p. Dissertação de mestrado – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo.

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. New York: Academic Press, 1995. 874p.

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. 3.ed London: Elsevier, 2012. 643p.

MATTOS, W.T.; MONTEIRO, F.A. Produção e nutrição de capim-braquiária em função de doses de nitrogênio e enxofre. *Boletim de Indústria Animal*, v.60, p.1-10, 2003.

MEENA, M.D.; TIWARI, D.D.; CHAUDHARI, S.K.; BISWAS, D.R.; NARJARY, B.; MEENA, A.L.; MEENA, B.L.; MEENA, R.B. Effect of biofertilizer and nutrient levels on yield and nutrient uptake by maize (*Zea mays* L.). *Annals of Agri-Bio Research*. v.18 (2), p.176-181, 2013.

MEGDA, M.M. Suprimento de nitrogênio e potássio e características morfogênicas, nutricionais e produtivas do capim-Marandu. Dissertação (Mestrado). – ESALQ. Piracicaba, 2009.

MENDELSON, R.; NORDHAUS, W.; SHAW, D. The impact of global warming on agriculture: a Richardson analysis. *American Economic Review*. v.84, p.753–771, 1994.

MENGEL, K; KIRKBY, E.A. Principles of plant nutrition. 5th ed. Dordrechth: Kluwer Academic Publishers, 2001. 849p.

MEROTTO JUNIOR, A.; ALRNEIDA, M.L.; FUCHS, O. Aumento do rendimento de grãos de milho através do aumento da população de plantas. *Ciência Rural*. v.27, n.4, 1997.

MEYER, G.E.; STEPANEK, D.P.S.; DICKEY, E.C. Electronic image analysis of crop residue cover on soil. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.31, n.3, p.968-973, 1988.

MINJIAN C.; HAIQIU Y.; HONGKU, Y.; CHUNJI, J. Difference in tolerance to potassium deficiency between two maize inbreds lines. *Plant Prod. Science*. v.10 (1), p.42-46, 2007.

MOLL, R.H.; KAMPRATH, E.J.; JACKSON, W.A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agronomy Journal*. v.74, p.562–568, 1982.

MONTEIRO, F. A.; CARRIEL, J. M. Aplicação de níveis de enxofre na forma de gesso para o cultivo de capim-colonião em dois solos arenosos do Estado de São Paulo. *Boletim de Indústria Animal*. v.44, p.335-347, 1987.

MONTEIRO, F. A., COLOZZA, M. T., AND WERNER, J. C. Enxofre e micronutrientes em pastagens. In: Pedreira C G S, Moura J C, Faria V P (Org.) *Fertilidade do solo para pastagens produtivas*. Piracicaba - SP: FEALQ, p. 279-301, 2004.

NEVES, O.S.C.; CARVALHO, J.G.; MARTINS, F.A.D.; PÁDUA, T.R.P; PINHO, P.J. Use of SPAD-502 in the evaluation of chlorophyll contents and nutritional status of herbaceous cotton to nitrogen, sulphur, iron and manganese (Uso do SPAD-502 na avaliação dos teores foliares de clorofila, N, S, Fe e Mn do algodoeiro herbáceo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. v.40, p.517-521, 2005.

NIU, J.; ZHANG, W.; RU, S.; CHEN, X.; XIAO, K; XIYING, Z.; ASSARAF, M.; IMAS, P.; MAGEN, H.; ZHANG, F. Effects of potassium fertilization on winter wheat under different production practices in the North China Plain. *Field Crops Research*. v.140, p.69-76, 2013.

NIU, J.; ZHANG, W.; CHEN, X.; LI, C.; ZHANG, F.; JIANG, L.; LIU, Z.; XIAO, K.; ASSARAF, M.; IMAS, P. Potassium fertilization on maize under different production practices in the North China plain. *Agronomy Journal*. v.103, p.822-829, 2011.

NUSS, E.T.; TANUMIHARDJO, S.A. Maize: a paramount staple crop in the context of global nutrition. *Compr Rev Food Sci F*. v.9, p.417–436, 2010.

OLIVEIRA, A.R.; OLIVEIRA, S.A.; GIORDANO, L.B.; GOEDERT, W.J. Nutrient uptake and response to fertilization of tomato inbred lines (Absorção de nutrientes e resposta à adubação em linhagens de tomateiro). v.27, p.498-504, 2009.

OLIVEIRA, F.A.; CARMELLO, Q. A. C.; MASCARENHAS, H.A.A. Potassium availability and its relation to calcium and magnesium in greenhouse cultivated soybean (Disponibilidade de potássio e suas relações com cálcio e magnésio em soja cultivada em casa-de-vegetação) *Scientia Agricola*. v.58, p.329-335, 2001.

PAPONOV, I.A.; ENGELS, C. Effect of nitrogen supply on leaf traits related to photosynthesis during grain filling in two maize genotypes with different N efficiency. *J Plant Nutr Soil Sci*. v.166, p.756–763, 2003.

PAULETTI, V. *Plantio direto: atualização tecnológica*. São Paulo: Fundação Cargil, 1998.

PAVINATO, P.S.; CERETTA, C.A.; GIROTTO, E; MOREIRA, I.C.L. Nitrogênio e potássio em milho irrigado: análise técnica e econômica da fertilização. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.38, p.358-364, 2008.

PEDREIRA, B. C.C.G.; SANTOS R. F. dos. Avaliação das escalas de 1:25.000 e 1:100.000 em mapeamentos orientados a planejamentos ambientais. *Caderno de Informações Georreferenciadas*. v.1, n.3, 1999.

PENG, Y., YU, P.; LI, X.; LI, C. Determination of the critical soil mineral nitrogen concentration for maximizing maize grain yield. *Plant Soil*. v.372, p.41–51, 2013.

PENG, S.; GARCIA, F.V.; LAZA, R.C.; CASSMAN, K.G. Adjustment for specific leaf weight improves chlorophyll meter's estimate of rice leaf nitrogen concentration. *Agronomy Journal*. v.85, p.987–990, 1993.

PETTIGREW, W.T. Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton. *Physiol. Plant*. v.133, p.670–681, 2008.

PLANK, C. O. Soil test handbook for Georgia. Athens, university of Georgia, 1989. 316p.

PRABHU, A. S.; FAGERIA, N. D.; HUBER, D. M.; RODRIGUES, F. A. Potassium and plant disease. In: *Mineral Nutrition and Plant Disease*, eds. L. E. Datnoff, W. H. Elmer, and D. M. Huber, pp. 57–78. St. Paul, MN: APS Press. 2007.

PREMAZZI, L.M.; MONTEIRO, F.A. Produção do capim-Tifton 85 submetido a doses e épocas de aplicação de nitrogênio após o corte. *B. Ind. Animal*, 59:1-16, 2002.

PUNAM, K. S.; UDUPA, J. K. Optimum image thresholding via class uncertainty and region homogeneity. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Los Alamitos, v.23, n.7, p.689-706, 2001.

RAIJ, B. van. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba: POTAFOS, 1991. 343p.

RAIJ, B. van. Fertilidade do solo e manejo de Nutrientes. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute – IPNI, 2011. 420p.

RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H. Cereais. In: RAIJ, B.van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Eds). *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. 2. Ed.rev. Campinas: IAC. 1996. (IAC Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B. van.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (Ed.). *Análise química para avaliação da fertilidade do solo*. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p.

RAMBO, L.; SILVA, P. R. F.; ARGENTA, G.; SANGOI, L. Parâmetros de planta para aprimorar o manejo da adubação nitrogenada de cobertura em milho. *Ciência Rural*. Santa Maria, v.34, n.5, p.1637-1645, 2004.

REGO, T. J., SAHRAWAT, K. L., WANI, S. P., PARDHASARADHI, G. Widespread deficiencies of sulfur, boron, and zinc in indian semi-arid tropical soils: on-farm crop responses. *J. Plant. Nutr.* 30:1569–1583, 2007.

REIS, A.R.; FURLANI JUNIOR, E.; BUZETTI S.; ANDREOTTI, M. Metodologia e técnicas experimentais diagnóstico da exigência do cafeeiro em nitrogênio pela utilização do medidos portátil de clorofila. *Bragantia*. Campinas, v.65, n.1, p.163-171, 2006.

REUTER, D. J.; ROBINSON, J. B. *Plant analysis: An interpretation manual*. Collingwood, Australia: CSIRO. 1997.

ROMHELD, V.; KIRKBY, E. A. Research on potassium in agriculture: Needs and prospects. *Plant & Soil*, v.335, p.155–180, 2010.

ROMUALDO, L.M. Utilização da visão artificial para diagnose nutricional de nitrogênio, fósforo, potássio e manganês em milho. Pirassununga, 2013, 150p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo.

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.

ROSENFELD, G. H.; FITZPATRICK, K. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. v.52, p. 223-227, 1986.

SADRAS, V.O.; LEMAIRE, G. Quantifying crop nitrogen status for comparisons of agronomic practices and genotypes. *Field Crops Research*. v.164, p.54–64, 2014.

SALEH, G.B.; MIN, T.D.; NOORDIN, W.D.; HALIM, R.A.; ANUAR, A.R. Spatial variability of soil and plant nutrients and their influence on maize grain yield. *Journal of Food, Agriculture and Environment*. v.8, p.1313-1325, 2010.

SALVADOR, J.M.; MOREIRA, A.; MURAOKA, T. Effect of combined omission of N, P, K and S on foliar macronutrient content of guava seedlings (Efeito da omissão combinada de N, P, K e S nos teores foliares de macronutrientes em mudas de goiabeira). *Scientia Agrícola*. v.56, p.501-507, 1999.

SANTOS, P.G.; JULIATTI, F.C.; BUIATTI, A.L.; HAMAWAKI, O.T. Avaliação do desempenho agrônomo de híbridos de milho em Uberlândia, MG. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. Brasília, v.37, n.5, p.597-602, 2002.

SARCINELLI, T. S.; RIBEIRO JR., E. S.; DIAS, L. E.; LYNCH, L. S. Sintomas de deficiência nutricional em mudas de *Acacia holosericea* em resposta à omissão de macronutrientes. *Revista Árvore*. Viçosa, v.28, n.2, p.173-181, 2004.

SCHACHTMAN, D.P.; SHIN, R. Nutrient sensing and signaling: NPKS. *Annu. Rev. Plant Biol.* v.58, p.47–69, 2007.

SCHERER, E. E. Potassium critical levels for soybean on a haplohumox soil in Santa Catarina. (Níveis críticos de potássio para a soja em latossolo húmico de Santa Catarina). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v.22, p.57-62, 1998.

SENA JÚNIOR, D.G.; PINTO, F.A.C.; GOMIDE, R.L; TEIXEIRA, M.M. Evaluation of automatic thresholding methods for images of *Spodoptera frugiperda* affected corn plants (Avaliação de métodos automáticos de limiarização para imagens de plantas de milho atacadas por *Spodoptera frugiperda*). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.7, p.359-366, 2003.

SENA JÚNIOR, D.G.; PINTO, F.A.C.; QUEIROZ, D.M.; MANTOVANI, E.C. Algorithm for classification of fall armyworm damaged corn plants on digital images (Algoritmo para classificação de plantas de milho atacadas pela lagarta do cartucho em imagens digitais). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.5, p.502-509, 2001.

SHEN, J.; LI, C.; MI, G.; LI, L.; YUAN, L.; JIANG, R.; ZHANG, F. Maximizing root/rhizosphere efficiency to improve crop productivity and nutrient use efficiency in intensive agriculture of China. *Journal of Experimental Botany*. v.64, p. 1181–1192, 2013.

SILVA, E.B.; TANURE, L.P.P.; SANTOS, S.R.; RESENDE JÚNIOR, P.S. Visual symptoms of nutrient deficiency in physic nut (Sintomas visuais de deficiências nutricionais em pinhão-mansão). *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. v.44, p.392-397, 2009.

SILVA, F. F. Sistema de visão artificial para a identificação da nutrição de milho submetido a níveis de cálcio, magnésio e enxofre. Pirassununga, 2011, 143p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo.

SILVA, F. F.; LUZ, P.H.C.; ROMUALDO, L.M.; MARIN, M.A.; ZUÑIGA, 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, 2014.

SILVEIRA, C. P., NACHTIGALL, G. R., AND MONTEIRO, F. A. Norms for the diagnosis and recommendation integrated system for Signal grass. *Scientia Agricola*. v.62, p. 513-519, 2005.

SMITH, F. W.; LONERAGAN, J. F. Interpretation of plant analysis: Concepts and principles. In *Plant analysis: An interpretation manual*, ed. D. J. Reuter and J. B. Robinson, 1–33. Collingwood, Australia: CSIRO, 1997.

SOLTANPOUR, P. N., M. J. MALAKOUTI, AND A. RONAGHI. Comparison of diagnosis and recommendation integrated system and nutrient sufficiency range for maize. *Soil Science Society Of America Journal*. v.59, p.133–139, 1995.

SOUSA G. G.; LACERDA, C. F.; CAVALCANTE, L. F.; GUIMARÃES, F. V. A.; BEZERRA, M. E. J.; SILVA, G. L. Nutrição mineral e extração de nutrientes de planta de milho irrigada com água salina. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n.11, p.1143-1151, 2010.

SUMNER, M.E.; FARINA, M.P.W. Phosphorus interaction whith other nutrients and lime in field cropping systems. *Advances in Soil Science*. v.5, p.201-236, 1986.

SZCZERBA, M.W.; BRITTO, D.T.; KRONZUCKER, H.J. K⁺ transport in plants: Physiology and molecular biology. *Journal of Plant Physiology*. v.166, p.447-466, 2009.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. Porto Alegre: Artmed. 2009. 848p.

TEIXEIRA, E. F.; CICERO, S. M.; DOURADO NETO, D. Análise de imagens digitais de plântulas para avaliação do vigor de sementes de milho. *Revista Brasileira de Sementes*. Pelotas, v.28, n.2, p.56-61, 2006.

TOMAZ, M. A.; SILVA, S. R.; SAKIYAMA, N. S.; MARTINEZ, H. E. P. Efficiency of uptake, translocation and use of calcium, magnesium and sulphur in young *Coffea Arabica* plants under the influence of the rootstock (Eficiência de absorção, translocação e uso de Ca, Mg e S por mudas enxertadas de *Coffea arabica*). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v.27, p.885-892, 2003.

TSAY, Y.F.; HO, C.H.; CHEN, H.Y.; LIN, S.H. Integration of nitrogen and potassium signaling. *Annu. Rev. Plant Biol.* v.62, p.207–26, 2011.

ULRICH, A.; HILLS, F. J. Plant analysis as an aid in fertilizing sugar crops. Part I. Sugar beets. In: *Soil Testing and Plant Analysis*. 1973.

URANO, E. O. M.; KURIHARA, C. H.; MAEDA, S.; VITORINO, A. C. T.; GONÇALVES, M. C.; MARCHETTI, M. E. Avaliação do estado nutricional da soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. Brasília, v.41, n.9, p.1421-1428, 2006.

URIBELARREA, M.; CRAFTS-BRANDNER, S.J.; BELOW, F.E. Physiological N response of field-grown maize hybrids (*Zea mays* L.) with divergent yield potential and grain protein concentration. *Plant Soil*. v.316, p.151–160, 2009.

USHERWOOD, N. R. The role of potassium in crop quality. In: MUNSON, R. D. (ed). *Potassium in Agriculture*. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI. p.489-513, 1985.

VANCE, C.P.; UHDE-STONE, C.; ALLAN, D.L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytol.* v.157, p.423–447, 2003.

VARELLA, C.A.A.; PINTO, F.A.C.; QUEIROZ, D.M.; SENA JÚNIOR, D.G. Soil cover determination using image analysis and neural networks (Determinação da cobertura do solo por análise de imagens e redes neurais). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.6, p.225-229, 2002.

VIANA, E. M. Interação de nitrogênio e potássio na nutrição, no teor de clorofila e na atividade da redutase do nitrato em plantas de trigo. 2007. 95f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2007.

VIANA, E.M.; KIEHL, J.C. Rates of nitrogen and potassium on growth of wheat plants (Doses de nitrogênio e potássio no crescimento do trigo). *Bragantia*. v.69, p.975-982, 2010.

VITTI, G.C.; FAVARIN, J.L. In: FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. *Tecnologia da produção de milho*. Piracicaba: Publique, p.104-120, 1997.

WALWORTH, J., G. SOWER, A. POND, AND M. KILBY. 2005. Pecan leaf nutrition status. Paper presented at the Western Nutrient Management Conference, Salt Lake City, UT. Disponível em: <[http://isnap.oregonstate.edu/WERA 103/2005](http://isnap.oregonstate.edu/WERA%20103/2005)>. Acesso em 25 jan 2015.

WANG, Y.; WU, W.H. Potassium transport and signaling in higher plants. *Annual Review of Plant Biology*. v.64, p.451–76, 2013.

WITTEN, I. H.; FRANK, E.; HALL, M. A. *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques* (3rd ed.). Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA. 2011.

WU, L.; CHEN, X.; CUI, Z.; ZHANG, W.; ZHANG, F. Establishing a Regional Nitrogen Management Approach to Mitigate Greenhouse Gas Emission Intensity from Intensive Smallholder Maize Production. *Plos One*. v.9, p.1-11, 2014.

WU, L.; MA, W.; ZHANG, C.; WU, L.; ZHANG, W.; JIANG, R.; ZHANG, F.; CUI, Z.; CHEN, X. Current potassium-management status and grain-yield response of Chinese maize to potassium application. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. v.176, p.441–449, 2013.

WU, J.; WANG, D.; C.J. ROSEN, C.J.; BAUER, M.E. Comparison of petiole nitrate concentrations, SPAD chlorophyll readings, and QuickBird satellite imagery in detecting nitrogen status of potato canopies. *Field Crops Research*. Amsterdam, v.101, n.1, p.96-103, 2007.

WU Y, MA Z, WANG D, JIANG J. Analyses of contribution of maize improvement to yield increment in China. *Acta Agron Sin*. v.24, p.595–600, 1998.

YOST, M. A.; RUSSELLE, M. P.; COULTER J. A.; KING, R.P.; SHEAFFER, C.C.; KAISER, D. E. Potassium management during the rotation from alfalfa to corn. *Agronomy Journal*, Madison, v.103, p.1785-1793.

XU, J.; LI, H.D.; CHEN, L.Q.; WANG, Y.; LIU, L.L. A protein kinase, interacting with two calcineurin B-like proteins, regulates K^+ transporter AKT1 in Arabidopsis. *Cell*. v.125, p.1347–60, 2006.

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

ZHANG, F.S.; SHEN, J.B.; ZHANG, J.L.; ZUO, Y.M.; LI, L.; CHEN, X.P. Rhizosphere processes and management for improving nutrient use efficiency and crop productivity: implications for China. In: DL Sparks, ed, *Advances in agronomy*. San Diego: Academic Press. v.107, p.1–32, 2010.

ZHAO, D.; OOSTERHUIS, D. M.; BEDNARZ, C. W. Influence of potassium deficiency on photosynthesis, chlorophyll content, and chloroplast ultrastructure of cotton plants. *Photosynthetica*. v.39, p.103–109, 2001.