UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS

LILIANE MARIA ROMUALDO

**Utilização da visão artificial para diagnóstico nutricional de
nitrogênio, fósforo, potássio e manganês em milho**

Pirassununga-SP

2013

LILIANE MARIA ROMUALDO

**Utilização da visão artificial para diagnóstico nutricional de
nitrogênio, fósforo, potássio e manganês em milho**

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 Doutora em Zootecnia.

Área de Concentração: Qualidade e
Produtividade Animal

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique
de Cerqueira Luz

Versão corrigida após defesa

Pirassununga-SP

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

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

R767u Romualdo, Liliane Maria
Utilização da visão artificial para diagnose
nutricional de nitrogênio, fósforo, potássio e manganês
em milho / Liliane Maria Romualdo. -- Pirassununga,
2013.
150f.
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. *Zea mays* 2. Nutrição mineral 3. Sintomas de
deficiências 4. Visão computacional. I. Título.

A DEUS

Agradeço por mais uma etapa conquistada, e por não permitir que eu perdesse o equilíbrio frente às dificuldades.

Dedicatória

Aos meus pais, Rubens e Maria, que sempre incentivaram e apoiaram os meus estudos. O carinho, o amor, a dedicação e a educação que vocês me proporcionaram foram fundamentais para essa conquista.

Aos meus irmãos Rossana, Luciano e Alisson

À minha querida sobrinha e afilhada Iris

À minha querida amiga Fernanda, que compartilhou comigo todas as fases desta pesquisa, que me ajudou não somente na execução do trabalho, mas também na superação de todas as dificuldades encontradas.

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Pedro Henrique de Cerqueira Luz, pela orientação, oportunidade, confiança depositada, ensinamentos, auxílio e por proporcionar todas as condições para que esse trabalho pudesse ser desenvolvido.

À FZEA/USP pela oportunidade.

À FAPESP pela bolsa de Doutorado e Auxílio à Pesquisa.

Ao Prof. Valdo Rodrigues Herling pelas palavras de incentivo e colaboração nas dificuldades encontradas

Ao meu amigo Mário pela ajuda durante todas as fases deste trabalho

Aos funcionários e estagiários do laboratório das Agrárias, especialmente ao Marquinho, Lorena, Uanderson, Leonardo e Paulo, que nos ajudaram muito na execução desta pesquisa.

Aos estagiários que nos ajudaram na condução dos experimentos

À equipe do IFSC/USP, Prof. Odemir e Álvaro, pela oportunidade de desenvolver um trabalho multidisciplinar, e também pela ajuda durante a execução desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. William Natale e Marisa que me apoiaram e incentivaram muito para que eu viesse desenvolver o Doutorado aqui na FZEA/USP

Aos meus familiares que sempre torceram muito por mim

Cada lugar que passamos durante a nossa vida, deixamos um pouco de nós e levamos um pouco de cada um. Quero agradecer a cada um de vocês, por compartilharem comigo muitos momentos ao longo desses 4 anos, pela amizade, pelas palavras certas nos momentos certos, pela convivência, auxílio nas horas de dificuldade. A trajetória da vida nos direciona para outros caminhos, mas tenham a certeza de que foi ótimo conhecê-los, aprendi muito com vocês: Fernanda, Mário, Nancy, Viviane, Ana Billar, Débora, Bruna, Michelle, Gabriela, Glazi, Mariana, Celso, César, Uanderson, Hugo, Leonardo, Rodrigo, Margutti, Vanessa, Fábio, Glaucia, Vanessa Terra, Serginho, Letícia, Celi, João, Michele, Monalissa, Jéssica, Caramelo e Tiago.

Aos amigos Ana, Danilo, Juliana, Cíntia, Renata, Henrique, Amanda, Jacque, Luciane, Reload, Karina, Fabiana, Weber e Reinaldo que mesmo distantes sempre estiveram presentes.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar.

Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.

Madre Teresa de Calcutá

RESUMO

Romualdo, L. M. **Utilização da visão artificial para diagnóstico nutricional de nitrogênio, fósforo, potássio e manganês em milho.** 2013. 150f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2013.

Um sistema de visão artificial (SVA) para diagnose nutricional de milho, baseado em análise de imagens de folhas foi recentemente proposto pelo GCC-IFSC e Agrárias-FZEA/USP. O objetivo do estudo foi avaliar o estado nutricional do milho cultivado em casa de vegetação em solução nutritiva, com deficiência e suficiência nutricionais induzidas de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e manganês (Mn) utilizando visão artificial, e posteriormente em campo visando validar o diagnóstico pelo sistema de visão artificial desenvolvido. As doses dos nutrientes foram constituídas pela omissão, 1/5, 2/5 e a dose completa, combinadas em três estádios de desenvolvimento do milho (V4, V7 e R1), com quatro repetições. O experimento foi individual para cada elemento. Em cada época foram coletadas imagens de folhas indicativas do estádio (FI), folhas velhas (FV) para o N, P e K e folhas novas para o Mn, que foram primeiramente digitalizadas em 1200 dpi, e em seguida encaminhadas para serem analisadas quimicamente. Também foram avaliadas nas plantas, as variáveis biométricas (altura, diâmetro do colmo e número de folhas) e determinar as produções de massa seca da parte aérea e do sistema radicular, além da determinação dos teores de nutrientes. A omissão de N, P e K proporcionaram deficiências nutricionais características nas folhas do milho, quando cultivado em casa de vegetação. As modificações nas folhas do milho, com as doses dos nutrientes estudadas, possibilitaram a obtenção de imagens necessárias para o desenvolvimento do SVA, em casa de vegetação. A utilização das imagens da casa de vegetação para treinar o SVA visando à validação de imagens do campo, gerou confusão na interpretação, levando a erros de classificação, entretanto, o uso desta tecnologia para diagnose nutricional do milho, tanto em casa de vegetação, como no campo, é promissora.

Palavras-chave: *Zea mays*, Nutrição mineral, Sintomas de deficiências, Visão computacional.

ABSTRACT

Romualdo, L. M. **Use of the artificial vision for nutritional diagnosis of nitrogen, phosphorus, potassium and manganese in corn.** 2013. 150f. Ph.D. Thesis – College of Animal Science and Food Engineering, University of São Paulo, Pirassununga, 2013.

An artificial vision system (AVS) for nutrient diagnosis of corn, based on analysis of images of leaves was recently proposed by SCG-IFSC and Agrarian-FZEA/USP. The objective was evaluate the nutritional status of maize grown in a greenhouse in nutrient solution with induced nutritional deficiency and sufficiency of nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K) and manganese (Mn) using artificial vision, and correlate the results obtained with foliar analysis, and then the field in order to validate the diagnosis by artificial vision system developed. Doses of nutrients were established by omission, 1/5, 2/5 and full dose, combined into three developmental stages of corn (V4, V7 and R1), with four replications. The experiment was for each individual element. Images of leaves were collected in each epoch indicating the stage (FI), old leaves (FV) for N, P and K and Mn for new leaves, which were first scanned at 1200 dpi, then sent to be analyzed chemically. The biometric variables (height, stem diameter and number of leaves) were also evaluated, and the dry matter production of shoots and roots was determined, besides the determination of nutritional content. The omission of N, P and K caused typical nutrient deficiencies provided in the leaves of maize when grown in a greenhouse. The changes in the leaves of maize, with doses of nutrients studied, allowed the imaging necessary for training SVA in a greenhouse. The use of images of the greenhouse to train the SVA aiming to validate images of the field has led to confusion in the interpretation leading to errors of classification, however the use of this technology for nutrient diagnosis of corn, both in the greenhouse and in the field, is promising.

Keywords: *Zea mays*, Mineral Nutrition, Symptoms of deficiencies, Computer Vision.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1 Importância socioeconômica do milho.....	12
2.2 O milho.....	13
2.3 Avaliação do estado nutricional das culturas	14
2.4 Funções e sintomas de deficiências do N-P-K e Mn nas plantas	16
2.5 Sistema de visão artificial (SVA) para o estado nutricional do milho e o Projeto Tree vision system (TreeVis).....	19
2.6 Estudos relacionados com visão artificial na área agrônômica	21
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1 Local dos experimentos	25
3.2 Fase I (Casa de vegetação)	25
3.2.1 Descrição do protocolo experimental	25
3.2.2 Experimento com omissão de N.....	29
3.2.3 Experimento com omissão de K.....	31
3.2.4 Experimento com omissão de P	31
3.2.5 Experimento com omissão de Mn	32
3.2.6 Obtenção das imagens	32
3.2.7 Avaliações no material vegetal.....	34
3.3 Fase II (Campo)	35
3.3.1 Localização e período experimental	35
3.3.2 Caracterização da área experimental	35
3.3.3 Delineamento experimental e descrição dos tratamentos.....	36
3.3.4 Condução do experimento	37
3.3.5 Amostragem de folhas para análise de imagem e análise química.....	40
3.3.6 Amostragem para análise de solo	41
3.3.7 Componentes de produção.....	41
3.3.8 Obtenção das imagens	42
3.4 Análise de imagens pelo sistema de visão artificial	43
3.4.1 Imagens obtidas na Fase I (Casa de vegetação)	43
3.4.2 Imagens obtidas na Fase II (Campo)	47
As imagens das folhas obtidas no experimento do campo foram utilizadas para validação do sistema de visão artificial.	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1 Fase I – Nitrogênio (N).....	48
4.1.1 Sintomas visuais	48
4.1.2 Variáveis biométricas	52
4.1.3 Nitrogênio na planta	54
4.1.4 Interações entre nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e ferro (Fe)	58
4.1.5 Sistema de visão artificial para diagnose de nitrogênio	63
4.2 Fase I – Potássio (K).....	68

4.2.1 Sintomas visuais	68
4.2.2 Variáveis biométricas	71
4.2.3 Potássio na planta	73
4.2.4 Interações entre potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg)	77
4.2.5 Sistema de visão artificial (SVA) para diagnose de potássio	80
4.3 Fase I – Fósforo (P)	85
4.3.1 Sintomas visuais	85
4.3.2 Variáveis biométricas	90
4.3.3 Fósforo na planta	92
4.3.4 Interação entre fósforo (P), manganês (Mn) e zinco (Zn)	95
4.3.5 Sistema de visão artificial (SVA) para diagnose de fósforo.....	100
4.4 Fase I – Manganês (Mn).....	105
4.4.1 Sintomas visuais	105
4.4.2 Variáveis biométricas	106
4.4.3 Manganês na planta	107
4.4.4 Interação manganês (Mn), ferro (Fe) e zinco (Zn)	110
4.4.5 Sistema de visão artificial (SVA) para diagnose de manganês	114
4.5 Fase II - Campo	118
4.5.1 Teores de macro e micronutrientes nas folhas de plantas de milho	118
4.5.2 Componentes de produção.....	122
4.5.3 Validação do sistema de visão artificial (SVA).....	124
5. CONCLUSÃO.....	133
REFERÊNCIAS	134
APÊNDICE	146

1. INTRODUÇÃO

Cultivado de norte a sul do Brasil, com área plantada de aproximadamente 14 milhões de hectares e cerca de 70 milhões de toneladas produzidas, a cultura do milho se destaca como um dos principais cereais da agricultura brasileira e mundial (CONAB, 2013). O milho (*Zea mays* L.) em sistemas mais tecnificados, gera gasto com corretivos e fertilizantes que representam, em média, 40 a 45% do custo de produção. Portanto, há a necessidade de se estimar corretamente a quantidade de adubo que deve ser aplicada no solo ou via folha, com o intuito de satisfazer as necessidades da cultura.

Assim, o aprimoramento dos métodos para a identificação do estado nutricional das 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, têm levado à busca por novas tecnologias, seja dos pontos de vistas agrônomo, econômico, ambiental ou operacional.

Os nutrientes minerais têm funções essenciais e específicas no metabolismo das plantas. Dessa forma, quando um dos nutrientes não está presente em quantidades adequadas, a deficiência desse nutriente nas células promoverá alterações no seu metabolismo. Esses distúrbios geralmente revelam-se por meio de sintomas visíveis de deficiência, desde clorose e/ou necrose de folhas, crescimento reduzido ou outras anomalias (MALAVOLTA, 2006).

A avaliação do estado nutricional das plantas usualmente é feita por meio de análises químicas ou pela diagnose visual, esta última, sujeita a erros de interpretação, em razão da ocorrência simultânea de deficiências de vários nutrientes, às vezes associadas também ao ataque de pragas e à presença de doenças, além da subjetividade do avaliador, pois se trata de um parâmetro quantitativo. Por outro lado, a análise química das folhas, requer épocas ou estádios fenológicos específicos, que para as culturas anuais, praticamente torna impossível a tomada de medidas de manejo para a nutrição do cultivo em curso.

O uso de medidas biométricas das folhas, relacionadas à forma, área, textura e nervuras, dentre outras, fornecem informações quantitativas, objetivas e precisas, que podem ser empregadas em estudo de nutrição de plantas. Nesse contexto, o uso de métodos de visão computacional e modelos matemáticos podem contribuir para uma análise mais criteriosa das estruturas foliares, por meio de técnicas de aferição e extração de informações.

Um sistema de visão artificial é um sistema computacional, no qual métodos tentam interpretar e ou aferir uma imagem automaticamente ou semi-automaticamente. Nesse sentido, o desenvolvimento do SVA para diagnóstico do estado nutricional das culturas pode

ser uma ferramenta promissora para a diagnose do milho, detectando níveis de estresse nutricionais, que poderá permitir a melhoria no manejo da nutrição no próprio ciclo do cultivo, uma vez que essa tecnologia já apresentou resultados satisfatórios em casa de vegetação com os nutrientes: cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, ferro e zinco (SILVA, 2011; MÁRIN, 2012; ZÚÑIGA, 2012).

Desse modo, o objetivo da pesquisa foi avaliar o estado nutricional do milho (*Zea mays* L.) cultivado em casa de vegetação em solução nutritiva, com deficiência e suficiência nutricional induzida para doses de nitrogênio, fósforo, potássio e manganês utilizando visão artificial, e correlacionar os resultados obtidos com a análise química foliar, e posteriormente em campo visando validar o diagnóstico do sistema de visão artificial desenvolvido.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância socioeconômica do milho

A cultura do milho se destaca como uma das mais importantes na agricultura mundial, constituindo um dos principais produtos para o agronegócio, sendo utilizado com destaque na nutrição animal, tanto na forma *in natura*, como na forma de farelo, ração ou silagem (PINAZZA, 1993). Na alimentação humana é utilizado no preparo de mais de 500 derivados (NOGUEIRA JÚNIOR et al., 1987), sendo a base de complexos industriais diversificados, com acentuado fator socioeconômico para muitas regiões do mundo.

A produção mundial de milho encontra-se hoje por volta de 800 milhões de toneladas (AGRIANUAL, 2011). Desse total, 41,16% provém dos Estados Unidos (EUA), maior produtor, seguido da China com 19,16% e, do Brasil com 6,6%. Esses três países contribuem com aproximadamente 70% da produção mundial. O consumo mundial é estimado em cerca de 780 milhões de toneladas, dos quais 259 milhões são consumidas nos EUA, que também são os maiores exportadores desse cereal (AGRIANUAL, 2011).

No âmbito nacional, dos 135 milhões de toneladas de cereais produzidos, o milho representa 37% da produção, ocupando 27% das áreas cultivadas com grãos, ficando apenas atrás da soja. Segundo a previsão feita pela CONAB (2013) referente à safra 2012/2013, a produção estima-se em 72,2 milhões de toneladas, em uma área cultivada de aproximadamente 14,7 milhões de hectares, com produtividade média prevista de 4,9 toneladas por hectare. A produtividade da cultura vem crescendo em relação às safras anteriores, destacando a crescente chamada “safrinha”, que representa hoje cerca de 50% da produção nacional.

Os principais estados brasileiros produtores de milho em ordem decrescente em milhões de toneladas são: Paraná com 11,0; Mato Grosso com 7,3; Minas Gerais com 6,4; Goiás com 5,0; Rio Grande do Sul; Santa Catarina; São Paulo com produções variando entre 3,6 a 4,1 e Mato Grosso do Sul com aproximadamente três milhões de toneladas por ano (CONAB, 2010).

Apesar da crescente produtividade obtida nas lavouras de milho brasileiras, ainda assim estão aquém do potencial produtivo.

Diante desse contexto, o aumento da produtividade das áreas cultivadas requer o constante investimento em tecnologias envolvidas no sistema produtivo como o melhoramento genético, aumento da disponibilidade de nutrientes e técnicas de manejo que visam melhorar a fertilidade do solo (MARIN, 2012).

2.2 O milho

Originário da região do México, principal cereal produzido no mundo (AGRIANUAL, 2011), o milho (*Zea mays* L.) é uma gramínea tropical constituída por uma haste cilíndrica, com nós e entrenós compactos, cada nó abaixo do solo produz raízes e os nós, ao nível do solo ou imediatamente acima, podem produzir perfilhos e raízes-suporte ou adventícias. As folhas, que podem permanecer no seu estado normal ou desenvolvem-se para formar a inflorescência feminina, ou espiga, que são produzidas a partir dos nós acima do solo. O colmo termina na inflorescência masculina ou pendão. O sistema radicular do milho é típico das gramíneas, ou seja, fasciculado (FORNASIERI FILHO, 1992).

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.

Tabela 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.

2.3 Avaliação do estado nutricional das culturas

O diagnóstico do estado nutricional das culturas, usualmente, é realizado por meio de análises químicas de tecidos vegetais (diagnose foliar), análise de solo e pelos sintomas visuais (diagnose visual).

A diagnose foliar baseia-se na determinação do teor de nutrientes em amostras de folhas diagnósticas. No caso do milho, a folha abaixo e oposta à primeira espiga por ocasião do florescimento é a que melhor reflete o estado nutricional da cultura (MALAVOLTA et al., 1997). É um método que necessita de coleta das folhas em épocas específicas da vida da planta, requer preparo e análise química das folhas, o que implica em necessidade de tempo (análise no laboratório) e recursos financeiros (custo da análise). A maior parte dos erros cometidos na interpretação de análises químicas de plantas deve-se aos procedimentos de amostragem. Por causa dos vários fatores que atuam sobre a planta, esses procedimentos precisam ser padronizados da forma mais completa possível, a fim de que as variações de concentração que ocorrem dentro da planta, e mesmo por alguns efeitos exógenos como a sazonalidade e outros, tenham influência minimizada (GRASSI FILHO, 2008). Além disso, a interpretação correta dos resultados de uma análise química depende de muita experimentação visando o estabelecimento de índices de calibração que reflitam o estado nutricional da cultura.

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 ao teor no tecido em que 90% da máxima produção ou o crescimento ótimo é esperado (EPSTEIN; BLOOM, 2006).

A análise química do solo como ferramenta para a avaliação de sua fertilidade indica a capacidade do solo em oferecer à planta condições para crescer e produzir (MALAVOLTA, 2006). E, este é o método mais utilizado para o manejo das práticas de correção e adubações das culturas, que consiste basicamente em dois passos: extração do elemento disponível e determinação quantitativa do meio.

A diagnose visual fundamenta-se no conhecimento dos sintomas exibidos pelas plantas quando um determinado nutriente se encontra em quantidade insuficiente ou em excesso. Nesse caso, compara-se o aspecto da folha (ou outros órgãos) da planta, com um padrão pré-definido. A amostra pode ser uma planta ou um conjunto de plantas. Já o padrão significa uma planta ou um conjunto de plantas “normais” do ponto de vista da sua nutrição cultivadas em condições controladas, com os teores de nutrientes adequados para o seu desenvolvimento. Assim, a diagnose visual é um método de avaliação em que se analisam, em

períodos definidos da vida da planta, determinados órgãos, por exemplo, suas folhas, pois são elas que melhor refletem como regra geral, o estado nutricional da cultura, isto é, respondem mais à variação no suprimento dos elementos, seja pelo solo ou pelo adubo (BÜLL, 1993).

A identificação dos sintomas visuais de deficiências e excessos se baseia no princípio de que um dado elemento exerce a mesma função em todas as plantas, cultivadas ou não. Além disto, os sintomas aparecem preferencialmente nas folhas velhas ou novas, dependendo de o nutriente em questão ser realmente translocado na planta (mobilidade). No caso de elementos móveis que sofrem redistribuição, a sintomatologia deve ter severidade decrescente das folhas mais velhas (ou órgãos mais velhos) para os mais novos. No caso de elementos pouco móveis ou imóveis, os sintomas são mais acentuados nas folhas novas (MALAVOLTA, 2006).

Quando ocorre deficiência ou excesso, as duas folhas de um par ou folhas sucessivas devem apresentar o sintoma típico, formando uma simetria. Esta observação, assim como a mobilidade dos elementos ajuda a distinguir os sintomas de falta ou de excesso de nutrientes dos causados por pragas e doenças. Assim, a diagnose baseada em sintomas visíveis requer uma experiência do avaliador, uma vez que no campo podem ocorrer deficiências de outros nutrientes simultaneamente (MALAVOLTA et al., 1989).

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 V18 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.

Os nutrientes mais exigidos pelo milho são o nitrogênio (N) e o potássio (K), vindo em seguida o fósforo (P), o cálcio (Ca) e o magnésio (Mg) (COELHO et al., 2006; PINHO et al., 2009; SOUSA et al., 2010). O N e o P apresentam dois períodos de máxima absorção durante as fases de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo ou formação da espiga, e menores taxas de absorção no período compreendido entre a emissão do pendão e o início da formação da espiga (OLNESS; BENOIT, 1992). 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 nitrogênio 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 potássio (K), depois do N, é o nutriente que é absorvido em maiores quantidades e, requer um padrão de suprimento diferente em relação ao N e o P. 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 nitrogênio e fósforo, sugerindo maior necessidade de K na fase inicial como um elemento de "arranque" (COELHO, 2007; GAMBOA, 1980).

Com relação aos micronutrientes, as quantidades requeridas pelas plantas de milho são pequenas, no entanto, a deficiência ou o excesso podem afetar os processos metabólicos, semelhante à deficiência de um macronutriente (FAVARIN et al., 2008).

De acordo com Duarte et al. (2003) e Maggio (2006), o manganês (Mn) é o segundo micronutriente mais absorvido pelo milho. Antigamente, esse elemento mais se destacava pela sua toxicidade do que pela sua deficiência. Entretanto, com a tendência atual em aumentar o uso da aplicação de calcário e sua incorporação incorreta, muito superficial (0 a 10 cm), a situação está se invertendo e, em algumas lavouras em que o milho é cultivado na mesma área de soja, no sistema de rotação e sem o Mn nos programas de adubação, poderá apresentar problemas de deficiência (COELHO; FRANÇA, 1995).

Nas folhas de milho as faixas de teores totais adequados de macronutrientes, expresso em grama por quilograma (g kg^{-1}) são: 27-35 para o N, 1,9-4,0 para o P, 17-35 para o K, 3-10 para o Ca, 1,5-5,0 para o Mg e 1,5-3,0 para o S, e dos micronutrientes, expresso em miligrama por quilograma (mg kg^{-1}) são: 7-25 para o B, 6-20 para o Cu, 21-250 para o Fe, 20-200 para o Mn, 0,15-0,20 para o Mo e 15-100 para o Zn (RAIJ; CANTARELLA, 1996).

Já para Fancelli (2000), as faixas dos teores adequados para N, P, K, Ca, Mg e S são respectivamente: 30-40, 2,5-4,0, 20-40, 3-5, 1,7-4,5 e 1-2 em g kg^{-1} , e dos micronutrientes em mg kg^{-1} são: 17-30 para o B, 10-25 para o Cu, 50-250 para o Fe, 50-150 para o Mn, 0,15-0,20 para o Mo e 30-100 para o Zn.

2.4 Funções e sintomas de deficiências do N-P-K e Mn nas plantas

O nitrogênio (N) é constituinte de todos os aminoácidos, amidas, proteínas, ácidos nucleicos, nucleotídeos, poliamidas e citocromos, além de integrar a molécula de clorofila (EPSTEIN; BLOOM, 2006). Assim, plantas bem supridas de nitrogênio apresentam uma maior capacidade de sintetizar carboidratos durante a fotossíntese, resultando em maior acúmulo de biomassa. 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 nitrogênio no aumento

da produtividade está relacionado também ao aumento no comprimento da espiga e número de espiga por planta (BALCO; RUSSELL, 1980; EBELHAR et al., 1987).

Os sintomas de deficiência de N no milho iniciam-se com o amarelecimento das folhas, da ponta para base, em forma “V” invertido; secamento começando na ponta das folhas mais velhas e progredindo ao longo da nervura principal; necrose em seguida e dilaceramento (MALAVOLTA, 2006; PRADO; FRANCO, 2007; FERREIRA, 2012). As plantas ficam debilitadas, apresentam colmos finos, crescimento lento e metabolismo insuficiente, o que pode acarretar em maior suscetibilidade a patógenos e insetos-pragas (ZAMBOLIM; VENTURA, 1996; FANCELLI, 2008; PRADO; VIDAL, 2008; GONDIM et al., 2010). Visto que o N é um nutriente móvel na planta, os sintomas caminham gradualmente das folhas mais velhas para as folhas mais novas da planta, conhecida como “requeima” das folhas baixas. Ocorre morte prematura da planta e as espigas se apresentam pequenas e palhentas (COELHO et al., 2005; COELHO et al., 2006).

O fósforo (P) é o nutriente que tem papel-chave em todos os metabólicos relacionados com a aquisição, estocagem e utilização da energia: açúcares fosfatados, adenosinas fosfatadas e em nucleotídeos e ácidos nucleicos (EPSTEIN; BLOOM 2006). O suprimento inadequado de P nos estádios iniciais de desenvolvimento acarreta em redução no número de espigas por unidade de área e, em consequência, redução também na produção final de grãos (MENDEL; KIRBY, 1987). O crescimento do sistema radicular e, como reflexo, o desenvolvimento da parte aérea, também é influenciado pelo fósforo (ANDERSON et al., 1987). A deficiência de P geralmente aparece quando as plantas são muito jovens. Um sintoma inicial é a coloração púrpura avermelhada (“arroxamento”) das folhas velhas, devido ao acúmulo nos vacúolos do pigmento antocianina, que confere esta coloração ao limbo foliar. Esse acúmulo é muito comum em plantas submetidas à deficiência de P (EPSTEIN; BLOOM, 2006; PRADO; FRANCO, 2007; GAUTAM et al., 2011; FERREIRA, 2012). Os colmos ficam frágeis e delgados, improdutivos ou com espigas pequenas e torcidas (COELHO et al., 2002).

De acordo com Malavolta (2006), o potássio (K) é ativador enzimático de pouco mais de meia centena de enzimas envolvidas em rotas bioquímicas como translocação de açúcares, abertura e fechamento dos estômatos, regulação osmótica e fotossíntese. Segundo Mengel e Kirby (1987), o K é o mais importante soluto inorgânico em plantas que é osmoticamente ativa, sendo significativa no 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).

A deficiência mostra-se, inicialmente, como um amarelecimento e bronzeamento ao longo das margens das folhas velhas, movendo-se gradualmente em direção à nervura principal e as folhas novas da planta. Outro sintoma comum é uma mancha marrom escura nos nódulos, no interior do colmo, que pode ser revelada pelo corte longitudinal do mesmo (FERNANDES, 2006; FONSECA et al., 2008; YOST et al., 2011; FERREIRA, 2012). O tamanho da espiga não é tão afetado como na deficiência de N ou P, mas a extremidade dos grãos não se desenvolve e as espigas ficam com os grãos não compactamente enfileirados no sabugo. Como o K também é o maior responsável pelo uso eficiente da água, os efeitos da seca são mais pronunciados quando seu suprimento é inadequado (COELHO et al., 2005).

O manganês (Mn) atua como cofator e ativador para muitas enzimas-chave na síntese de metabólitos, no entanto, sua função mais importante está relacionada com os processos de oxi-redução na fotólise da água (reação de Hill) (DECHEN et al., 1991; MALAVOLTA, 2006). Além disso, ele tem sido citado como um micronutriente importante na defesa das plantas às doenças, exercendo importante papel na síntese de lignina e outros compostos fenólicos, estando associado às barreiras físicas e químicas da parede celular (MARSCHNER, 1995; MALAVOLTA et al., 1997).

A redistribuição de Mn na planta é lenta, de modo que os sintomas de deficiência surgem em folhas novas, apresentando clorose internerval, na forma de um reticulado grosso de nervuras e, em caso de carência severa do nutriente, aparecem no tecido faixas longas e brancas e o tecido da parte do meio da área clorótica pode necrosar e desprender-se (COELHO; FRANÇA, 1995; FERREIRA, 2012).

Segundo Wang (2003), o Mn absorvido é acumulado em três frações distintas na planta: na forma trocável, referente ao apoplasto, está adsorvida às cargas negativas na matriz péctica da parede celular; na forma lábil, associada ao Mn localizado no citoplasma; e na forma não-lábil, referente ao Mn depositado nos vacúolos. Estudando o fracionamento de manganês, Hernandes (2009) constatou que a maior parte desse micronutriente absorvido faz parte de outros compostos, exercendo funções específicas e não apenas totalmente livre nos tecidos (vacúolos).

2.5 Sistema de visão artificial (SVA) para o estado nutricional do milho e o Projeto Tree vision system (TreeVis)

O projeto TreeVis é um sistema computacional que está sendo pesquisado há cerca de dez anos pelo Grupo de Computação Científica (GCC) do Instituto de Física de São Carlos (IFSC-USP). Inicialmente, foi proposto com o objetivo de estudar e desenvolver técnicas de visão computacional capazes de extrair medidas biométricas de estruturas foliares de espécies arbóreas, funcionando como um herbário digital que fornecesse aos taxonomistas uma ferramenta capaz de armazenar, classificar e organizar dados científicos, a fim de realizar a identificação automática de espécies vegetais. Entretanto, segundo Plotze (2004), esse sistema pode também beneficiar outras áreas da ciência, como a fisiologia vegetal, citologia, paleobotânica, botânica, ecologia, entre outras.

Uma vez que os métodos atuais empregados para identificar possíveis deficiências nutricionais implicam em diagnósticos tardios, ou seja, quando o sintoma se torna visível ou detectável pela análise química dos tecidos, normalmente a produção já estará comprometida e a tomada de decisão para correções no cultivo em curso se torna inviável. O problema é ainda maior em culturas anuais como o milho, onde o tempo entre o aparecimento dos sintomas e o tempo hábil para a correção é muito estreito.

Além disso, podem ocorrer erros de interpretação nas avaliações, uma vez que o diagnóstico visual de sintomas de deficiências requer prática e habilidade do avaliador em discriminar sintomas nutricionais de outras injúrias que causam manchas foliares como pragas e doenças. Dentro desse contexto, e com base nas técnicas empregadas no TreeVis, surgiu a proposta de acrescentar um novo módulo de identificação do estado nutricional de milho, por meio da análise da superfície das folhas.

Um sistema de visão computacional ou artificial pode ser definido como um conjunto de métodos e técnicas, por meio de sistemas de computador, que são capazes de interpretar imagens (PUNAM et al., 2001). E são tipicamente constituídos pelas etapas: aquisição, segmentação de imagens, extração de características e classificação/identificação (BRUNO, 2000; GONZALEZ e WOODS, 1993). Na literatura há diversas taxonomias para os métodos de segmentação de imagens. No entanto, a mais tradicional é adotada por Gonzalez e Woods (1993), que define três categorias de segmentação: limiarização, segmentação baseada em bordas e segmentação baseada em regiões. Recentemente várias outras categorias são levadas em consideração. Dentre elas, estão os métodos baseados em cores (LIM; LEE, 1990; GONZALEZ et al., 1990; MOREIRA, 1999), os que utilizam redes neurais e lógica fuzzy (BEZDEK et al., 1999) e aqueles baseados em algoritmos genéticos (ANKENBRANDT et al.,

1990). O processo de segmentação é utilizado no sistema para separar a folha do fundo no processo de aquisição, para segmentar artefatos (ex: regiões danificadas das folhas) ou ainda áreas de interesse (padrões na imagens relacionados a falta de algum nutriente), ou seja, partes das folhas (Figura 1).

Figura 1 - Exemplo de processo de segmentação (BACKES et al., 2009).

A etapa da segmentação seleciona regiões da imagem para serem analisadas. A etapa de análises de imagens ou extração de características consiste de métodos capazes de aferir as regiões das imagens para sua caracterização. Uma análise preliminar das imagens demonstrou que os métodos utilizados poderão estar nos seguintes grupos: análise cromática e análise de textura, uma vez que cor e textura são os principais atributos visuais que apresentaram relações com a nutrição do milho (Figura 2).

Figura 2 - Exemplos de mudança na pigmentação de uma folha causada por diferentes deficiências nutricionais (COELHO; FRANÇA, 1995).

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; BRUNO, 2006).

A análise cromática é considerada as informações concernentes à cor. Dentre os métodos utilizados nesta categoria de segmentação, pode-se ressaltar a análise de histogramas cromáticos (SWAIN; BALLARD, 1991; CHENG et al., 2001), momentos cromáticos (STRICKER; ORENGO, 1995) e conjuntos de cores em mapeamentos (CHENG et al., 2001).

Com base nessas informações, Zúñiga (2012) desenvolveu um arcabouço computacional de visão artificial para diagnose foliar de macronutrientes no milho, desde a aquisição até a classificação de imagens, com resultados promissores na distinção de níveis de nutrientes em estágio inicial de desenvolvimento, sendo o melhor método Gabor Wavelets multiespectral e fractais, e concluiu que esse método superou outros testados em mais de 10% na taxa de acerto global de classificação.

Silva (2011) avaliou o SVA desenvolvido para avaliar o estado nutricional de milho cultivado em casa de vegetação em solução nutritiva com níveis induzidos de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) em plantas de milho. Com os resultados obtidos verificou-se que o SVA conseguiu identificar os sintomas de deficiência de Ca, Mg e S com uma taxa de acerto de 80, 75,5 e 78%, respectivamente, no estágio V4 do milho.

Marin (2012), no mesmo estudo de Zúñiga (2012) para os micronutrientes boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe) e zinco (Zn) em diferentes estádios de desenvolvimento do milho, também verificou resultados promissores na identificação de deficiência para esses elementos, com as melhores taxas de acertos nos estádios R1 para o Fe (77,5%), no estágio V4 para o B (81,7%), e V7 para o Zn (81,0%). Os resultados iniciais indicaram a possibilidade do SVA na detecção precoce de carências nutricionais em plantas de milho.

2.6 Estudos relacionados com visão artificial na área agrônômica

A aplicação e utilização de análise de imagens na agricultura têm crescido ultimamente. Diversos trabalhos têm demonstrado resultados promissores com o uso desta técnica.

Vooren e Heijden (1993) utilizaram análises de imagens para a determinação das dimensões de órgãos de uma planta. Na área da tecnologia de sementes, Vieira Júnior (1998) utilizou-se dessa técnica para definir parâmetros e procedimentos necessários, relativos à viabilização do emprego de um protocolo, para a determinação do comprimento e da largura de sementes de milho.

McDonald et al. (2000), utilizando scanners em avaliações de sementes e plântulas, constataram que a captação de imagens tem o potencial de melhorar a padronização de testes

em sementes. O processamento em sequência a captação incrementa métodos de análises, pois realiza a padronização de rotinas, informatizando-as.

Sena Júnior et al. (2001) desenvolveram um algoritmo de processamento e análise de imagens digitais para identificação de plantas de milho atacadas pela lagarta do cartucho, o qual consistiu em duas etapas de classificação dos objetos presentes em lavoura de milho. Na primeira etapa, denominada classificação grosseira, utilizou-se a técnica de limiarização em blocos de imagens com 60 x 60 pixels de dimensão e, na segunda, denominada classificação refinada, empregaram-se redes neurais artificiais em blocos de 3 x 3 pixels de dimensão. A exatidão de cada etapa do algoritmo foi acessada por meio da determinação da matriz de contingência, com base em 80 e 75 blocos, para a classificação grosseira e refinada, respectivamente. O algoritmo apresentou índice de exatidão de 80,74%.

Cícero e Banzatto Junior (2003) avaliaram os danos mecânicos e vigor em sementes de milho, onde as sementes foram examinadas individualmente em imagens ampliadas e capazes de indicar, com detalhes a área danificada, a localização e a extensão do dano. Por se tratar de método não destrutivo, as sementes em análise puderam ser submetidas a testes fisiológicos e, desta forma, permitiu o estabelecimento de relações entre os danos mecânicos e os prejuízos causados à qualidade.

Mondo e Cícero (2005) avaliaram a qualidade de sementes de milho localizadas em diferentes posições na espiga, examinando, com detalhes, a região danificada ou alterada, sua localização e extensão.

Sena Júnior et al. (2003) implementaram e avaliaram dois métodos automáticos de limiarização para identificação de plantas de milho atacadas pela lagarta do cartucho. Foram utilizadas imagens de plantas atacadas e não atacadas, em três épocas, correspondendo a diferentes dias após a infestação. As imagens processadas com o índice do excesso de verde normalizado foram limiarizadas, automaticamente, e comparadas com a limiarização manual das mesmas imagens. Os resultados obtidos revelaram que ambos os métodos têm potencial para serem utilizados em um sistema de identificação em plantas atacadas lagarta do cartucho, apresentando média acima de 99% de exatidão global.

Spósito et al. (2004) elaboraram uma escala diagramática, com o uso do software SIARCS, para avaliar a severidade da mancha preta em frutos cítricos. Para isto, coletaram-se imagens digitais de 50 frutos com ampla variação da severidade da doença. Os níveis mínimo e máximo de severidade foram determinados de acordo com a maior frequência observada de tecido doente nos frutos coletados. Essa pesquisa contribuiu bastante para melhorar a

precisão de avaliação da doença, de maneira a propiciar uma melhor estratégia de controle da doença em citrus.

Teixeira et al. (2006) utilizaram a técnica de análise de imagens digitais para a determinação do vigor de sementes associada ao teste de crescimento de plântulas de milho, possibilitando a análise dimensional de imagens com rapidez e precisão. Com os resultados, verificou-se que a técnica digital possibilita a associação dos dados obtidos no processamento à eventuais diferenças de vigor existentes em lotes de sementes de milho, de maneira similar a outros métodos destinados à avaliação do vigor de sementes da referida espécie.

Teixeira et al. (2007) desenvolveram em plataforma gráfica Scil-Image uma solução computacional orientada ao processamento do tamanho, com análise da largura e do comprimento de sementes de milho digitalizadas via leitura ótica em scanner, partindo-se de imagens de sementes de um mesmo cultivar. Os autores obtiveram um desempenho geral superior às expectativas com esse método, pois a dimensão das sementes foi analisada rapidamente, com tempos de processamento das imagens em torno de 3 segundos, partindo-se de imagens de 50 sementes.

Sena Júnior et al. (2008) estudaram estágios nutricionais na cultura do trigo proporcionados por doses de nitrogênio comparando o sistema de visão artificial com estimativas do teor de clorofila foliar (valores SPAD). Esses autores concluíram que a utilização de imagens digitais para a identificação do estado nutricional de plantas de trigo, aos 14 dias e aos 20 dias após a adubação, foi equivalente à utilização do medidor portátil de clorofila e, com a utilização das características extraídas das imagens das parcelas no campo, foi possível discriminar os estádios nutricionais oito dias após a primeira adubação nitrogenada em cobertura.

Silva (2008) estudou o processamento digital de imagens associado às técnicas multivariadas e redes neurais artificiais como ferramentas de apoio para melhor identificação dos estádios iniciais do desenvolvimento da Sigatoka Negra em bananais. Os resultados obtidos mostraram que o modelo é altamente eficiente na identificação da doença e mais reduzido na identificação da ausência da doença, fornecendo conhecimento para um sistema automático de monitoramento.

Silva Júnior et al. (2012) determinaram o percentual de cobertura vegetal das plantas daninhas em uma lavoura de feijão, sob os sistemas de plantio direto e convencional, usando processamento digital de imagens e geoestatística. O sistema de visão artificial foi composto por duas câmeras digitais (colorida e infravermelho), acopladas à estrutura móvel do pivô central, e um DGPS. Com base nos resultados, as imagens coloridas foram as mais adequadas

para o mapeamento da cobertura vegetal de plantas daninhas em plantio direto, enquanto as imagens infravermelhas foram mais adequadas para o mapeamento em plantio convencional.

Abrahão et al. (2013) desenvolveram estudo de classificadores, com base em diferentes combinações de bandas e índices de vegetação espectrais de imagens originais, segmentadas e reflectâncias, para discriminação de teores foliares de nitrogênio e clorofila em feijoeiro, definindo a melhor época e as melhores variáveis. Os classificadores mostraram-se eficientes na discriminação de teores de nitrogênio e clorofila. A melhor época para discriminar o teor de N foliar foi aos 13 DAE (estádio V4).

Frente ao exposto e a importância dos nutrientes N, P, K e Mn envolvidos na presente pesquisa, em especial para a cultura do milho, assim como o estudo de uma nova temática promissora, acredita-se que o sistema de visão artificial possa permitir a avaliação do estado nutricional de culturas, detectando níveis nutricionais, tanto no tocante ao limiar da deficiência, bem como em estádios fenológicos precoces.

O SVA poderá fornecer informações importantes para a verificação da eficiência das práticas de manejo da correção e adubação utilizadas pelo produtor, além de possibilitar a correção da deficiência no mesmo ciclo da planta, principalmente dos cereais anuais.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local dos experimentos

Os experimentos foram conduzidos na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de alimentos – FZEA/USP, no Campus Pirassununga.

A cultura utilizada no estudo foi o milho (*Zea mays* L.), com o híbrido de ciclo precoce DKB 390®, utilizado para grãos e adaptado para todas as regiões do país sendo recomendada a população de 55 a 65.000 plantas ha⁻¹. O milho foi cultivado em duas fases, sendo a primeira em casa de vegetação sob cultivo hidropônico, conduzido em vasos com solução nutritiva visando à indução dos sintomas de deficiência de nitrogênio, fósforo, potássio e manganês para possibilitar a utilização e calibração do sistema de visão artificial (SVA). Por sua vez, a segunda no campo, para aplicação da diagnose com visão artificial em escala comercial visando validar a calibração anteriormente realizada na fase I.

3.2 Fase I (Casa de vegetação)

A casa de vegetação utilizada pertence ao setor de ciências agrárias do Departamento de Zootecnia da FZEA/USP localizada à 21° 59'S, 47° 26'W e 634 m de altitude.

3.2.1 Descrição do protocolo experimental

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4x3 com 4 repetições. Os fatores estabelecidos para o estudo foram constituídos por quatro níveis de concentração dos nutrientes N, P, K e Mn (D₁= omissão completa do nutriente; D₂= 1/5 da dose completa; D₃= 2/5 da dose completa; D₄= dose completa), combinados em três épocas de coleta de folhas (estádio fenológico), quando as plantas estivessem com quatro folhas plenamente expandidas (V4); sete folhas (V7) e no florescimento (R1), totalizando 48 unidades experimentais para os experimentos com cada um dos nutrientes. Ressalta-se que, os ensaios foram independentes para cada elemento, desta forma foram conduzidos quatro experimentos em casa de vegetação. Para a determinação dos níveis de N, P, K e Mn, foram feitos previamente um estudo com base na composição da solução nutritiva de macronutrientes Hoagland e Arnon (1950) e adaptação de Furlani et al. (1999) para os micronutrientes. As quantidades dos nutrientes que foram utilizadas estão apresentadas na Tabela 2.

Sendo assim, a semeadura do milho foi feita em bandejas plásticas com areia lavada (Figura 3a), onde as plântulas foram mantidas e irrigadas com água deionizada por volta de duas semanas após a emergência.

Após esse período, as plântulas foram selecionadas de acordo com a uniformidade e transplantadas duas para cada unidade experimental, que corresponderam a vasos com capacidade de 3,5L, onde as plantas foram fixadas na tampa perfurada do vaso por uma espuma, na altura do colo da planta (Figuras 3 b, c e d), permitindo às raízes ficarem imersas na solução nutritiva (Figura 5 c). Desse modo, as plantas foram mantidas até a segunda época de coleta (V7), após esse período foram transferidas para os vasos com 10L de solução nutritiva (Figura 4), onde foram cultivadas até o florescimento. Para a adaptação das plântulas, inicialmente foram colocadas na solução nutritiva diluída a 50%, e, após cinco dias do transplantio, aproximadamente, completou-se a solução dos vasos com os 50% restantes.

Tabela 2 - Concentração de nutrientes na solução nutritiva dos experimentos

Sal ou Fertilizante	Concentração da solução estoque	Experimentos															
		Nitrogênio (N)				Fósforo (P)				Potássio (K)				Manganês (Mn)			
		Doses de N				Doses de P				Doses de K				Doses de Mn			
		0	1/5	2/5	Completa	0	1/5	2/5	Completa	0	1/5	2/5	Completa	0	1/5	2/5	Completa
		Volume da solução estoque por L da solução final															
	$g\ L^{-1}\ H_2O$	$ml\ L^{-1}$															
1. KH ₂ PO ₄	136,09	1	1	1	1	-	0,2	0,4	1	-	-	-	-	1	1	1	1
2. KNO ₃	101,11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3. Ca (NO ₃) ₂ .5H ₂ O	254,16	-	-	-	-	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
4. MgSO ₄ .7H ₂ O	246,47	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5. KCl	74,55	5	5	5	5	6	5,8	5,6	5	-	1,2	2,4	6	5	5	5	5
6. CaCl ₂ .2H ₂ O	147,01	5	5	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7. NH ₄ H ₂ PO ₄	115,03	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	-	-	-	-
8. NH ₄ NO ₃	80,04	-	1,5	3	7,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2	2	2	2	2,5	2,5	2,5	2,5
9. Solução de micros ^(*)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	1
10. Solução de micros (sem MnCl ₂) ^(**)														1	1	1	-
11. MnCl ₂ ♦														-	0,2	0,4	-
10. Solução Fe- EDDHA (6% de Ferro) ^(***)	115,6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

(*) – Em 1L: 3,43 g H_3BO_3 ; 2,88 g $MnCl_2 \cdot 4H_2O$; 0,354 g $ZnCl_2$; 0,111 g $CuCl_2$; 0,06 $H_2MoO_4 \cdot H_2O$. (**) Solução de micronutrientes do experimento de manganês preparada como descrito acima e sem manganês; adaptada de Furlani et al., (1999).

Após a aplicação dos tratamentos, as plantas de milho foram cultivadas até o seu florescimento. As soluções nutritivas foram renovadas após 15 dias do transplântio, após esse período foram renovadas semanalmente, completando-se quando necessário o nível da solução no vaso com água deionizada e monitorando o valor do pH entre 5,0 e 6,0 com HCl 1 N e NaOH 1 N. Durante o período experimental, cada vaso recebia ar comprimido filtrado e borbulhado durante 10 segundos a cada 30 segundos (Figura 5).

Figura 3 – a) bandeja com areia lavada para germinação; b) colocação da espuma para fixação da plântula; c) espuma ao redor do colo da plântula e d) plântula pronta para colocação no vaso para hidroponia. (Fotos: L. M. ROMUALDO).

Figura 4 - Plantas de milho em estágio V7 de desenvolvimento, após o transplântio para vasos com 10L de solução nutritiva. (Fotos: L. M. ROMUALDO).

Figura 5 – a) rede de tubos com ar sob pressão; b) tubulação individual para cada vaso; c) aspecto do borbulhamento na solução nutritiva com ar comprimido e d) vista geral dos vasos de 3,5L na bancada. (Fotos: L. M. ROMUALDO).

3.2.2 Experimento com omissão de N

Foram utilizadas 4 doses de nitrogênio (N) correspondentes a 0 (dose zero – D₁); 42 (1/5 da dose completa– D₂); 84 (2/5 da dose completa – D₃) e 210 mg L⁻¹ (dose completa – D₄). As soluções nutritivas foram preparadas com base na Tabela 2.

A semeadura do milho em bandejas com areia lavada foi realizada em 24-11-2010 e a emergência das plântulas ocorreu aos 28-11-2010 as plântulas foram transplantadas para solução nutritiva após 10 dias da emergência (09-12-2010).

Nesse experimento, cultivou-se o milho nos vasos no período de 09-12-2010 a 01-02-2011.

Aos 24 dias após a emergência das plantas (DAE), quando estavam no estágio V4 de desenvolvimento do milho (com quatro folhas totalmente desenvolvidas), realizou-se a primeira coleta nas plantas. Nesse estágio de desenvolvimento da cultura que, segundo Fancelli (1986), ocorre o início da definição do potencial produtivo. Foram amostrados 16 vasos correspondentes à primeira coleta, avaliaram-se as variáveis biométricas de planta, diâmetro do colmo, altura das plantas e contagem do número total de folhas, e separação do material em: a) parte aérea; b) raiz; c) folha indicativa do estágio de desenvolvimento V4:

folha 4 e d) folha velha (folha 2). As folhas indicativas e velhas foram separadas para coleta de imagens e para posterior determinação da massa seca e de macro e micronutrientes. Para a dose zero devido às plantas não estarem no mesmo estágio de desenvolvimento, considerou-se a folha 3 como folha indicativa e folha 2 como velha.

Aos 44 DAE, quando as plantas estavam no estágio V7 de desenvolvimento do milho (com sete folhas totalmente desenvolvidas), realizou-se a segunda coleta de plantas. Nesse estágio de desenvolvimento da cultura, segundo Fancelli (1986), ocorre o início da definição do número de fileiras da espiga. Foram amostradas as plantas dos 16 vasos correspondentes à segunda coleta, avaliaram-se também, as variáveis biométricas de planta e separando-se o material vegetal das amostras pelo mesmo critério adotado na primeira coleta, sendo a folha indicativa nesta coleta, a folha 7 e a folha velha que não tivesse senescente. Para a dose zero devido às plantas não estarem desenvolvidas, também considerou-se a folha 3 como folha indicativa e folha 2 como folha velha.

Aos 66 DAE, quando as plantas estavam no florescimento (R1), realizou-se a terceira coleta de planta. Segundo Fancelli (1986) é nesse estágio que a planta inicia o processo reprodutivo, a partir do momento em que os estilos-estigmas “cabelo” estão fora da espiga, inicia-se o “embonecamento”. Foram amostrados os 16 vasos correspondentes à terceira coleta avaliaram-se as variáveis biométricas de planta e separando-se o material vegetal das amostras pelo mesmo critério adotado nas coletas anteriores. A folha indicativa nesta coleta foi a folha oposta e abaixo da primeira espiga, também chamada folha diagnóstica para o milho, trata-se da folha recomendada para avaliar o estado nutricional da cultura, e a folha velha mesmo procedimento adotado na segunda coleta. Para a dose zero, novamente considerou-se a folha 3 como folha indicativa e folha 2 como folha velha.

As partes aéreas, as folhas indicativas e as folhas velhas, após a coleta das imagens, foram lavadas em água deionizada. Ressalta-se que na última coleta das folhas indicativas após as aquisições das imagens, como critério de recomendação para a cultura do milho, devem ser retiradas sua nervura central e separar apenas o terço médio delas para determinações de macro e micronutrientes. As raízes, por sua vez, foram lavadas em água corrente e, posteriormente, foram lavadas na seguinte ordem: água com detergente neutro, água deionizada, ácido clorídrico (HCl) diluído em água deionizada e finalmente água deionizada.

Posteriormente, as partes das plantas foram secas em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 65°C, por cerca de 72 horas, para a determinação da massa seca, sendo posteriormente moídas e, determinados os teores de macro e micronutrientes.

3.2.3 Experimento com omissão de K

Foram utilizadas 4 doses de potássio (K) correspondentes a 0 (dose zero – D₁), 47 (1/5 da dose completa – D₂), 94 (2/5 da dose completa – D₃) e 235 mg L⁻¹ (dose completa – D₄). As soluções nutritivas foram preparadas com base na Tabela 2.

A semeadura do milho em bandejas com areia lavada foi realizada em 21-03-2011 e a emergência das plântulas ocorreu aos 26-03-2011. As plântulas foram transplantadas para solução nutritiva após 10 dias da emergência (04-04-2011).

Nesse experimento, cultivou-se o milho nos vasos no período de 04-04-2011 a 13-06-2011.

Aos 24 DAE, quando estavam no estágio V4 de desenvolvimento do milho, realizou-se a primeira coleta de plantas, a segunda coleta ocorreu aos 44 DAE, e a terceira ocorreu aos 78 DAE. Os critérios e procedimentos adotados nas coletas, bem como as avaliações biométricas, as aquisições das imagens e determinações analíticas nos tecidos vegetais amostrados seguiram o mesmo procedimento para o experimento com omissão de nitrogênio (item 3.2.2). As plantas submetidas à omissão completa de potássio (Dose 0 - D₁), em todas as coletas, a folha indicativa considerada, correspondeu à folha do estágio de desenvolvimento, ou seja, folha 4, folha 7 e folha abaixo e oposta da primeira espiga, não ocorrendo atrasos no desenvolvimento como no experimento com omissão de nitrogênio.

3.2.4 Experimento com omissão de P

Foram utilizadas 4 doses de fósforo (P), correspondentes a 0 (dose zero – D₁); 6,2 (1/5 da dose completa – D₂); 12,4 (2/5 da dose completa – D₃) e 31 mg L⁻¹ (dose completa – D₄). As soluções nutritivas foram preparadas com base na Tabela 2.

A semeadura do milho em bandejas com areia lavada foi realizada em 19-04-2011 e a emergência das plântulas ocorreu aos 23-04-2011. As plântulas foram transplantadas para solução nutritiva após 10 dias da emergência (03-05-2011).

Nesse experimento, cultivou-se o milho nos vasos no período de 03-05-2011 a 21-06-2011.

As coletas corresponderam aos 31 DAE, 59 DAE e 93 DAE. Os critérios e procedimentos adotados nas coletas, bem como as avaliações biométricas, as leituras das imagens e as determinações analíticas nos tecidos vegetais amostrados seguiram o mesmo protocolo descrito para o experimento com omissão de nitrogênio (item 3.2.2). Devido ao atraso no desenvolvimento, as plantas submetidas à omissão completa de fósforo (Dose 0 -

D₁), a folha indicativa considerada, correspondeu a folha 3 e a folha 2 como velha, em todas as épocas.

3.2.5 Experimento com omissão de Mn

Foram utilizadas 4 doses de manganês (Mn), correspondentes a 0 (dose zero – D₁), 0,16 (1/5 da dose completa – D₂), 0,32 (2/5 da dose completa – D₃) e 0,8 mg L⁻¹ (dose completa – D₄). As soluções nutritivas foram preparadas com base na Tabela 2.

A semeadura do milho em bandejas com areia lavada foi realizada em 22-06-2011 e a emergência das plântulas ocorreu aos 02-07-2011. As plântulas foram transplantadas para solução nutritiva após 10 dias da emergência (12-07-2011).

Nesse experimento, cultivou-se o milho nos vasos no período de 12-07-2011 a 19-09-2011.

As coletas corresponderam aos 30 DAE, 50 DAE e 78 DAE. Os critérios e procedimentos adotados nas coletas, bem como as avaliações biométricas, as aquisições das imagens e as determinações analíticas nos tecidos vegetais amostrados seguiram o mesmo procedimento para o experimento com omissão de nitrogênio (item 3.2.2). As plantas submetidas à omissão completa de manganês (Dose 0 - D₁) em todas as coletas, a folha indicativa considerada, correspondeu às mesmas folhas dos experimentos anteriores, ou seja, folha 4, folha 7 e folha abaixo e oposta da primeira espiga, não ocorrendo atrasos no desenvolvimento como no experimento com omissão de nitrogênio e fósforo. E, também se ressalta que para esse experimento optou-se além de coletar a folha indicativa, coletou-se a folha nova, pelo fato do sintoma de deficiência característico do manganês manifestar inicialmente nos órgãos mais novos das plantas. Considerou-se a folha nova no estágio V4 e V7, a folha que envolve a folha mais nova que se encontra dentro do cartucho. No estágio R1 correspondeu à última folha no ápice da planta.

3.2.6 Obtenção das imagens

As imagens das folhas para o SVA foram obtidas utilizando um scanner de mesa convencional de alta resolução (9600 DPI). As folhas foram digitalizadas com 1.200 DPI e armazenadas no computador em formato de compressão TIFF (*Tag Image File Format*), para posterior processamento.

As coletas das folhas das plantas para a análise por meio do SVA foram feitas nos estádios V4, V7 e R1 da cultura do milho. As folhas digitalizadas foram: folha indicativa do estágio de desenvolvimento (FI): folhas 4, 7 e abaixo e oposta à primeira espiga; folha velha

(FV) para o experimento com omissão de nitrogênio, fósforo e potássio, e folha nova (FN) para o experimento com omissão de manganês. No estágio V4 foi digitalizada a folha inteira das plantas (ponta, meio ou terço médio e base das folhas). Nos demais estádios nem sempre foi possível obter todas as partes da folha, devido ao tamanho das mesmas não caber no leitor do scanner.

As imagens, após a digitalização foram identificadas da seguinte forma para o armazenamento: TW_FN_rxxx_lado_coletaY_ntrNutriente_parZZZ.tiff, onde W é a dose do nutriente que foi utilizada, N representa tipo da folha, ou seja, indicativa (FI), velha (FV) ou folha nova (FN), r representa o número de repetições contidas na imagem, lado representa se a folha foi digitalizada na frente ou verso, o Y significa a coleta correspondente, Nutriente corresponde ao elemento estudado, ZZZ 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_FV_rep1234_frente_coleta1_ntrpotassio_par123, esta imagem contém as quatro repetições da frente das folhas velhas inteiras do estágio V4, cultivadas com a dose 3 de potássio.

Em cada época estabelecida para o estudo foram removidas uma FI e uma FV ou FN, de cada planta em cada vaso das respectivas dose de nutriente e época, dessa forma, em cada coleta foram amostrados 16 vasos (4 doses x 4 repetições), cada unidade experimental cultivou-se 2 plantas, portanto foram retiradas 8 FI e 8 FV ou FN de cada dose em cada coleta, para serem digitalizadas.

Após serem removidas das plantas, as folhas foram limpas com um papel toalha, para a remoção de poeira ou sujeira que pudesse de alguma forma interferir na qualidade da cor da imagem. Após a limpeza, as folhas correspondentes à cada dose foram colocadas lado a lado no leitor do scanner, cobertas com uma folha sulfite branca e em seguida procedeu-se a digitalização das mesmas (Figura 6).

Figura 6 – a e b) Digitalização das folhas do milho para análise de imagem pelo SVA. (Fotos: L. M. ROMUALDO).

3.2.7 Avaliações no material vegetal

Produção de massa seca e variáveis biométricas da planta

Nos estádios de desenvolvimento V4, V7 e R1 foram determinadas as variáveis biométricas de plantas, diâmetro do colmo, altura de planta e número total de folhas. Após essas avaliações as duas plantas de cada vaso foram coletadas e agrupadas compondo uma única amostra sendo separada em parte aérea, folha indicativa, folha nova ou folha velha e raiz.

As amostras do material vegetal foram lavadas e secas em estufa segundo o procedimento descrito no item 3.2.2.

Para a determinação da massa seca da parte aérea total somaram-se os pesos dos seus componentes (parte aérea, folha diagnóstica e folha nova ou folha velha), enquanto os pesos das raízes foram obtidos diretamente pela pesagem do material.

Análises químicas

As determinações dos nutrientes nas amostras foram analisadas no Laboratório de Ciências Agrárias na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, da Universidade de São Paulo, Campus de Pirassununga/SP.

As amostras foram digeridas por via úmida com ácido sulfúrico para a determinação de nitrogênio e com ácido nítrico e perclórico para determinação de fósforo, potássio, enxofre, magnésio, cálcio, ferro, cobre, manganês e zinco, segundo métodos descritos por Bataglia et al. (1983).

Acúmulo de nutrientes

O acúmulo de nutrientes na parte aérea e na raiz foi obtido multiplicando-se os teores dos nutrientes em cada componente da parte aérea, folha indicativa do estágio de desenvolvimento e folha velha ou nova, pela produção de massa seca de cada componente e da raiz só se multiplicou o teor do nutriente na amostra pela produção de massa seca da mesma.

Os resultados obtidos das avaliações realizadas foram analisados estatisticamente por meio de análise de variância pelo software SAS, com aplicação do teste F. E, nos casos em que o teste F foi significativo, foi realizada a análise de regressão polinomial simples ou múltipla, para os efeitos das doses do nutriente nas épocas avaliadas.

3.3 Fase II (Campo)

3.3.1 Localização e período experimental

O experimento foi conduzido no município de Pirassununga/SP, em área pertencente ao campus da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo (FZEA-USP). O período experimental foi de dezembro de 2010 a agosto de 2011.

3.3.2 Caracterização da área experimental

O experimento a campo foi conduzido em área de baixa fertilidade, em um Latossolo Amarelo distrófico (LAd) classificado de acordo com a EMBRAPA (1999). Os dados pluviométricos no período experimental estão apresentados na Figura 7, e as características químicas e físicas do solo estão apresentadas nas Tabelas 3 e 4 respectivamente. Com base nessas análises aos 22-12-2011 foi feita a aplicação de $0,8 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário (concentração de $\text{CaO}=35,5\%$, $\text{MgO}=10\%$ e $\text{PRNT}=90\%$) com o objetivo de elevar a saturação por bases (V) a 70%, conforme recomendação de Raij et al. (1997) para a cultura do milho e, aplicados 540 kg ha^{-1} de gesso agrícola, de acordo com Werner et al. (1997), como práticas corretivas.

Tabela 3 - Análise química do solo, realizada em outubro de 2010, antes do preparo do solo, nas camadas de 0-0,20 e de 0,20-0,40 m de profundidade

Profundidade	pH (CaCl_2)	M.O. dm^{-3}	P (resina) mg dm^{-3}	S mg dm^{-3}	K $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$	Ca $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$	Mg $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$	H+Al $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$	SB $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$	T $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$	V %	B mg dm^{-3}	Cu mg dm^{-3}	Fe mg dm^{-3}	Mn mg dm^{-3}	Zn mg dm^{-3}
cm																
0 - 20	5,2	23	5	3	0,6	10	9	18	20	38	52	0,66	0,6	22	1,2	0,7
20 - 40	5,0	17	3	4	0,5	9	6	19	15	34	45	0,17	0,6	20	0,5	0,6

Tabela 4 - Análise granulométrica do solo, realizada em outubro de 2010, antes do preparo do solo, nas camadas de 0-0,20 e de 0,20-0,40 m de profundidade

Profundidade	Areia	Argila	Silte
	g kg^{-1}		
0 - 20 cm	888	86	26
20 - 40 cm	877	90	33

Figura 7 - Dados pluviométricos semanais no período de dezembro/2010 a agosto/2011, obtidos do Departamento de Zootecnia da FZEA-USP, Pirassununga.

3.3.3 Delineamento experimental e descrição dos tratamentos

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, em parcelas subdivididas no tempo, com cinco tratamentos e cinco repetições, resultando, portanto, em 25 parcelas experimentais.

Cada parcela experimental foi composta por 8 linhas de cultura do milho, espaçadas de 0,8 metro com 12 metros de comprimento, perfazendo área total de 76,8 m².

Os tratamentos foram constituídos pela omissão individual de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e manganês (Mn) nas parcelas: T1 (omissão de N); T2 (omissão de P); T3 (omissão de K); T4 (omissão de Mn) e T5 (controle com todos os nutrientes) de acordo com a Figura 8. Para validar a aplicabilidade do sistema de visão artificial as parcelas foram subdivididas em épocas de coletas de folhas para análise de imagens. As épocas de coletas foram V4, V7 e R1 (semelhantes às épocas realizadas na Fase I – casa de vegetação).

-P	Controle	-N	-P	Controle
-K	-Mn	-K	-Mn	-N
Controle	-N	-P	Controle	-K
-Mn	-K	-Mn	-N	-P
-N	-P	Controle	-K	-Mn
Bloco I	Bloco II	Bloco III	Bloco IV	Bloco V

Figura 8 – Croqui experimental

3.3.4 Condução do experimento

Após aproximadamente 50 dias da aplicação do calcário e do gesso, foi realizada aos 10-02-2011 a semeadura do milho (Figura 9), com o híbrido DKB 390®, o mesmo utilizado nos experimentos conduzidos em casa de vegetação.

Figura 9 – a e b) Semeadura do milho. (Fotos: L. M. ROMUALDO).

As adubações de plantio e cobertura para cada nutriente foi estabelecida com base na análise inicial do solo e com a recomendação de Raij et al. (1997) para a cultura do milho com produtividade esperada entre 10-12 toneladas por hectare.

- **Adubações**

As adubações de plantio e cobertura estão apresentadas nas Tabelas 5 e 6, respectivamente.

Tabela 5 - Quantidade de nutriente em kg ha⁻¹ aplicados nos tratamentos no plantio do milho

Tratamentos	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Controle	30	100	50
- N	-	100	50
- P	30	-	50
- K	30	100	-
- Mn	30	100	50

Tabela 6 - Quantidade de nutriente em kg ha⁻¹ aplicados nos tratamentos em cobertura após 18 dias da semeadura do milho

Tratamentos	N	K ₂ O
Controle	140	110
- N	-	110
- P	140	110
- K	140	-
- Mn	140	110

As fontes de fertilizantes utilizadas no plantio foram o superfosfato triplo (46%P₂O₅), ureia (45%N) e cloreto de Potássio (60% K₂O); na cobertura foram utilizada ureia com baixa volatilização (44,6%N, 0,4%B, 0,15%Cu) e cloreto de potássio (60% K₂O).

Aos 19-03-2011, aproximadamente 40 dias após a semeadura foram feitas as aplicações de adubos foliares com cloreto de zinco (ZnCl₂ = 21% de Zn) e cloreto de manganês (MnCl₂ = 14% de Mn) nos tratamentos controle, -N, -P, -K e no tratamento -Mn só foi aplicado (ZnCl₂). A dose para o ZnCl₂ foi de 0,3 L ha⁻¹ e 1L ha⁻¹ para o MnCl₂, o que correspondeu a 94,6 e 193,2 g ha⁻¹ de Zn e Mn, respectivamente (Figura 10).

Figura 10 – a e b) Adubação foliar nas parcelas experimentais aos 40 dias após a semeadura do milho. (Fotos: L. M. ROMUALDO).

- **Manejo fitossanitário**

Durante a condução do experimento foram aplicados defensivos para controle de lagartas e herbicida.

Para o controle da Lagarta-rosca, *Agrotis ipsilon* (Hufnagel), e Lagarta-elasma, *Elasmopalpus lignosellus* (Zeller) foi utilizado o ingrediente ativo (I.A.) Clorpirifós. As aplicações foram feitas duas aplicações, aos 8 dias e 15 dias após a semeadura (DAS), com 1L ha⁻¹.

Para controle da Lagarta do cartucho (*Spodoptera frugiperda*) foi aplicado o inseticida sistêmico de contato metomil. Foi realizada uma aplicação de 0,6L ha⁻¹ aos 32 DAS. Também, foi utilizado o inseticida fisiológico triflumuron, o qual foi aplicado aos 32 e 37 DAS, utilizando-se a dose de 0,05L ha⁻¹.

Foi aplicado 7 dias antes do plantio, 0,02L ha⁻¹ de fipronil para controle de formigas na área experimental.

Para dessecação foi utilizado 6L ha⁻¹ de glifosate, a 7 dias antes do plantio. Como herbicida seletivo pós-emergente, aos 32 DAS foram aplicadas tembotriona e Atrazina + óleo mineral nas doses de 0,24 e 2 + 1L ha⁻¹, respectivamente.

3.3.5 Amostragem de folhas para análise de imagem e análise química

Procedeu-se a amostragem de folhas nas três épocas estabelecidas, ou seja, V4, V7 e R1. A primeira coleta foi realizada aos 16-03-2011, a segunda coleta 29-03-2011 e a última coleta aos 18-04-2011 (Figura 11).

As folhas amostradas foram as folhas indicativas de cada época de desenvolvimento estabelecida, que corresponderam às da Fase I (casa de vegetação). Foram amostradas seis folhas ao acaso em cada unidade experimental e separadas duas delas em cada parcela para serem digitalizadas. Posteriormente, as folhas foram lavadas com água deionizada e secas em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 65°C, por cerca de 72 horas, para a determinação dos teores de macro e micronutrientes. Na última coleta (R1), as folhas após serem digitalizadas foram separadas os terços médios e retiradas as nervuras para determinação dos teores de macro e micronutrientes seguindo método de Bataglia et al. (1983).

Os resultados obtidos das determinações analíticas nas folhas nas épocas V4, V7 e R1 foram submetidos à análise de variância pelo teste F. Nos casos em que o teste F foi significativo para a interação entre os efeitos principais (tratamentos) e secundários (épocas), foi realizado os desdobramentos dos tratamentos nos estádios de desenvolvimento do milho, sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Figura 11 – Amostragem de folhas no estágio R1 do milho. (Foto: L. M. ROMUALDO).

3.3.6 Amostragem para análise de solo

Procedeu-se após a colheita dos grãos, aos 09-08-2011 a amostragem de solos para avaliação da fertilidade de solo, conforme recomendações de Raij et al. (2001).

As amostras foram coletadas em cada parcela experimental, nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, sendo cada amostra composta de quatro subamostras.

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

Os resultados obtidos das determinações analíticas das amostras de solo foram tabulados e estão apresentados no apêndice.

3.3.7 Componentes de produção

A colheita do milho foi feita aos 19/07/2011 (Figura 12). Em cada parcela foram amostradas 2 linhas de milho espaçadas de 0,8 metro e 4 metros de comprimento, perfazendo área total de 6,4 m². Após a colheita as espigas foram secas ao ar para posterior despalha e debulha (Figura 13) para a avaliação dos componentes de produção (massa de 1000 grãos, massa média do sabugo e peso do sabugo) e produtividade.

Figura 12 – Colheita do milho após aproximadamente 160 dias da semeadura. (Fotos: L. M. ROMUALDO).

Figura 13 - Debulha do milho para a avaliação dos componentes de produção e produtividade. (Fotos: L. M. ROMUALDO).

Os resultados obtidos dos componentes de produção e produtividade foram submetidos à análise de variância pelo teste F e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

3.3.8 Obtenção das imagens

As imagens das folhas para o SVA foram obtidas utilizando um scanner de mesa convencional de alta resolução (9600 DPI). As folhas foram digitalizadas com 1.200 DPI, identificadas e armazenadas no computador em formato de compressão TIFF (*Tag Image File Format*), para posterior processamento.

As coletas das folhas no campo foram feitas nos estádios V4, V7 e R1 da cultura do milho. Foram digitalizadas o terço médio das folhas indicativas em cada estágio estabelecido para o estudo.

Em cada época foram amostradas em cada parcela experimental do campo seis folhas, sendo duas selecionadas por parcela para serem digitalizadas. Deste modo, foram obtidas dez folhas por tratamento em cada coleta (2 FI em 5 parcelas). As folhas amostradas no campo e levadas até o laboratório para proceder a digitalização das mesmas. As imagens foram identificadas com o número da parcela e a coleta correspondente.

Após serem removidas das plantas, as folhas foram limpas com um papel toalha, para a remoção de poeira ou sujeira que pudesse de alguma forma interferir na qualidade da cor da imagem. Após a limpeza, as folhas correspondentes de cada tratamento foram colocadas lado a lado no leitor do scanner, cobertas com uma folha sulfite branca e em seguida procedeu-se a digitalização das mesmas.

3.4 Análise de imagens pelo sistema de visão artificial

3.4.1 Imagens obtidas na Fase I (Casa de vegetação)

O estudo para ajustar o melhor método do SVA para detecção de sintomas de deficiências dos nutrientes N, P, K e Mn no milho foi realizado no Instituto de Física de São Carlos (IFSC - USP), em São Carlos/SP, com a colaboração do GCC - grupo de computação científica do IFSC. Esta etapa visou o desenvolvimento de métodos e técnicas necessários para a construção de um sistema de visão artificial, para a avaliação do estado nutricional para a cultura do milho, por meio da análise de imagens da superfície de folhas geradas pela Fase I desta pesquisa.

O ponto de partida foi a obtenção das imagens das folhas de milho, obtidas na Fase I em casa de vegetação (FZEA/USP – Pirassununga) com os sintomas induzidos para N, P, K e Mn em diferentes níveis, que foram obtidas conforme descrito no item 3.2.6.

O estudo de análise de imagens de folha foi constituído por três fases, depois da obtenção das imagens das folhas de milho foram feitas a segmentação, extração de características e classificação.

O processo de segmentação é utilizado no sistema para separar a folha do fundo no processo de aquisição, para segmentar artefato (ex: regiões danificadas das folhas) ou ainda áreas de interesse, que seriam as regiões onde ocorrem os sintomas característicos da deficiência do nutriente. Análises preliminares indicaram que os métodos utilizados seriam análise cromática e análise de textura, pois a cor e a textura são os principais atributos visuais que apresentaram relações com a nutrição do milho (Figura 14).

De cada parte da folha digitalizada foram extraídas janelas da superfície inteira da folha. Considera-se janela cada “pedacinho” que o programa retira na imagem da folha no processo de segmentação (Figura 14). Cada janela de 80x80 pixels extraída foi orientada em posição horizontal e armazenada em formato sem compressão.

Figura 14 - Exemplo do processo de análise de imagem utilizada no estudo. (ZÚÑIGA, 2012).

O programa seleciona de forma aleatória e automática o maior número de janelas possíveis em cada imagem, para que ele possa considerar na base de dados final as “melhores”, excluindo as janelas que tem variação de iluminação, presença de bordas ou nervura central da folha. Essa seleção das “melhores” janelas é de fundamental importância no estudo, pois serão essas seleções que poderão reunir a melhor qualidade de distinção entre as classes.

Em cada época de coleta das folhas, de cada uma das folhas foram consideradas 3 (três) partes: Base, Meio (Terço médio) e Ponta (Figura 15) separando em classes distintas as FI e as FV ou FN. Ressalta-se que para os estádios V7 e R1 não foi possível obter as três partes da planta.

Figura 15 - Exemplo de separação das folhas de milho para a análise de imagens considerando as partes: base, meio e ponta da folha. (ZÚÑIGA, 2012).

Para o estudo, foram padronizados os níveis dos nutrientes: D_1 , D_2 , D_3 , D_4 conforme citado anteriormente. Na base de dados final foram consideradas 100 janelas para cada classe originada. O conteúdo de cada classe correspondeu a:

- BDColoridaPontaFV ou FN: Janelas extraídas das pontas das folhas velhas ou novas, considerando os 4 níveis do nutriente, originando as classes: D_1 , D_2 , D_3 , D_4 .
- BDColoridaBaseFV ou FN: Janelas extraídas das bases das folhas velhas ou novas, considerando os 4 níveis do nutriente, originando as classes: D_1 , D_2 , D_3 , D_4 .
- BDColoridaMeioFV ou FN: Janelas extraídas do meio das folhas velhas ou novas, considerando os 4 níveis do nutriente, originando as classes: D_1 , D_2 , D_3 , D_4 .
- BDColoridaPontaFI: Janelas extraídas das pontas das folhas indicativas, considerando os 4 níveis do nutriente, originando as classes: D_1 , D_2 , D_3 , D_4 .
- BDColoridaBaseFI: Janelas extraídas das bases das folhas indicativas, considerando os 4 níveis do nutriente, originando as classes: D_1 , D_2 , D_3 , D_4 .
- BDColoridaMeioFI: Janelas extraídas do meio das folhas indicativas, considerando os 4 níveis do nutriente, originando as classes: D_1 , D_2 , D_3 , D_4 .

Estas janelas foram aferidas por métricas de análise de textura, sendo que distintas métricas de textura foram consideradas, com o objetivo de encontrar o método que fornecesse a melhor separação entre as classes. Os descritores de Gabor Wavelets multiespectrais e fractais (GWF) e os métodos de aprendizado de máquina (SVM) para a análise de textura colorida foram identificados por Zúñiga (2012) como os mais adequados para esse estudo.

Gabor Wavelets (GW) é uma função matemática que depois de aplicada numa imagem gera uma representação que ressalta os pontos mais importantes da imagem, como se o filtro dissesse o que é importante considerar da imagem e o que faz essa imagem diferenciarem das demais. Assim, os filtros de Gabor geram uma imagem representativa a partir de uma imagem original. Uma das características mais importantes nessa técnica é que permite analisar as imagens em distintas escalas e orientações gerando uma representação para cada uma delas (BACKES; BRUNO, 2006).

Para cada tabela gerada com os resultados do sistema de visão artificial, são mostradas as matrizes de confusão dos dois melhores resultados, além dos seguintes índices de acordo com Zúñiga (2012):

- Porcentagem de imagens corretamente classificadas: é a informação mais importante, indica a quantidade de imagens que foram identificadas corretamente pelo classificador.
- Número de imagens corretamente classificadas: indica o número de imagens que foram classificadas corretamente onde o total de imagens é o número de classes da base x 100.
- Probabilidade de acerto global: valor de probabilidade de acerto (baseado no número de imagens corretamente classificadas (0 – 100%).
- Índice Kappa: De acordo com Everitt e Dunn (2001), esse índice indica a concordância entre o acerto global e a verdade, considerando que uma parte do acerto global gerado pelo classificador pode ser unicamente obtido pelo acaso. Os valores gerados vão até 1,0 e é avaliado da seguinte forma:
 - < 0: pobre
 - 0 - 0,20: não confiável
 - 0,21 – 0,40: baixo
 - 0,41 – 0,60: moderado
 - 0,61 – 0,80: confiável
 - 0,81 – 1,0: quase perfeito
- Desvio Padrão do acerto: cada experimento é rodado 10 vezes, para cada rodada toma-se o acerto global e calcula-se o desvio padrão deste, nas 10 rodadas. É importante saber que para cada rodada usam-se 80% das imagens para treinamento e 20% para o teste “cego”, para cada rodada o conjunto de treinamento e teste é selecionado ao azar e sem repetição mantendo o número de amostras constantes por cada classe.
- Confiança do acerto: o classificador fornece um nível de confiança que ele tem quando indica que uma imagem pertence a uma classe, o índice 1 é certeza absoluta em todas as imagens.
- Matriz de confusão: a matriz de confusão mostra a quantidade de janelas classificadas corretamente (na diagonal principal) e o resto são os erros na

classificação. A matriz de confusão é muito importante para conhecer as classes difíceis de classificar.

3.4.2 Imagens obtidas na Fase II (Campo)

As imagens das folhas obtidas no experimento do campo foram utilizadas para validação do sistema de visão artificial.

A base de dados do sistema com todas as imagens dos experimentos realizados em casa vegetação, com todos os nutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, ferro, manganês e zinco) é usada para treinar o sistema e as imagens do campo para validar. As imagens do campo são ingressadas ao SVA sem nenhuma legenda, e o sistema automaticamente gera uma matriz de predição para cada janela, e indica a qual classe de nível de nutriente mais se aproxima.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Fase I – Nitrogênio (N)

4.1.1 Sintomas visuais

Os sintomas visuais de deficiência podem ser considerados como o fim de uma sequência de eventos, que se inicia com alteração molecular e continua com modificação subcelular, depois celular e, quando um conjunto de células ou tecido é afetado, aparece o sintoma visual (MALAVOLTA, 2006).

Desta forma, as plantas submetidas à omissão completa de N apresentaram desde os primórdios foliares, clorose nas folhas, que evoluiu para o secamento e necrose. As folhas não alongaram e as plantas não se desenvolveram (Figuras 16 a e b; Figura 17 a). Sintomas semelhantes foram observados por Ferreira (2012), cultivando o híbrido de milho BRS 1010 em substrato composto por areia + vermiculita na proporção de 1:1, com omissão completa de N.

As plantas cultivadas com 1/5 da dose de nitrogênio apresentaram clorose acentuada nas folhas e coloração verde pálido, o que pode ser visualizado quando comparado às plantas com a dose completa de N (Figuras 17 a e b). Sintomas típicos da deficiência do nutriente foram observados nas folhas velhas, da ponta para a base, em forma de “V” invertido (Figuras 16 c e d), que evoluiu para o secamento e necrose do tecido vegetal, progredindo ao longo da nervura principal (Figuras 16 e e f). Resultados semelhantes foram notados por Oliveira et al. (2007), Rozane et al. (2008) e Avalhães et al. (2009) quando omitiram N em plantas de capim-marandu, aveia preta e capim-elefante, respectivamente.

Colmos delgados com presença de pigmentos arroxeados e senescência precoce (Figuras 17 a e b) também foram observados. Esses sintomas típicos, menos pronunciados, foram verificados nas plantas com 2/5 da dose de nitrogênio após o estágio V7 (Figuras 18 a, b e c).

Os sintomas observados são amplamente descritos na literatura, visto que o N é um nutriente móvel na planta. Quando o suprimento do 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 velhas, no milho é conhecida como “requeima” das folhas baixas (Coelho et al., 2006).

Figura 16 - Sintomas de deficiências de nitrogênio em plantas de milho submetidas à omissão completa de nitrogênio aos 24 (a) e 44 (b) DAE; em plantas com 1/5 da dose de nitrogênio aos 35 DAE (c e d) e 44 DAE (e e f). (Foto: L. M. ROMUALDO).

Figura 17 - Sintomas de deficiências de nitrogênio em plantas de milho submetidas às doses de nitrogênio, da esquerda para a direita: dose 0, 1/5, 2/5 e completa (a) e na dose 1/5 (b) no estágio R1. (Foto: L. M. ROMUALDO).

Figura 18 - Plantas de milho no estágio fenológico V4 (a), V7 (b) e R1 (c), submetidas às doses de nitrogênio.

De acordo com Taiz e Zeiger (2009), quando a carência de nitrogênio se desenvolve lentamente, é possível que as plantas apresentem colmos pronunciadamente delgados e lenhosos. Isso pode ser atribuído ao acúmulo de carboidratos, que não podem ser utilizados na síntese de aminoácidos ou de outros compostos nitrogenados. Os carboidratos não utilizados podem ser usados na síntese de outros compostos, como a antocianina, levando ao acúmulo desse pigmento, conferindo a coloração arroxeada nas folhas, pecíolos e caules de algumas variedades de milho deficientes em N.

4.1.2 Variáveis biométricas

Pelos resultados obtidos, constatou-se que houve efeito significativo ($P < 0,01$) das doses, épocas e da interação sobre as variáveis biométricas (diâmetro do colmo, altura, número total de folhas), massa seca da parte aérea e raiz, em função do incremento das doses de nitrogênio na solução nutritiva segundo um modelo quadrático (Figura 19).

O estágio de desenvolvimento V4 foi a época que apresentou menores valores em todas as variáveis biométricas avaliadas. Nesta época, o diâmetro máximo do colmo foi de 1,03 cm observado com a dose de N em torno de 146 mg L^{-1} , a altura máxima de 40,2 cm obtida com a dose de 164 mg L^{-1} e o número máximo de 9 folhas com a dose de 122 mg L^{-1} (Figuras 19 a, b e c). A massa seca máxima da parte aérea e da raiz de plantas de milho foram 3,35 e $0,92 \text{ g.planta}^{-1}$ respectivamente, obtidas com a dose de N na solução nutritiva de 175 mg L^{-1} (Figuras 19 d e e).

Na época V7, o diâmetro máximo do colmo observado foi de 1,78 cm na dose de N em torno de 152 mg L^{-1} , a altura máxima de 133 cm obtida com a dose de 152 mg L^{-1} e o número máximo de 15 folhas com a dose de 138 mg L^{-1} (Figuras 19 a, b e c). A massa seca máxima da parte aérea e da raiz de plantas de milho foi de $27,9 \text{ g planta}^{-1}$ e da raiz $12,4 \text{ g planta}^{-1}$, obtidas com a dose de N na solução nutritiva de 184 e $143,6 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente (Figuras 19 d e e).

O florescimento da cultura (estádio de desenvolvimento R1) foi a época em que foi verificado o máximo diâmetro do colmo (2,16 cm), a altura máxima da planta (209 cm) e o máximo número de folhas (21 folhas) quando a concentração de N na solução nutritiva era de aproximadamente 160, 130 e 150 mg L^{-1} , respectivamente. A massa seca máxima da parte aérea e da raiz de plantas de milho foi de $75,0 \text{ g planta}^{-1}$ e da raiz $26,8 \text{ g planta}^{-1}$, obtidas com a dose de N na solução nutritiva de 145 e 157 mg L^{-1} , respectivamente (Figura 19).

De acordo com os resultados, observa-se que a omissão e a redução dos níveis de N comprometeram significativamente o crescimento e a massa seca (parte aérea e raiz) das plantas de milho nas épocas estudadas. O teor de nitrogênio da planta influencia o padrão de distribuição de carboidratos dentro da planta, o que afeta o crescimento e a produtividade das culturas, havendo, portanto, forte correlação entre o teor de N e a produção de biomassa (LAWLOR, 2002).

Figura 19 - Diâmetro do colmo (a), altura da planta (b), número total de folhas (c), massa seca da parte aérea (d) e massa seca de raiz (e) de plantas de milho submetidas às doses de nitrogênio e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento.

Como elemento com função estrutural na planta, o N é constituinte de todos os aminoácidos, amidas, proteínas, ácidos nucleicos, nucleotídeos, poliamidas e citocromos, além de integrar a molécula de clorofila, ou seja, está relacionado aos principais processos fisiológicos que ocorre na planta (EPSTEIN; BLOOM, 2006). Sob condições de deficiências de N, a divisão celular nos pontos de crescimento é retardada, o que resulta em redução na área foliar, colmos finos e no tamanho da planta (MALAVOLTA, 2006). Além disso, afeta as taxas de iniciação, expansão foliar e a intensidade de senescência das folhas (SCHRODER et al., 2000). Plantas de crescimento inicial rápido, como a cultura do milho exigem grande quantidade de N em curto intervalo de tempo e o não suprimento resultará em prejuízo no crescimento inicial, com reflexo na produção de grãos (ALMEIDA et al., 2003).

Prado e Franco (2007) e Gondim et al. (2010) observaram em plantas de milho aos 42 e 30 dias, respectivamente, cultivadas em hidroponia, que a omissão de N foi o tratamento que mais limitou o crescimento inicial e produção de massa seca da parte aérea. Resultados semelhantes também foram observados por Avalhães et al. (2009), Prado e Vidal (2008) e Rozane et al. (2008) em outras culturas.

4.1.3 Nitrogênio na planta

Os teores de N no tecido vegetal das folhas indicativas nas épocas de desenvolvimento do milho responderam significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de N na solução nutritiva, ajustando-se segundo um modelo quadrático (figura 20).

O estágio de desenvolvimento V4 foi a época que apresentou os maiores teores de nitrogênio nas folhas indicativas, o teor máximo de $66,4 \text{ mg kg}^{-1}$ foi observado com a dose de nitrogênio em torno de 140 mg L^{-1} . Os teores foliares de N, 41 e 46 mg kg^{-1} , para as épocas V7 e R1, respectivamente, foram verificados com a dose de N em torno de 170 mg L^{-1} .

Os maiores teores foliares de N no estágio V4 (66 g kg^{-1}) podem ser explicados devido a essa época as folhas estarem menores, sendo assim, as plantas apresentam maior concentração do nutriente, mas este teor não representa o que de fato a planta acumulou de N em termos de massa seca, o que pode ser observado nas Figuras 21 a e b. Aos 24 dias (V4) foram obtidos os menores acúmulos na parte aérea e raiz para todas as doses de N utilizada.

De acordo com Büll (1993), 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.

Figura 20 - Teor de nitrogênio na folha indicativa de plantas de milho submetidas às doses de nitrogênio e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento.

Silva (2011) cultivou milho em hidroponia submetidos a doses de magnésio, enxofre e cálcio, em diferentes estádios de desenvolvimento da planta, e verificou maiores teores de N na folha indicativa na época V4, independente das doses omitidas dos nutrientes, com valores variando de 33,8 a 55 g kg⁻¹ de nitrogênio.

O teor de 46 mg kg⁻¹ de N na folha indicativa do milho no estágio de desenvolvimento R1 (descrita na literatura como folha diagnóstica) estão acima dos níveis considerados adequados, que segundo a literatura variam de 27,5 a 32,5 g kg⁻¹ (BÜLL, 1993; MARTINEZ et al., 1999), 27 a 35 g kg⁻¹ (RAIJ; CANTARELLA, 1996) e 28 a 35 g kg⁻¹ (MALAVOLTA, 2006). Corroborando com Lange et al. (2006), que verificaram aumento na concentração de N no tecido foliar de milho com o incremento de níveis de nitrogênio aplicados no solo em cobertura. Entretanto, observaram em doses acima de 80 kg ha⁻¹, que os teores de N foliares foram acima do considerado adequado para a cultura conforme Martinez et al. (1999). Os autores relataram que isso pode ter ocorrido devido, provavelmente, ao híbrido utilizado responder a altas doses de N. Mar et al (2003), estudando doses e épocas de aplicação de nitrogênio na cultura do milho safrinha, constataram teor de N em folhas de milho de 28 g kg⁻¹ obtida com a dose de 145 kg ha⁻¹.

Os teores de N nas folhas de milho acima dos níveis adequados, na presente pesquisa, podem ser devido ao fato das plantas serem cultivadas em solução nutritiva, onde todas as condições são controladas, além da planta ter prontamente disponível os nutrientes, em uma quantidade que pode ter sido superior ao que realmente necessitava.

Houve incremento gradativo e significativo ($P < 0,01$) no acúmulo de nitrogênio na parte aérea e raiz das plantas, nas épocas de desenvolvimento do milho, com o aumento da

dose de N na solução nutritiva, ajustando-se a um modelo quadrático no estágio V4 e linear nos estádios V7 e R1 (Figura 21). Esses resultados já eram esperados em função do aumento no teor de N e na massa seca das plantas.

No estágio V4, a dose de N na solução nutritiva de 151 e 159 mg L⁻¹ proporcionaram o acumulado máximo de nitrogênio na parte aérea (142,8 mg planta⁻¹) e raiz (386,6 mg planta⁻¹), respectivamente.

Observou-se no estágio V7, o maior acúmulo de 1126 e 286 mg planta⁻¹ de nitrogênio, na parte aérea e raiz, respectivamente. Os resultados encontrados estão muito próximos dos obtidos por Silva (2011) no estágio V8 do milho cultivado em hidroponia, que observou o acumulado de N na parte aérea de 1250 mg planta⁻¹ e na raiz de 370 mg planta⁻¹.

Figura 21 - Acúmulo de nitrogênio na parte aérea (a) e raiz (b) de plantas de milho submetidas às doses de nitrogênio e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento.

Com base na Figura 21, nota-se que o maior acúmulo de N na parte aérea ($1770 \text{ mg planta}^{-1}$) e raiz ($633 \text{ mg planta}^{-1}$) foram observados aos 66 dias após a emergência (estádio de desenvolvimento R1), nas plantas cultivadas com a dose completa do nutriente (Figura 21 a e b).

De acordo com Coelho (2007), as exigências de nitrogênio pelas plantas de milho variam consideravelmente com os diferentes estádios de desenvolvimento da planta, sendo mínimas nos estádios iniciais, aumentando com a elevação do crescimento da planta e alcançando o pico durante o período compreendido entre o início do florescimento e formação dos grãos. No entanto, conforme observado nas variáveis de crescimento e produção de massa seca (Figura 19), aos 24 DAE, o suprimento inadequado de nitrogênio comprometeu o desenvolvimento do milho e consequentemente a produção de biomassa das plantas. Segundo Coelho et al. (2006), a deficiência de nitrogênio, 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.

Na Tabela 7, está apresentado o acúmulo total (parte aérea e raiz) de macro e micronutrientes durante os estádios de desenvolvimento do milho, estimados para a população de $60000 \text{ plantas ha}^{-1}$.

Os acúmulos totais de macronutrientes no estágio R1, no florescimento do milho, seguiram a seguinte ordem decrescente de valores em kg ha^{-1} : N (134) > K (116,5) > Ca (33,4) > P (18,5) > Mg (14,6) > S (14,5) e dos micronutrientes em g ha^{-1} : Fe (2005,3) > Mn (563,8) > Cu (357,2) > Zn (309,7).

De acordo com Büll (1993), a absorção de macronutrientes correspondente ao rendimento de 9100 kg ha^{-1} , pela cultura do milho no final do seu ciclo, corresponde a: N=190; P=39; K=190; Ca=40; Mg=44 e S=21 em kg ha^{-1} , e os micronutrientes em g ha^{-1} : Fe=2100; Cu=110; Mn=340 e Zn=400. Já Coelho e França (1995) referem que para a produtividade média de 9170 kg ha^{-1} , para a produção de grãos, a extração média de N, P, K, Ca e Mg, pelo milho, são respectivamente de: 187; 34; 143; 30 e 28 kg ha^{-1} . Porém, com a disponibilidade de novos cultivares e melhoramento genético, cada vez vão surgindo híbridos mais precoces e produtivos. Nesse sentido, Pinho et al. (2009) estudaram a marcha de absorção de macronutrientes em diferentes híbridos (GNZ 2004 e P 30F33), os autores verificaram a seguinte variação no acúmulo entre eles, em escala decrescente de valores: N:401 e 327 kg ha^{-1} , K: 312 e 316 kg ha^{-1} , P: 92 e 76 kg ha^{-1} , Ca: 61 e 60 kg ha^{-1} , Mg: 47 e 37 kg ha^{-1} , S: 30 e 24 kg ha^{-1} .

Tabela 7 – Acúmulo de nutrientes na planta inteira durante o desenvolvimento do milho estimados para a população de 60000 plantas ha⁻¹

Estádios	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
	----- kg ha ⁻¹ -----					----- g ha ⁻¹ -----				
V4	9,2	0,7	7,2	1,3	0,6	0,6	13,4	214,5	32,6	18,1
V7	83,5	8,3	74,9	14,4	7,3	7,3	184,2	1550,5	262,8	193,3
R1	134,6	18,5	116,5	33,4	14,6	14,6	309,7	2005,3	563,8	357,2

Observa-se que, até o estágio V4 de desenvolvimento do milho, a quantidade extraída de nutrientes é bem pequena. Resultados semelhantes foram constatados por Silva (2011), trabalhando com o híbrido DKB 499 cultivado em solução nutritiva.

A absorção de N pelas plantas, no estágio V7 foi 9 vezes superior a V4, e no estágio R1 foi menor que o dobro em relação a V7. Isso evidencia os picos de demanda de nitrogênio pelas plantas durante seu ciclo produtivo. Corroborando com os resultados obtidos por Duarte et al. (2003) e Pinho et al. (2009), que observaram pequena acumulação de N nos estádios iniciais, com um incremento significativo ocorrendo aos 42 dias e um acúmulo crescente e linear até os estádios finais de desenvolvimento do milho.

4.1.4 Interações entre nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e ferro (Fe)

O acúmulo de P, K e Fe na parte aérea do milho responderam significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de N na solução nutritiva (Figuras 22, 23 e 24 a), com ajuste quadrático nos estádios de desenvolvimento V4 (P e K) e R1 (P, K e Fe), e linear nos estádios V4 (Fe) e V7 (P, K e Fe).

O acúmulo de P, K e Fe na raiz das plantas de milho em V4 e para a dose 0 em V7 e R1 não puderam ser realizadas, pelo fato de não ter material vegetal suficiente para serem analisadas. Sendo assim, estão representados apenas 3 doses utilizadas para o acumulado nos estádios V7 e R1 apresentadas nas Figuras 22, 23 e 24 b.

a) Fósforo

O máximo acumulado de P na parte aérea do milho em V4 foi de 10 mg planta⁻¹, obtida com 136 mg L⁻¹ de N e no estágio R1 com 152 mg L⁻¹ de N na solução nutritiva foi de 278,4 mg planta⁻¹. A época V7 obteve resposta linear para o acumulado de P na parte aérea, sendo assim, a dose completa de N proporcionou maior quantidade de fósforo (Figuras 22 a).

Os resultados obtidos para os acúmulos de P na parte aérea podem ter sido em função do crescimento da planta devido ao incremento nos níveis de N na solução nutritiva.

Entretanto é conhecido o efeito sinérgico entre N e o P, as doses de nitrogênio proporcionaram aumento na absorção de P pelas plantas. Resultados semelhantes foram encontrados por Vale et al. (2009) e Falcão Neto (2010).

O efeito do N no aumento da concentração de P pode ser explicado pelo aumento da absorção e transporte do P na planta, visto que o amônio aumenta a taxa de dissociação do complexo fosfato-carregador no xilema, aumentando as concentrações de P na parte aérea (MARSCHNER, 2005). Segundo Yamada (2002), esse efeito do N na absorção do P pela planta quando colocados juntos na faixa de adubação é maior com o nitrogênio amoniacal que com o nítrico, devido ao abaixamento do pH provocado na superfície da raiz com a absorção do NH_4^+ , aumentando, assim, a disponibilidade de P para absorção pelas plantas.

Figura 22 - Acúmulo de fósforo na parte aérea (a) e raiz (b) de plantas de milho submetidas às doses de nitrogênio e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento.

Houve decréscimo significativo ($P < 0,01$) no acúmulo de fósforo na raiz de plantas de milho com o aumento dos níveis de N na solução nutritiva, obtendo o ajuste linear na época V7 e em R1 (Figuras 22 b). No estágio R1, a dose de 145 mg L^{-1} de N obteve o menor acúmulo de P na parte aérea ($48 \text{ mg planta}^{-1}$). De acordo com Malavolta (2006), sob condição de deficiência de N, as plantas podem apresentar teores mais altos de P.

b) Potássio

O máximo acumulado de K na parte aérea do milho em V4 foi de $84 \text{ mg planta}^{-1}$, obtida com $165,6 \text{ mg L}^{-1}$ de N e no estágio R1 com 145 mg L^{-1} de N na solução nutritiva foi de $1664 \text{ mg planta}^{-1}$. A época V7 obteve resposta linear para o acumulado de K na parte aérea, assim, a dose completa de N proporcionou maior quantidade de potássio (Figura 23 a).

Figura 23 - Acúmulo de potássio na parte aérea (a) e raiz (b) de plantas de milho submetidas às doses de nitrogênio e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento.

O acúmulo de K na raiz em V7 não diferiu significativamente em função das doses de N utilizadas. Houve incremento significativo ($P < 0,01$) no acúmulo de potássio na raiz de plantas de milho com o aumento dos níveis de N na solução nutritiva, obtendo um ajuste linear em R1 (Figura 23 b).

A interação de N com o K, assim como para o P, exerce um sinergismo entre esses elementos, e de acordo com Maças (2008), o nitrogênio e o potássio são os nutrientes absorvidos em maiores quantidades pela maior parte das culturas, sendo que a absorção de um eleva a demanda pelo outro. Isso ocorre devido ao N e o K possuírem papel fundamental para a nutrição das plantas; o N, por ser constituinte essencial das proteínas e interferir diretamente no processo fotossintético, pela sua participação na molécula de clorofila, e o K, por ser o cátion em maior concentração nas plantas, sendo um nutriente com relevantes funções fisiológicas e metabólicas, como ativação de enzimas, fotossíntese, translocação de assimilados e também absorção de nitrogênio e síntese proteica, tornando-se, importantes para a produção e qualidade da forragem (MARSCHNER, 1995).

Na literatura é descrito que os principais efeitos positivos dessa interação no milho são: eficiência de utilização do N na presença do K; redução no acamamento do milho e melhoria na qualidade dos grãos, como o conteúdo de proteína, qualidade da silagem e massa de grãos (COSTA et al., 2006).

Gondim et al. (2010), estudando omissão de nutrientes no milho, verificaram diminuição na eficiência de absorção e utilização do K, quando suprimiu o N na solução nutritiva.

Loué (1978) relatou que o balanço das doses de nitrogênio e de potássio é importante desde os estádios iniciais de desenvolvimento da cultura, pois altos teores de N com baixos teores de K, por exemplo, favorecem o acamamento.

Viana (2007) estudou doses de nitrogênio e de potássio no trigo e verificou que os nutrientes em questão foram altamente determinantes na concentração de N na parte aérea da cultura. Alterações na concentração de N nos tecidos foliares em gramíneas em função da variação do suprimento do K, também foram relatadas por Monteiro et al. (1980), Carvalho et al. (1991) e Monteiro et al. (2004).

c) Ferro

O máximo acumulado de Fe na parte aérea do milho no estágio R1 com 152 mg L⁻¹ de N na solução nutritiva foi de aproximadamente 18000 µg.planta⁻¹. O acúmulo de 1132 µg planta⁻¹ e 11053 µg planta⁻¹, nas épocas V4 e V7 respectivamente, foram obtidas com dose completa de N (figuras 24 a).

O resultado obtido para o acúmulo de ferro na parte aérea de plantas de milho no estágio V7 está próximo do encontrado por Marin (2012) na mesma época de avaliação, em estudo com doses de Fe em solução nutritiva no milho.

Silva (2011) verificou o acumulado de Fe na parte aérea entre 14000 e 18000 µg planta⁻¹ na cultura do milho cultivado em hidroponia, aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8.

Figura 24 - Acúmulo de ferro na parte aérea (a) e raiz (b) de plantas de milho submetidas às doses de nitrogênio e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento.

Houve acréscimo significativo ($P < 0,01$) no acúmulo de ferro na raiz de plantas de milho com o aumento dos níveis de N na solução nutritiva, obtendo ajuste linear na época V7 e quadrático em R1 (Figuras 24 b). O acúmulo de $15242 \mu\text{g planta}^{-1}$ foi obtido na dose completa de N, na época V7. Na dose de $150,8 \text{ mg L}^{-1}$ de N obteve-se o máximo acúmulo de Fe na raiz ($23250 \mu\text{g planta}^{-1}$) no estágio R1.

O resultado obtido para o acúmulo de ferro na raiz, também esteve próximo do encontrado por Marin (2012) no estágio V7 do milho.

Silva (2011) verificou o acumulado de Fe na parte aérea entre 18000 e 24000 $\mu\text{g planta}^{-1}$ na cultura do milho cultivado em hidroponia, aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8.

O ferro 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 necessária para a síntese de alguns complexos Fe-proteínas envolvida na assimilação de nitrogênio e enxofre, a formação de clorofila e está diretamente relacionado ao metabolismo de ácidos nucleicos (MALAVOLTA, 2006; TAIZ, 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.

4.1.5 Sistema de visão artificial para diagnose de nitrogênio

O estudo de métodos para o reconhecimento de padrões para a avaliação do estado nutricional em plantas de milho, em diferentes épocas de desenvolvimento (V4, V7 e R1) da planta foi realizada por Zúñiga (2012). Conforme descrito anteriormente, o método que superou outros testados em mais de 10% na taxa de acerto global de classificação foi a Gabor Wavelets multiespectral e fractais (GWF) e métodos de aprendizado de máquinas (SVM) para análise de textura colorida.

Após a análise das Tabelas verificou-se maiores taxas de acertos na ponta das folhas velhas nos estádios V4 e V7, com índice de probabilidade de acerto global de aproximadamente 83% e índice Kappa “confiável” para o reconhecimento de deficiência de nitrogênio em plantas de milho (Tabelas 8 e 10). As matrizes de confusão para os melhores resultados obtidos estão apresentados nos Quadros 1, 2, 3 e 4. Observa-se na diagonal principal a quantidade de imagens que foram corretamente classificadas, das 100 imagens analisadas. E também pode ser observada, na linha da matriz, a quantidade de imagens que o sistema considera pertencente à outra classe (erros de classificação).

As matrizes de confusão dos melhores resultados obtidos com a ponta das folhas velhas (Quadros 1 e 3), indicam que a dose zero foi a classe mais simples de classificar, com acertos de 99% e 100% para as épocas V4 e V7 respectivamente, e a classe 2/5 de N apresentou o maior número de erros na classificação. A dose completa e 1/5 de N apresentaram boa distinção entre elas e entre as demais classes. Os resultados também indicam que é possível obter uma boa separação de classes considerando as doses zero e 1/5 da dose, que são os níveis de deficiência severos e moderados na planta.

Tabela 8 - Resultados médios da classificação usando o método GWF em imagens de folhas de plantas milho, submetidas às doses de nitrogênio, no estágio V4, usando SVM para classificar os dados

GWF	Nº de imagens corretamente classificadas	Probabilidade de acerto global	Índice Kappa	Desvio Padrão do acerto	Confiança do acerto	Número de janelas utilizadas
BaseFV	274,20	68,55	0,58	2,31	0,49	400
BaseFI	319,80	79,95	0,73	1,33	0,50	400
MeioFV	292,20	73,05	0,64	0,99	0,49	400
MeioFI	317,20	79,30	0,72	1,87	0,50	400
PontaFV	331,00	82,75	0,77	1,79	0,49	400
PontaFI	315,20	78,80	0,71	0,41	0,50	400

Quadro 1 - Matriz de confusão do resultado de classificação com a ponta das folhas velhas em V4

Dose 0	1/5 de N	2/5 de N	Dose Completa	
99,4	0,4	0,2	0,0	Dose 0
0,0	60,4	39,6	0,0	1/5 de N
0,0	40,0	60,0	0,0	2/5 de N
0,0	0,0	0,0	100,0	Dose Completa

Quadro 2 - Matriz de confusão do resultado de classificação com a base das folhas indicativas em V4

Dose 0	1/5 de N	2/5 de N	Dose Completa	
99,0	0,4	0,6	0,0	Dose 0
0,0	79,4	16,4	4,2	1/5 de N
0,0	18,0	68,6	13,4	2/5 de N
0,0	5,6	10,4	84,0	Dose Completa

O alto índice de acerto na época V4 é de fundamental importância nesse estudo, pois a identificação precoce de qualquer carência nutricional nesse período de desenvolvimento da planta nos possibilita a correção no cultivo em curso. Outro ponto a ser destacado é o fato do melhor índice de acerto global ter sido observado nas partes das folhas velhas da planta. Resultados que estão coerentes com a literatura e que corroboram com os observados no presente estudo na sintomatologia, variáveis biométricas e extração de N (Tabela 9) pelas plantas.

Tabela 9 - Teor de nitrogênio (g kg^{-1}) na folha indicativa (FI) e na folha velha (FV) de plantas de milho nos estádios de desenvolvimento V4, V7 e R1 submetidas a níveis decrescentes de nitrogênio na solução nutritiva (Média de quatro repetições)

Estádios	Doses de N	FI	FV
	----- mg L^{-1} -----	----- g kg^{-1} -----	
V4	0	4,0	*
	42	44,7	*
	84	49,5	10,4
	210	49,7	11,7
V7	0	3,4	4,6
	42	22,8	21,2
	84	26,9	31,0
	210	37,3	38,1
R1	0	2,6	2,0
	42	24,7	13,7
	84	32,3	23,6
	210	42,3	34,2

*tecido vegetal em quantidade insuficiente para ser analisado.

Tabela 10 - Resultados médios da classificação usando o método GWF em imagens de folhas de plantas milho, submetidas às doses de nitrogênio, no estágio V7, usando SVM para classificar os dados

GWF	Nº de imagens corretamente classificadas	Probabilidade de acerto global	Índice Kappa	Desvio Padrão do acerto	Confiança do acerto	Número de janelas utilizadas
BaseFV	320,00	80,0	0,73	1,46	0,50	400
MeioFV	322,20	80,5	0,74	2,39	0,50	400
MeioFI	303,00	75,7	0,67	1,35	0,50	400
PontaFV	330,20	82,5	0,76	1,33	0,50	400
PontaFI	299,20	74,8	0,66	1,09	0,49	400

Quadro 3 - Matriz de confusão do resultado de classificação com a ponta das folhas velhas em V7

Dose 0	1/5 de N	2/5 de N	Dose Completa	
100,0	0,0	0,0	0,0	Dose 0
0,0	81,0	14,0	5,0	1/5 de N
0,0	15,4	66,0	18,6	2/5 de N
0,0	4,4	12,4	83,2	Dose Completa

Quadro 4 – Matriz de confusão do resultado de classificação com o meio das folhas indicativas em V7

Dose 0	1/5 de N	2/5 de N	Dose Completa	
100,0	0,0	0,0	0,0	Dose 0
0,0	74,2	22,8	3,0	1/5 de N
0,0	23,0	58,2	18,8	2/5 de N
0,0	6,0	4,2	89,8	Dose Completa

Tabela 11 - Resultados médios da classificação usando o método GWF em imagens de folhas de plantas milho, submetidas às doses de nitrogênio, no estágio R1, usando SVM para classificar os dados

GWF	Nº de imagens corretamente classificadas	Probabilidade de acerto global	Índice Kappa	Desvio Padrão do acerto	Confiança do acerto	Número de janelas utilizadas
MeioFV	353,20	88,30	0,84	1,64	0,50	400
MeioFI	367,60	91,90	0,89	1,07	0,50	400
PontaFI	373,00	93,25	0,91	0,58	0,50	400

Quadro 5 – Matriz de confusão do resultado de classificação com a ponta das folhas indicativas em R1

Dose 0	1/5 de N	2/5 de N	Dose Completa	
100,0	0,0	0,0	0,0	Dose 0
0,0	99,6	0,2	0,2	1/5 de N
0,0	0,2	88,4	11,4	2/5 de N
0,0	1,0	14,0	85,0	Dose Completa

Quadro 6 – Matriz de confusão do resultado de classificação com o meio das folhas indicativas em R1

Dose 0	1/5 de N	2/5 de N	Dose Completa	
99,2	0,0	0,8	0,0	Dose 0
0,0	99,8	0,2	0,0	1/5 de N
0,0	2,6	80,0	17,4	2/5 de N
0,0	0,8	10,6	88,6	Dose Completa

A Tabela 11 apresenta os resultados na época R1, nesse estágio de desenvolvimento foram consideradas somente o terço médio das folhas e a ponta das folhas indicativas. Observou-se que diferente das outras épocas, os maiores índices de acertos foram encontrados nas folhas indicativas. A ponta das folhas indicativas obtiveram probabilidade de acerto global de 100%, 99,6%, 88,4% e 85,0%, respectivamente, para as doses 0, 1/5 e 2/5 de N, e dose completa (Tabela 11). O estágio R1 foi o que apresentou índice Kappa considerado “quase perfeito” e melhores probabilidades de acerto global.

Com a evolução do estágio fenológico, houve melhor diferenciação entre as classes, o que pode ser correlacionado com os resultados observados nos sintomas de deficiência nas plantas, com reflexos no desenvolvimento e na nutrição do milho, no referido estágio. Cabe ressaltar que, para o milho, a época R1 é a que melhor reflete o estado nutricional da cultura, tanto que as folhas indicativas nesse estágio constituem em drenos para enchimento dos grãos, e é a folha padrão para determinações analíticas para diagnóstico nutricional.

4.2 Fase I – Potássio (K)

4.2.1 Sintomas visuais

Não se observou sintomas de deficiência de K aos 24 DAE (Figura 27 a). Os sintomas de deficiências de potássio foram observados aos 40 DAE, iniciando-se pela clorose na margem das folhas velhas das plantas submetidas à omissão completa de potássio (Figuras 24 a e b). Ferreira (2012), estudando diagnose por subtração de K em plantas de milho, observou sintomas similares, aos 28 DAE. Rozane et al. (2008) também observaram clorose nas pontas e margens das folhas mais velhas seguida por secamento e necrose, como sintomas iniciais do efeito da omissão de potássio na aveia preta. Sintomas semelhantes foram descritos por Monteiro et al. (1995), Pereira (2001), Mattos et al. (2002), Fonseca et al. (2008) e Avalhães et al. (2009) quando omitiram K em plantas de capim-marandu, capim-mombaça, capim-tanzânia, sorgo e capim-elefante, respectivamente.

Os efeitos da carência de K nas plantas ficaram mais acentuados nas doses 0 e 1/5, onde foi possível notar a evolução dos sintomas típicos da deficiência do elemento, que caminharam das folhas velhas, seguindo para as partes mais novas. Nessas plantas, foi observado encurvamento do caule e, conseqüentemente, tombamento das mesmas, sendo as folhas mais velhas curvadas para baixo e apresentando bronzeamento na margem seguida de necrose na ponta (Figuras 25 a e b e 27 b).

Outro sintoma observado foi o aparecimento de manchas marrom (necrose) ao longo da nervura das folhas mais velhas de plantas submetidas à omissão completa de potássio (Figuras 26 a e b). 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.

Figura 24 - Sintomas de deficiência de potássio em plantas de milho submetidas à omissão completa de potássio aos 40 DAE (a e b).

Figura 25 - Plantas de milho submetidas às doses de potássio (a) aos 78 DAE (R1); sintomas de deficiências de K em plantas submetidas à omissão completa (b), no estágio R1.

Figura 26 - Sintoma de deficiência de potássio em plantas submetidas à omissão completa de K (a e b), no estágio R1.

Figura 27 - Plantas de milho aos 24 DAE no estágio fenológico V4 (a), e aos 78 DAE no estágio fenológico R1 (b), submetidas às doses de potássio.

Semelhante ao nitrogênio, o potássio é um elemento móvel na planta, desta forma, as carências nutricionais vão aparecer em seus órgãos mais velhos, como sintomas típicos, inicialmente as folhas apresentam clorose ao longo das margens, movendo-se gradualmente em direção à nervura principal (MALAVOLTA, 2006).

O K é bastante permeável nas membranas plasmáticas e isto o torna facilmente absorvido e transportado à longa distância pelo xilema e pelo floema. Grande parte do K total da planta está na forma solúvel (mais de 75%), portanto, a sua redistribuição é bastante fácil no floema (FAQUIN, 1994).

De acordo com Taiz e Zeiger (2009), 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.

4.2.2 Variáveis biométricas

Pelos resultados obtidos constatou-se que houve efeito significativo ($P < 0,01$) das doses, épocas e da interação sobre as variáveis biométricas (diâmetro do colmo, altura, número total de folhas), massa seca da parte aérea e raiz, em função do incremento das doses de potássio na solução nutritiva (Figura 28). Porém, o estágio de desenvolvimento V4 não apresentou nenhuma diferença das variáveis analisadas em função das doses de K.

O diâmetro do colmo e a massa seca da parte aérea tiveram ajuste linear na época V7 (Figuras 28 a e d). As demais variáveis tiveram resposta quadrática, sendo a altura máxima de 56,4 cm observada com a dose de potássio em torno de 153 mg L^{-1} e o número máximo de 13 folhas com a dose de 167 mg L^{-1} (Figuras 28 b e c). A massa seca máxima da raiz de plantas de milho correspondeu a $4,8 \text{ g planta}^{-1}$ obtida com 210 mg L^{-1} de K na solução nutritiva (Figuras 28 e).

No estágio R1 do milho, o número total de folhas não apresentou diferenças entre as doses de K utilizadas (Figura 28 c). Na respectiva época, o diâmetro do colmo e a massa seca de raiz apresentaram resposta linear (Figuras 28 a e e), já a altura e a massa seca da parte aérea das plantas ajustou-se a um modelo quadrático, sendo os valores máximos de 195,2 cm e $96,83 \text{ g planta}^{-1}$ obtidos, respectivamente com 172,5 e $169,2 \text{ mg L}^{-1}$ de K na solução nutritiva (Figuras 28 b e d).

Figura 28 - Diâmetro do colmo (a), altura da planta (b), número total de folhas (c), massa seca da parte aérea (d) e massa seca de raiz (e) de plantas de milho submetidas às doses de potássio e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento.

De acordo com os resultados, observou-se que os efeitos da subtração de K revelaram-se com o desenvolvimento do milho, nos quais foram mais acentuados após a época V4, comprometendo o crescimento e a massa seca (parte aérea e raiz) das plantas.

Resultados semelhantes dos efeitos da omissão de potássio no número de folhas, diâmetro do caule e massa seca foram verificados por Prado e Franco (2007) em plantas de milho cultivadas em solução nutritiva aos 42 dias do transplantio. Fonseca et al. (2008) também observaram que a carência de K comprometeu as variáveis de crescimento e produção de massa seca da parte aérea e raiz de plantas de sorgo, avaliadas aos 28 dias após o transplantio, cultivado em sistema hidropônico.

Incrementos na produção de massa seca, no comprimento e na superfície de raízes do capim-tanzânia em solução nutritiva foram constatados por Monteiro e Consolmagno Neto (2008).

Pereira (2001) também obteve respostas similares com o fornecimento de potássio na solução nutritiva, para as variáveis de crescimento (área foliar e perfilhamento) e produção do capim-mombaça. O autor verificou que o maior número de perfilhos foi obtido com dose de K igual ou superior a 234 mg L^{-1} , no final do primeiro crescimento, e igual a 468 mg L^{-1} , no final do segundo crescimento. Observou também, que o K mostrou ser limitante para o crescimento das raízes, ressaltando que na condição de sua omissão, as raízes ficavam finas e frágeis, rompendo facilmente durante a retirada dos vasos e nas sucessivas lavagens. Resultados também observados por Lavres Júnior e Monteiro (2003).

A fragilidade das raízes está relacionada com a translocação de potássio das raízes para a parte aérea durante os estágios de crescimento intenso, sendo insuficiente para o transporte de produtos da fotossíntese retornar para o sistema radicular, em casos de baixa concentração, confirmando a importância do nutriente para o aumento da biomassa da raiz (FERRARI NETO et al., 1994; MEGDA; MONTEIRO, 2010).

4.2.3 Potássio na planta

Os teores de potássio no tecido vegetal das folhas indicativas nas épocas de desenvolvimento do milho responderam significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de K na solução nutritiva, ajustando-se segundo um modelo quadrático nos estádios R1 e V4 e linear em V7 (Figura 29).

Verificou-se que a dose de K na solução nutritiva de 170 mg L^{-1} proporcionou o teor máximo de 47 mg kg^{-1} no estágio V4 e 24 mg kg^{-1} em R1. O teor foliar de 35 mg kg^{-1} foi obtido na época V7.

Figura 29 - Teor de potássio na folha indicativa de plantas de milho submetidas às doses de K e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento.

Os maiores teores foliares de K foram observados no estágio V4 devido ao efeito de concentração do nutriente. O teor máximo de K obtido na folha indicativa do milho no estágio de desenvolvimento R1 (24 g kg⁻¹) está dentro dos níveis considerados adequados para a cultura, que segundo a literatura variam de 17,5 a 29,5 g kg⁻¹ (BÜLL, 1993), 17 a 35 g kg⁻¹ (RAIJ; CANTARELLA, 1996), 17,5 a 22,5 g kg⁻¹ (MARTINEZ et al., 1999), 20 a 40 g kg⁻¹ (FANCELLI, 2000) e 17 a 30 g kg⁻¹ (MALAVOLTA, 2006).

Verifica-se nas Figuras 30 a e b que o acúmulo de potássio na parte aérea e raiz das plantas, nas épocas de desenvolvimento do milho foram significativamente ($P < 0,01$) influenciados pelo incremento nas doses de K na solução nutritiva, ajustando-se a um modelo quadrático na parte aérea nos estádios V7 e R1, e na raiz das plantas no estágio V4. O modelo linear ajustou-se para a parte aérea das plantas em V4, e na raiz em V7 e R1 (Figuras 30 a e b).

No estágio V4, as doses de 235 e 157 mg L⁻¹ de K proporcionaram, respectivamente, o acumulado na parte aérea de 60 mg planta⁻¹ e 19,45 mg planta⁻¹ na raiz.

Observou-se, no estágio V7 o acúmulo máximo na parte aérea das plantas de 670 mg.planta⁻¹ de potássio obtido com a dose de 186 mg L⁻¹, na raiz o acumulado de K foi de 106,2 mg planta⁻¹ com a dose máxima utilizada.

De acordo com a Figura 30, constatou-se que o maior acúmulo de K na parte aérea (2157 mg planta⁻¹) e raiz (577 mg planta⁻¹) foram observados no estágio R1 do milho (aos 78 DAE), respectivamente com as doses de 180 e 235 mg L⁻¹.

Figura 30 - Acúmulo de potássio na parte aérea (a) e raiz (b) de plantas de milho submetidas às doses de nitrogênio e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento.

As plantas responderam positivamente com as doses de potássio utilizadas, nas épocas estudadas. Observa-se que no estágio inicial o acúmulo é notadamente semelhante em relação aos níveis de K na solução nutritiva. Posteriormente, verificou-se incremento de forma acentuada, o que pode ser explicado pelo desenvolvimento vegetativo apresentado pelas plantas com o acréscimo das doses (Figuras 29 d e e).

A disponibilidade inicial de K é determinante na sua absorção e acúmulo no tecido das plantas de milho (VYN; JANOVICEK, 2001). As plantas, em geral, têm uma demanda inicial de K elevada, de acordo com Coelho (2007), as exigências de potássio pelas plantas de milho seguem um padrão diferente em relação ao nitrogênio, em que a máxima absorção ocorre na fase vegetativa, com elevada taxa de acúmulo nos primeiros 30 a 40 dias de desenvolvimento, sugerindo maior necessidade de K na fase inicial como elemento de “arranque” para a produção de biomassa. Segundo o mesmo autor, quando a planta acumula 50% de massa seca (por volta de 65 a 70 dias), absorveu cerca de 90% de sua necessidade total de K. Porém os

estudos realizados por Olness e Benoit (1992), Coelho et al. (1996) e Mullins e Burmester (1996) demonstraram que o milho apresenta picos de absorção de K tanto na fase vegetativa como na reprodutiva, com o aumento dessa absorção entre o florescimento e a fase de enchimento de grãos. Os resultados obtidos corroboram com esses autores, pois o maior acúmulo de K na parte aérea e raiz foram verificados no estágio R1.

O acúmulo de macro e micronutrientes total (parte aérea e raiz) durante os estádios de desenvolvimento do milho estimados para a população de 60000 plantas ha^{-1} está apresentado na Tabela 12.

Os acúmulos totais de macronutrientes no estágio R1 seguiram a seguinte ordem decrescente de valores em kg ha^{-1} : K (151) > N (141) > Ca (34) > S (26,6) > P (21,6) > Mg (12,1) e dos micronutrientes em g ha^{-1} : Fe (2375,2) > Mn (1291,0) > Zn (331,1) > Cu (116,7).

Tabela 12 – Acúmulo de nutrientes na planta inteira durante o desenvolvimento do milho estimados para a população de 60000 plantas ha^{-1}

Estádios	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
	----- kg ha^{-1} -----					----- g ha^{-1} -----				
V4	5,7	0,7	4,8	0,7	0,2	0,6	3,2	24,1	16,8	5,4
V7	59,4	6,9	44,3	9,7	3,6	5,8	46,2	93,6	198,5	82,6
R1	141,2	21,6	151,1	34,0	21,0	26,6	16,0	2375,2	1291,0	331,7

Observa-se que o acúmulo total de macro e micronutrientes até o estágio V4 é menor quando comparado aos demais estádios estudados, concordando com os resultados encontrados por Silva (2011). Segundo Flannery (1987) em plantas de milho, a absorção de nutrientes no referido estágio corresponde a 3% do N total acumulado durante todo o ciclo, aproximadamente 5% do K e 2% do P, Ca, Mg e S.

A absorção de K pelas plantas, no estágio V7 foi de aproximadamente 9 vezes superior a V4, e no estágio R1 foi mais que o triplo em relação a V7. Isso evidencia a importância no suprimento do potássio durante a fase vegetativa da cultura. Von Pinho et al. (2009) observaram 3 picos de absorção de K na cultura do milho, o primeiro durante a fase de intenso crescimento vegetativo, um na maturidade fisiológica, quando observaram o acúmulo máximo do nutriente nas plantas e um pico intermediário que correspondeu ao período de enchimento de grãos. Entretanto, Coelho et al. (2005) destaca que o aumento da absorção de potássio após o florescimento não se traduz em aumentos significativos da produção de grãos com aplicações tardias do nutriente.

Segundo Usherwood (1982) e Malavolta et al. (1989) o K é um elemento requerido pelas plantas em maior quantidade, apresentando a mesma ordem de exigência de N. É considerado o nutriente em ordem de extração nas culturas, pela sua contribuição na formação e translocação de carboidratos, uso eficiente da água pela planta, além de facilitar a absorção de outros nutrientes (MARSCHNER, 1995; FILGUEIRA, 2000).

4.2.4 Interações entre potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg)

O teor de cálcio na folha indicativa do desenvolvimento do milho reduziu significativamente ($P < 0,01$), com o incremento das doses de K na solução nutritiva, ajustando-se a um modelo linear. Entretanto, não houve interação entre as épocas avaliadas (Figura 31 a).

O teor de magnésio na folha indicativa do desenvolvimento do milho também apresentou redução significativa ($P < 0,05$), com o incremento das doses de K na solução nutritiva no estágio V4 e para os estádios V7 e R1 ($P < 0,01$). Em V4 e V7, os teores de Mg decresceram segundo um modelo linear e em R1 ajustou-se a um modelo quadrático (Figura 31 b).

Com o incremento das doses de K, observou-se decréscimo nos teores de Ca e Mg nas folhas indicativas. Porém, verificou-se que os teores de Ca observados estão de acordo com os adequados para a cultura do milho, que podem variar de 2,5 a 10 g kg⁻¹ por ocasião do florescimento (MALAVOLTA et al., 1989; BÜLL, 1993; MARTINEZ et al., 1999; RAIJ; CANTARELLA, 1996). No entanto, para os teores de magnésio observou-se que a dose máxima obtida de K (187 mg L⁻¹), no estágio R1, correspondeu ao teor mínimo de 0,53 g kg⁻¹ de Mg nas folhas diagnóstica, valor considerado abaixo do adequado segundo os mesmos autores supracitados, que consideram os teores ideais de Mg dentro da faixa de 1,5 a 5,0 g kg⁻¹.

Figura 31 - Teores de cálcio (a) e magnésio (b) nas folhas indicativas de plantas de milho submetidas às doses de K e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento.

Figura 32 - Acúmulo de cálcio na parte aérea (a) e raízes (b) de plantas de milho submetidas às doses de potássio e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento

Figura 33 - Acúmulo de magnésio na parte aérea (a) e raiz (b) de plantas de milho submetidas às doses de potássio e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento

Os nutrientes K, Ca e Mg apresentam interação do tipo inibição competitiva, em que os elementos possuem o mesmo tipo de carga, valência igual ou próxima e devem ter semelhanças quanto ao raio iônico e ao grau de hidratação (MALAVOLTA, 2006). O íon de menor diâmetro e de menor valência são preferenciais na ordem de absorção. Dessa forma, íons monovalentes como K^+ , são preferencialmente absorvidos em relação aos divalentes, como Ca^{2+} e Mg^{2+} (MARSCHNER, 1986).

De acordo com os resultados obtidos, nota-se que o efeito inibitório foi mais expressivo para o magnésio, quando se observa o acúmulo na parte aérea e raiz das plantas (Figuras 33 a e b) comparada aos resultados obtidos com o cálcio (Figuras 32 a e b). Os menores acúmulos de Mg na parte aérea foram 0,34, 47,90 e 139 mg planta⁻¹ em V4, V7 e R1 respectivamente, e nas raízes foi de 1,01 mg planta⁻¹ no estágio V4.

Segundo Andreotti et al. (2001), a competição entre magnésio e potássio ocorre durante o processo de absorção radicular, uma vez que utilizam os mesmos sítios de absorção. No entanto, o efeito negativo do desbalanço de nutrientes somente é detectado a partir do florescimento da cultura do milho, por meio da determinação do acúmulo de nutrientes e produção de massa seca. A correção do problema nesse estágio não surtirá efeito. Portanto, a proporção de K em relação ao Ca e Mg deve ser definida na implantação da cultura.

Os resultados obtidos corroboram com o relatado acima, tendo em vista a Figura 33 b é possível visualizar na curva correspondente ao estágio R1, que a partir de 127 mg L⁻¹ de K na solução nutritiva, começa a diminuir a absorção de magnésio pela raiz e conseqüentemente menor translocação para a parte aérea.

As plantas submetidas à omissão completa de potássio apresentaram a maior relação Ca+Mg/K na parte aérea e raiz, em todas as épocas avaliadas (Tabela 13). Verifica-se que as maiores relações foram observadas no estágio R1. Observou-se que a subtração de K apresentou uma relação Ca+Mg/K de 4,8 na parte aérea, ou seja, dezesseis vezes maior que no tratamento completo, que foi de 0,3; na raiz essa relação foi mais de sete vezes (Tabela 13). Os resultados nos permite inferir também, que a dose máxima de K utilizada pode ter sido excessiva para as condições de casa de vegetação em solução nutritiva, causando um desbalanço na relação K/Mg. De acordo com Fornasier Filho (1992) a relação Ca+Mg:K deve ser 0,5:1 na parte aérea das plantas de milho.

Fonseca et al. (2008) verificaram que a omissão de potássio na solução nutritiva com a cultura do sorgo apresentou a relação Ca+Mg/K dezoito vezes maior que no tratamento em que foi fornecido todos os nutrientes. Resultados semelhantes foram observados por Oliveira

et al. (2001) com a soja, sendo que as plantas cultivadas com a omissão de K apresentaram a relação Ca+Mg/K quase duas vezes maior comparado com as doses adequadas do nutriente.

Silva (2011) também observou aumento nas relações Ca+Mg/K em plantas de milho, com omissão individual de cálcio e magnésio na solução nutritiva. Sendo as relações 0,3:1 e 0,4:1 na parte aérea e raiz, quando da omissão completa de cálcio e na omissão completa de magnésio as relações na parte aérea e raiz, foram respectivamente 0,3:1 e 0,55:1.

Tabela 13 – Relações de Ca+Mg/K na parte aérea (PA) e raiz (RZ) de plantas de milho nos estádios de desenvolvimento V4, V7 e R1 submetidas a níveis decrescentes de nitrogênio na solução nutritiva (Média de quatro repetições)

Estádio	Doses de K <i>mg L⁻¹</i>	Relação Ca+Mg/K	
		PA	RZ
V4	0	0,40	0,78
	47	0,19	0,38
	94	0,23	0,31
	235	0,17	0,22
V7	0	1,07	1,42
	47	0,48	1,10
	94	0,33	0,77
	235	0,28	0,41
R1	0	4,88	2,29
	47	0,64	1,00
	94	0,41	0,54
	235	0,30	0,32

4.2.5 Sistema de visão artificial (SVA) para diagnose de potássio

Após a análise da tabela 14 verificou-se maior taxa de acerto na base das folhas indicativas no estágio V4, com probabilidade de acerto global de aproximadamente 75% e índice Kappa “confiável”.

As matrizes de confusão para os melhores resultados obtidos, que corresponderam à base das folhas indicativas (Quadro 7) e ao terço médio das folhas indicativas (Quadro 8). Observa-se na diagonal principal a quantidade de imagens que foram corretamente classificadas, das 100 imagens analisadas. E também pode ser observada, na linha da matriz, a quantidade de imagens que o sistema considera pertencente à outra classe (erros de classificação).

Tabela 14 – Resultados médios da classificação usando o método GWF em imagens de folhas de plantas milho, submetidas às doses de potássio, no estágio V4, usando SVM para classificar os dados

GWF	Nº de imagens corretamente classificadas	Probabilidade de acerto global	Índice Kappa	Desvio Padrão do acerto	Confiança do acerto	Número de janelas utilizadas
BaseFV	175,80	43,95	0,25	1,29	0,48	400
BaseFI	298,00	74,50	0,66	2,59	0,49	400
MeioFV	200,20	50,05	0,33	2,34	0,48	400
MeioFI	266,40	66,60	0,55	1,05	0,49	400
PontaFV	211,20	52,80	0,37	2,67	0,49	400
PontaFI	261,80	65,45	0,53	2,91	0,49	400

Quadro 7 – Matriz de confusão do resultado de classificação com a base das folhas indicativas em V4

Dose 0	1/5 de K	2/5 de K	Dose Completa	
99,2	0,0	0,8	0,0	Dose 0
0,0	61,0	7,6	31,4	1/5 de K
0,0	9,6	76,6	13,8	2/5 de K
0,0	25,6	13,2	61,2	Dose Completa

Quadro 8 – Matriz de confusão do resultado de classificação com o meio das folhas indicativas em V4

Dose 0	1/5 de K	2/5 de K	Dose Completa	
100,0	0,0	0,0	0,0	Dose 0
0,0	56,2	22,8	21,0	1/5 de K
0,0	31,2	51,2	17,6	2/5 de K
0,0	20,6	20,4	59,0	Dose Completa

Na matriz de confusão do Quadro 7 a classe com as imagens de folhas da dose zero obteve 99% de acerto, de 100 imagens analisadas e 1% das imagens classificadas como 2/5 da dose. Para 1/5 da dose de K, 61% de imagens foram corretamente identificadas dentro da classe. Dentro da classe 2/5 da dose de K, 77% das imagens foram corretamente classificadas. E para a dose completa foram obtidos 61% de acertos, e os erros de classificação foram de 26% e 13% para as doses intermediárias 1/5 e 2/5 respectivamente.

A identificação pelo sistema de visão artificial entre as classes, nesse estágio de desenvolvimento reforça a possibilidade de utilização do SVA, para a detecção precoce de

carência nutricional. Visto que aos 24 dias (V4) as plantas ainda não tinham manifestado sintomas visíveis de deficiência de K, bem como diferenças significativas nas avaliações biométricas e produção de massa seca (Figura 27 a e 28), e os teores de potássio nas folhas muito próximos entre os tratamentos (Quadro 10). A proximidade dos teores foliares de K também pode explicar o fato do SVA obter os erros de classificação entre as doses de potássio utilizadas (Tabela 15).

Entretanto, mesmo assim conseguiu diferenciação entre elas, com acertos superiores a 60%, sendo que para 2/5 da dose foi de aproximadamente 77%. Cabe ressaltar que não houve erros de classificação para as doses 1/5, 2/5 e completa dentro da classe 0 de K.

Tabela 15 - Teor de potássio (g kg^{-1}) na folha indicativa (FI) e na folha velha (FV) de plantas de milho nos estádios de desenvolvimento V4, V7 e R1 submetidas a níveis decrescentes de potássio na solução nutritiva (Média de quatro repetições)

Estádios	Doses de K	FI	FV
	----- mg L^{-1} -----		----- g kg^{-1} -----
V4	0	30,0	*
	47	44,2	*
	94	40,2	*
	235	44,5	*
V7	0	6,2	10,5
	47	13,7	14,5
	94	24,5	15,5
	235	33,2	18,2
R1	0	2,7	5,2
	47	14,0	13,7
	94	19,2	15,2
	235	22,2	23,2

*tecido vegetal em quantidade insuficiente para ser analisado.

Tabela 16 - Resultados médios da classificação usando o método GWF em imagens de folhas de plantas milho, submetidas às doses de potássio, no estágio V7, usando SVM para classificar os dados

GWF	Nº de imagens corretamente classificadas	Probabilidade de acerto global	Índice Kappa	Desvio Padrão do acerto	Confiança do acerto	Número de janelas utilizadas
BaseFV	281,40	70,35	0,60	1,62	0,49	400
MeioFV	248,20	62,05	0,49	3,43	0,49	400
MeioFI	158,40	39,60	0,19	1,82	0,48	400
PontaFV	229,80	57,45	0,43	1,97	0,49	400
PontaFI	174,60	43,65	0,24	4,85	0,48	400

No estágio V7 observou-se que as maiores taxas de acertos foram na base e terço médio das folhas velhas com probabilidade de acerto global de 70 e 62% respectivamente, correspondendo ao índice Kappa “moderado” (Tabela 16).

As matrizes de confusão dos melhores resultados da base das folhas velhas (Quadros 9 e 10) indicam que a classe da dose zero foi a mais simples de classificar, com acertos de 82%, e com erros de classificação dentro das doses intermediárias. E assim como no estágio V4, as doses 1/5 e 2/5 dificuldade de separação entre elas. Porém, obteve acertos superiores a 65% dentro da classe 1/5 de K e 77% para a dose completa. A classe da dose 2/5 apresentou menor taxa de acerto (57%). O melhor índice de acerto nas folhas velhas nesse estágio corrobora com a sintomatologia característica da deficiência de potássio nas plantas. Assim como para o nitrogênio, os sintomas iniciam nas folhas velhas das plantas.

Quadro 9 – Matriz de confusão do resultado de classificação com a base das folhas velhas em V7

Dose 0	1/5 de K	2/5 de K	Dose Completa	
81,8	11,0	6,6	0,6	Dose 0
13,0	65,6	17,0	4,4	1/5 de K
8,6	20,0	57,0	14,4	2/5 de K
0,4	9,6	13,0	77,0	Dose Completa

Quadro 10 – Matriz de confusão do resultado de classificação com o meio das folhas velhas em V7

Dose 0	1/5 de K	2/5 de K	Dose Completa	
90,2	4,0	5,4	0,4	Dose 0
6,4	59,2	17,6	16,8	1/5 de K
7,6	25,0	47,4	20,0	2/5 de K
2,4	27,6	18,6	51,4	Dose Completa

Tabela 17 - Resultados médios da classificação usando o método GWF em imagens de folhas de plantas milho, submetidas às doses de potássio, no estágio R1, usando SVM para classificar os dados

GWF	Nº de imagens corretamente classificadas	Probabilidade de acerto global	Índice Kappa	Desvio Padrão do acerto	Confiança do acerto	Número de janelas utilizadas
MeioFV	201,80	50,45	0,33	2,73	0,49	400
MeioFI	281,00	70,25	0,60	0,95	0,49	400

Quadro 11 – Matriz de confusão do resultado de classificação com o meio das folhas indicativas em R1

Dose 0	1/5 de K	2/5 de K	Dose Completa	
98,4	0,2	0,6	0,8	Dose 0
1,6	58,4	33,2	6,8	1/5 de K
0,0	33,6	54,2	12,2	2/5 de K
3,0	12,8	14,2	70,0	Dose Completa

O terço médio das folhas indicativas apresentou maior probabilidade global (70%) em relação ao terço médio das folhas velhas, no estágio R1 (Tabela 17). Novamente, as classes das doses 1/5, 2/5 e completa obtiveram dificuldades de separação entre elas. Entretanto, observa-se 70% de acerto dentro da classe com a dose completa de K. O maior acerto nas folhas indicativas pelo SVA corrobora com a literatura, pois na época R1 as folhas indicativas correspondem à folha diagnóstica para determinações analíticas e para avaliação do estado nutricional do milho.

4.3 Fase I – Fósforo (P)

4.3.1 Sintomas visuais

A carência de fósforo pelas plantas submetidas à omissão completa do nutriente foi possível de ser observada desde os estádios iniciais. Notou-se pequeno porte nas plantas, folhas estreitas, clorose e manchas arroxeadas nas folhas velhas, que evoluíram para necrose (Figuras 34 a, b, c e d). Ferreira (2012), estudando omissões nutricionais no milho, verificou implicações no crescimento e coloração roxa nas folhas mais velhas seguida de necrose no tecido. Efeitos similares da subtração de fósforo foram relatadas por Paula et al. (2000) e Prado e Vidal (2008) no milheto.

Figura 34 - Sintomas de deficiência de fósforo nas folhas de plantas de milho aos 23 DAE (a, b e c). Comparação entre as folhas de milho submetidas à omissão total de P com a dose completa (d e e) aos 31 DAE. Plantas de milho submetidas a 1/5 da dose (f) e à dose completa de P (g) aos 59 DAE. (Fotos: L. M. ROMUALDO).

Observaram-se nas plantas cultivadas com 1/5 da dose de fósforo, pigmentos roxos no caule e nas lígulas das folhas mais velhas (Figura 34 e). Sintomas nos quais não foram notados na dose completa (Figura 34 f). De acordo com Taiz e Zeiger (2009) o aparecimento de manchas roxas em plantas deficientes em fósforo é devido ao excesso do pigmento antocianina, decorrente do acúmulo de fotoassimilados nos tecidos vegetais. Fornasier Filho (1992) relata que plantas de milho em condição de baixo suprimento de P, nos primeiros

estádios do desenvolvimento, já apresentarão crescimento lento, e colmos e folhas com coloração arroxeada.

De acordo com Coelho et al. (2002), os primeiros sintomas de carência de P nas plantas de milho geralmente aparecem quando as plantas são muito jovens, sendo a sintomatologia inicial nas plantas caracterizada pelo aparecimento dessa coloração roxa e os colmos se apresentarem frágeis e delgados. Segundo Malavolta (2006), os efeitos da deficiência de fósforo no crescimento é devido a esse elemento estar ligado a função estrutural e no processo de transferência e armazenamento de energia, afetando vários processos metabólicos como a síntese de proteínas e ácido nucleicos.

A omissão de fósforo limitou o crescimento e o desenvolvimento radicular de plantas de milho (Figuras 35 e 36). Rozane et al. (2008) observaram diminuição no volume e no comprimento do sistema radicular da aveia preta cultivada em solução nutritiva com omissão de fósforo, aos 35 DAE.

Figura 35 - Plantas de milho no estágio fenológico V4 (a), V7 (b) e R1 (c), submetidas às doses de fósforo. (Fotos: L. M. ROMUALDO).

Figura 36 – Desenvolvimento radicular de plantas de milho submetidas às doses de P na solução nutritiva aos 59 DAE. (Foto: L. M. ROMUALDO).

4.3.2 Variáveis biométricas

Pelos resultados obtidos constatou-se que houve efeito significativo ($P < 0,01$) das doses, épocas e da interação sobre as variáveis biométricas (diâmetro do colmo, altura e número total de folhas), massa seca da parte aérea e raiz (Figura 37), em função do incremento das doses de fósforo na solução nutritiva.

Nas três épocas avaliadas, as variáveis biométricas responderam às doses de fósforo segundo um modelo quadrático e a dose de 20 mg L^{-1} de P, proporcionou os valores máximos para todas as variáveis analisadas. Não houve ajuste no modelo para o número total de folhas na época V4 (Figura 37 c).

O diâmetro máximo do colmo foi de 1,01 cm no estágio V4 e 2,50 cm para os estádios V7 e R1. A altura máxima das plantas foi de 22, 71 e 242 cm nos estádios V4, V7 e R1 respectivamente. Nos estádio V7 e R1 o número máximo de folhas foi respectivamente de 13 e 19 folhas.

A massa seca máxima da parte aérea e da raiz de plantas de milho foi respectivamente de 135,0 e 27,0 g planta^{-1} no estágio R1 (Figura 37 d e e).

Observa-se que a omissão e a redução de fósforo na solução nutritiva afetaram o crescimento e consequentemente a produção de massa seca das plantas (Figura 37). Resultados semelhantes foram obtidos por Alves et al. (1996) estudando omissão de fósforo em híbridos de milho, verificaram que em 10 dias de interrupção no fornecimento do nutriente ocasionou redução na taxa de crescimento relativo das folhas (25% a 30%) e dos colmos (12% a 15%) em comparação com plantas que não houve omissão no mesmo período. Harger et al. (2007) também observaram aumento na produção de massa seca da parte aérea do milho com o incremento nas doses de P.

Como elemento com papel chave em todos os processos metabólicos relacionados à aquisição, estocagem e utilização da energia, como açúcares fosfatados, adenosinas fosfatadas e em nucleotídeos e ácidos nucleicos (EPSTEIN; BLOOM, 2006), o suprimento inadequado acarretará no comprometimento do crescimento radicular e, consequentemente, no desenvolvimento da parte aérea das plantas com reflexos na produção de grãos (MENGEL; KIRBY, 1987).

Figura 37 - Diâmetro do colmo (a), altura da planta (b), número total de folhas (c), massa seca da parte aérea (d) e massa seca de raiz (e) em plantas de milho submetidas às doses de fósforo e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento.

Nas raízes, notou-se que as doses intermediárias (6,2 e 12,4 mg L⁻¹) apresentaram valores muito próximos quando comparadas com a dose completa do nutriente, o que também pode ser verificado ao observar as Figuras 37 b, c e d. Esse fato é devido a resposta da planta a deficiência de P, ou seja, para aumentar a eficiência de absorção do nutriente que está sendo limitante, houve o incremento no desenvolvimento radicular. Resultados semelhantes foram relatados em diversas culturas (MOURA et al., 1999; MACHADO et al., 2001; CAMACHO et al., 2002; CANTÃO, 2007; SAVIO et al., 2008). De acordo com Grant et al. (2001) a relação raiz-parte aérea da planta aumenta quando existe carência de P no início do seu desenvolvimento. Isto significa que a redução no crescimento, por efeito da deficiência de fósforo, geralmente é maior na parte aérea da planta do que nas raízes, permitindo desta forma manter pelo menos o crescimento radicular para encontrar e extrair P do solo.

4.3.3 Fósforo na planta

Houve efeito significativo ($P < 0,01$) das doses, épocas e da interação sobre os teores de fósforo no tecido vegetal das folhas indicativas, acumulado de P na parte aérea e raiz de plantas de milho (Figuras 38 e 39).

O teor de fósforo no tecido vegetal das folhas indicativas nas épocas de desenvolvimento do milho ajustou-se a um modelo linear (Figura 38). As plantas cultivadas com a dose zero de P na solução nutritiva não apresentaram tecidos foliares suficientes para serem analisados, deste modo, na Figura 38 constam os teores para as demais doses utilizadas no estudo.

Os teores de P na folha indicativa no estágio de desenvolvimento R1 nas doses 2/5 e completa estão dentro das faixas adequadas para a cultura do milho, de acordo com a literatura variam de 1,9 a 3,5 g kg⁻¹ (BÜLL, 1993), 1,9 a 4,0 g kg⁻¹ (RAIJ; CANTARELLA, 1996), 2,5 a 3,5 g kg⁻¹ (MARTINEZ et al., 1999) e 2,5 a 4,0 g kg⁻¹ (FANCELLI, 2000; MALAVOLTA, 2006).

Figura 38 - Teor de fósforo na folha indicativa de plantas de milho submetidas às doses de fósforo e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento.

Verificou-se incremento significativo ($P < 0,01$) no acúmulo de fósforo na parte aérea e raízes das plantas, com o aumento das doses de P na solução nutritiva. O acumulado da parte aérea e raízes ajustaram-se ao modelo quadrático em V4, e em V7 somente para as raízes. Repostas lineares foram observadas no estágio R1 (parte aérea e raiz) e raízes em V7 (Figuras 39 a e b).

Na época V4, as doses de 20 e 24 mg L⁻¹ de P proporcionaram, respectivamente, o acúmulo máximo de 25 mg planta⁻¹ do nutriente na parte aérea e 6,0 mg planta⁻¹ nas raízes.

Observou-se no estágio V7 o acumulado máximo de P na parte aérea de 96 mg planta⁻¹. Os resultados encontrados estão muito próximos dos obtidos por Silva (2011) no estágio V8 do milho cultivado em hidroponia, que observou o acumulado de P na parte aérea de 109 mg planta⁻¹.

De acordo com a Figura 39, constatou-se que o maior acúmulo de fósforo na parte aérea (383 mg planta⁻¹) e raiz (34 mg planta⁻¹) foram observados no estágio R1 do milho (aos 93 DAE), o que evidencia o período de maior exigência por ocasião da formação e desenvolvimento dos grãos, quando além da absorção, também há uma intensa translocação deste nutriente para os grãos (FORNASIERI FILHO, 1992). De acordo com Fancelli (2009) cerca de 60 a 78% do fósforo extraído é exportado para os grãos.

Figura 39 - Acúmulo de fósforo na parte aérea (a) e raiz (b) de plantas de milho submetidas às doses de fósforo e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento.

Observa-se na Tabela 18, o acúmulo total (parte aérea e raiz) de macro e micronutrientes durante os estádios de desenvolvimento do milho estimado para a população de 60000 plantas ha⁻¹ com a dose completa de nutrientes.

Tabela 18 – Acúmulo de nutrientes na planta inteira durante o desenvolvimento do milho estimado para a população de 60000 plantas ha⁻¹

Estádios	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
	kg ha ⁻¹					g ha ⁻¹				
V4	8,5	0,9	4,0	1,6	0,5	0,5	5,66	116,1	19,9	11,8
V7	53,4	6,4	33,1	15,8	6,3	4,7	22,5	279,8	176,4	48,8
R1	159,8	24,1	144,3	69,3	17,6	22,9	84,8	1022,6	816,4	176,1

O P foi o quarto macronutriente mais extraído pelas plantas de milho nas épocas avaliadas. O acúmulo de fósforo mostra-se mais acentuado após o estágio V7, por ocasião também do crescimento e acúmulo de massa seca pelas plantas, consequentemente uma demanda maior por nutrientes.

A ordem de extração dos macronutrientes correspondeu a $N > K > Ca > P > Mg > S$. Resultados semelhantes foram verificados em condições de casa de vegetação por Silva (2011).

De acordo com Pinho et al. (2009) há aumento significativo nos totais de P acumulado nos estádios finais, principalmente a partir do estágio 9, que corresponde ao final da maturação dos grãos (125 DAE). Os autores constataram em média, os valores máximos de fósforo acumulados de $83,22 \text{ kg ha}^{-1}$, resultados que diferem muito dos obtidos em trabalhos realizados anteriormente, ou seja, 30 kg ha^{-1} por Andrade et al. (1975a) e 24 kg ha^{-1} por Vasconcellos et al. (1983). Segundo Pinho et al. (2009) isso provavelmente está relacionado ao maior rendimento de grãos das cultivares estudada, comparada aos obtidos por outros autores, uma vez que esse nutriente é acumulado em grande proporção nos grãos. Cabe ressaltar, que os trabalhos realizados pelos autores supracitados foram conduzidos em condições de campo e avaliados durante todo o ciclo do milho.

Andrade et al. (1975a) mostram o pico de acúmulo de cálcio, magnésio e enxofre entre 80 e 90 DAE, nas quantidades médias de 34, 34 e 32 kg ha^{-1} respectivamente. Von Pinho et al. (2009) verificaram o máximo acumulado de Ca no estágio 9 (125 DAE), com um total de 60 kg ha^{-1} . Incrementos lineares ao longo do ciclo com valores superiores a 46 kg ha^{-1} e por volta de 30 kg ha^{-1} foram observados respectivamente para o Mg e S.

4.3.4 Interação entre fósforo (P), manganês (Mn) e zinco (Zn)

Houve efeito significativo ($P < 0,01$) das doses de fósforo sobre os teores foliares de manganês. Como não houve interação entre as épocas estudadas realizou-se o estudo da regressão apenas para o efeito das doses (Figura 40). Não houve tecido foliar suficiente para a determinação de Mn e Zn nas plantas cultivadas com dose zero de P.

As doses, épocas e interação foram significativas ($P < 0,01$) sobre os teores de zinco nas folhas indicativas, acumulado de Mn e Zn na parte aérea e raízes (Figuras 41, 42 e 43).

a) Manganês

Os teores de manganês no tecido vegetal das folhas indicativas do desenvolvimento do milho aumentaram com o incremento das doses de fósforo. O maior teor de Mn no tecido foliar foi de 191 mg kg⁻¹ obtido com 24,6 mg L⁻¹ de P na solução nutritiva (Figura 40).

O teor de Mn encontrado nas folhas está de acordo com os níveis adequados para o milho, que podem variar, segundo vários autores, de 20 a 200 mg kg⁻¹ (BÜLL, 1993; RAIJ; CANTARELLA, 1996; MARTINEZ et al., 1999; FANCELLI, 2000; MALAVOLTA 2006).

Figura 40 - Teor de manganês na folha indicativa de plantas de milho submetidas às doses de fósforo e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento.

O acúmulo de Mn na parte aérea do milho e raízes respondeu significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de fósforo na solução nutritiva, para todas as épocas avaliadas, ajustando-se ao modelo quadrático, exceto para o acumulado nas raízes no estágio V4 que não houve diferença (Figuras 41 a e b).

O máximo acumulado de manganês na parte aérea foi na época R1 (11551,5 µg planta⁻¹), quando a dose de P na solução estava por volta de 25,8 mg L⁻¹ (Figura 41 a) e a dose de 22,6 mg L⁻¹ proporcionou o acúmulo máximo de 2922,4 µg planta⁻¹ de Mn nas raízes (Figura 41 b). A dose de fósforo de 19 mg L⁻¹ proporcionou o acumulado máximo de Mn na parte aérea (421,4 µg planta⁻¹) no estágio V4 e nas raízes (1016,8 µg planta⁻¹) em V7. Para a parte aérea em V7, o acúmulo máximo de 2841,8 µg planta⁻¹ foi obtido com a dose de 21 mg L⁻¹ de P.

O acumulado de Mn encontrado na parte aérea do milho em R1 corroboram com o encontrado por Andrade et al. (1975b) em condições de campo obtiveram aos 80 dias após a emergência, aproximadamente, 11000 µg planta⁻¹ de Mn. Duarte et al. (2003) também em

condições de campo, observaram valores médios no acúmulo de manganês em diferentes híbridos de milho de 10350 a 12800 μg no período de 30 a 90 dias.

Em estudos cultivando milho em hidroponia, Silva (2011) encontrou valores entre 1000 a 1600 μg de Mn por planta na parte aérea e 210 a 600 μg de Mn por planta, aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, resultados inferiores ao presente estudo na ocorrência do estágio V7.

Observa-se que o efeito do aumento da absorção de Mn pelas plantas em função do aumento das doses de P na solução nutritiva está relacionado ao acúmulo de massa seca das plantas. As doses de fósforo que proporcionaram o máximo de acúmulo de manganês nos estádios do milho foram próximas da dose que propiciou o máximo da produção de massa seca na parte aérea e raízes (Figuras 37 d).

Figura 41 - Acúmulo de manganês na parte aérea (a) e raiz (b) de plantas de milho submetidas às doses de fósforo e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento.

b) Zinco

Os teores de zinco no tecido vegetal das folhas indicativas do desenvolvimento do milho, responderam significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de Zn na solução nutritiva apenas para a época V4, ajustando-se a um modelo quadrático (Figura 42).

O teor máximo de zinco no tecido foliar na época V4 de 95 mg kg^{-1} , na dose de fósforo na solução nutritiva de 23 mg L^{-1} . Marin (2012) na respectiva época obteve o teor foliar de 66 mg kg^{-1} de Zn no milho cultivado em solução nutritiva. Os altos teores nesse estágio são decorrentes do pequeno porte das plantas ocorrendo o efeito de concentração de nutrientes.

O teor de Zn no estágio R1 (entre 55 e 60 mg kg^{-1}) está de acordo com níveis adequados para o milho, que podem variar, de 20 a 100 mg kg^{-1} (RAIJ; CANTARELLA, 1996; MARTINEZ et al., 1999; FANCELLI, 2000).

Figura 42 - Teor de zinco na folha indicativa de plantas de milho submetidas às doses de fósforo e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento.

O acúmulo de zinco na parte aérea e raízes responderam significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de P na solução nutritiva ajustando-se a um modelo quadrático para todas as épocas avaliadas, exceto para o acumulado nas raízes no estágio V7, que não houve diferença (Figura 43 a e b).

A dose de 20 mg L^{-1} de P proporcionou os acúmulos máximos de Zn na parte aérea e raízes nos estádios de desenvolvimento avaliados. Nas épocas V4, V7 e R1 os acúmulos máximos obtidos foram de $166,3$, $986,6$ e $3165,8 \text{ } \mu\text{g planta}^{-1}$ de Zn, respectivamente. Nas raízes os acúmulos máximos de $126,1$ e $583,3 \text{ } \mu\text{g planta}^{-1}$ de Zn foram observados nos estádios V4 e R1, respectivamente.

Figura 43 - Acúmulo de zinco na parte aérea (a) e raiz (b) de plantas de milho submetidas às doses de fósforo e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento.

O acúmulo máximo observado no estágio R1 está muito próximo dos valores obtidos por Marin (2012) em estudos de nutrição de milho cultivado em solução nutritiva. O autor constatou os acumulados de $2945,56 \mu\text{g planta}^{-1}$ na parte aérea e $455,97 \mu\text{g planta}^{-1}$ nas raízes das plantas, na respectiva época.

Observa-se que o aumento de Zn pelas plantas se deve ao aumento da massa seca da parte aérea, pois a dose de fósforo que proporcionou o máximo de acúmulo de zinco nos estádios do milho foi de 20 mg kg^{-1} semelhante a dose que refletiu o máximo da produção de massa seca na parte aérea das plantas de milho no nas épocas avaliadas (Figuras 37 d).

Nota-se também que no início do desenvolvimento (V4) o acúmulo deste micronutriente é praticamente igual na parte aérea ($166,3 \mu\text{g planta}^{-1}$) e raízes ($126,1 \mu\text{g planta}^{-1}$), o que evidencia a importância do Zn nos estádios iniciais da cultura. De acordo com Cakmak et al. (1989) o zinco está envolvido na síntese de proteínas e do ácido indol acético,

hormônio envolvido no crescimento das plantas. Sendo assim requerido para o desenvolvimento radicular, e o suprimento inadequado causarão no milho enraizamento superficial, crescimento reduzido e encurtamento dos internódios (FANCELLI, 2009).

4.3.5 Sistema de visão artificial (SVA) para diagnose de fósforo

Verifica-se maior taxa de acerto no estágio V4, com probabilidade de acerto global acima de 76% e índice Kappa “confiável”. As bases e pontas das folhas velhas, e o terço médio e pontas das folhas indicativas apresentaram as melhores probabilidades de acerto global na respectiva época (Tabela 19). Neste estágio também foi realizado um estudo adicional com a remoção da base de dados a classe 2/5 da dose de P, pois nas análises dos experimentos anteriores observou-se que os erros de classificação ocorrem com maior frequência nessa classe, devido provavelmente aos padrões de características nas folhas serem iguais e dificultarem a diferenciação.

Tabela 19 – Resultados médios da classificação usando o método GWF em imagens de folhas de plantas milho, submetidas às doses de fósforo, no estágio V4, usando SVM para classificar os dados

GWF	Nº de imagens corretamente classificadas	Probabilidade de acerto global	Índice Kappa	Desvio Padrão do acerto	Confiança do acerto	Número de janelas utilizadas
BaseFV	305,00	76,25	0,68	1,90	0,49	400
MeioFV	246,60	61,65	0,48	2,22	0,49	400
MeioFI	243,40	81,13	0,71	2,03	0,66	300
PontaFV	286,20	71,55	0,62	2,56	0,49	400
PontaFI	245,80	81,93	0,72	0,95	0,66	300

Na matriz de confusão do Quadro 12, para o experimento realizado com a base das folhas velhas no estágio V4, a dose zero obteve 99,8% de imagens corretamente classificadas de 100 imagens analisadas e 0,2% das imagens classificadas como 1/5 da dose de P. Para 1/5 de P, 84% de imagens foram corretamente identificadas. A classe 2/5 de P obteve 61% de acerto. Na dose completa 60% das imagens foram corretamente classificadas, e os erros de classificação foram de 8% e 32% para as doses 1/5 e 2/5 respectivamente.

Quadro 12 – Matriz de confusão do resultado de classificação com a base das folhas velhas em V4

Dose 0	1/5 de P	2/5 de P	Dose Completa	
99,8	0,2	0,0	0,0	Dose 0
0,0	84,2	11,8	4,0	1/5 de P
0,0	14,8	61,2	24,0	2/5 de P
0,0	8,2	32,0	59,8	Dose Completa

Quadro 13 - Matriz de confusão do resultado de classificação com a ponta das folhas velhas em V4

Dose 0	1/5 de P	2/5 de P	Dose Completa	
100,0	0,0	0,0	0,0	Dose 0
0,0	80,2	16,0	3,8	1/5 de P
0,0	29,4	48,0	22,6	2/5 de P
0,0	12,4	29,6	58,0	Dose Completa

Observa-se que, a classificação entre as imagens da classe zero e 1/5 de P, que correspondem aos graus de deficiência severa e moderada na planta, não houve erro de classificação entre elas, a porcentagem de erros da dose 1/5 dentro das classes 2/5 e dose completa é baixa. Essas informações são importantes no estudo, tendo em vista a sensibilidade do sistema para diferenciar uma planta com nível moderado de deficiência da planta com a nutrição adequada, no estágio inicial de desenvolvimento do milho (Quadros 12 e 13).

As classes que correspondem à dose 2/5 e completa apresentaram dificuldade de diferenciação. A porcentagem de acertos foi de 60% e os maiores erros de classificação ocorreram dentro das respectivas classes (Quadros 12 e 13). Esse fato é devido provavelmente à similaridade entre elas, pois quando se retirou a classe 2/5 da base de dados a porcentagem de acertos na dose completa de fósforo aumenta em mais de 10% (Quadros 14 e 15). Ressalta-se, que para o reconhecimento de deficiências pelo olho humano, mesmo com a habilidade do avaliador, essas classes também são difíceis de separação, até pelos teores de fósforo das folhas serem muito próximos (Tabela 20), o que é coerente com os resultados obtidos pelo sistema de visão artificial.

Quadro 14 – Matriz de confusão do resultado de classificação com a ponta das folhas indicativas em V4

Dose 0	1/5 de P	Dose Completa	
92,6	2,4	5,0	Dose 0
0,4	75,2	24,4	1/5 de P
3,2	21,2	75,6	Dose Completa

Quadro 15 – Matriz de confusão do resultado de classificação o meio das folhas indicativas em V4

Dose 0	1/5 de P	Dose Completa	
94,6	0,8	4,6	Dose 0
0,0	77,2	22,8	1/5 de P
2,0	24,0	74,0	Dose Completa

O melhor índice de acerto nas partes velhas das folhas corrobora com a sintomatologia característica da deficiência de fósforo nas plantas. Assim como para o nitrogênio e o potássio, os sintomas iniciam nas folhas velhas das plantas.

No estágio V7 observou-se que as maiores taxas de acertos foram no terço médio e pontas das folhas velhas com probabilidade de acerto global de 70 e 63% respectivamente, correspondendo a um índice Kappa “moderado” (Tabela 21).

A matriz de confusão do experimento realizado com o meio das folhas velhas (maior probabilidade de acerto global) indica que a dose zero foi a mais simples de classificar, com acertos acima de 95% (Quadro 16). Ainda no Quadro 16, observa-se que com o desenvolvimento do milho os níveis de P 1/5, 2/5 e completo apresentaram dificuldade de separação entre elas. Entretanto essas classes não apresentam erros de classificação nas folhas de plantas cultivadas com a dose zero de fósforo.

Tabela 20 - Teor de fósforo (g kg^{-1}) na folha indicativa (FI) e na folha velha (FV) de plantas de milho nos estádios de desenvolvimento V4, V7 e R1 submetidas a níveis decrescentes de fósforo na solução nutritiva (Média de quatro repetições)

Estádios	Doses P	FI	FV
	----- mg L^{-1} -----	----- g kg^{-1} -----	
V4	0	*	*
	6,2	2,4	*
	12,4	2,3	*
	31,0	3,8	*
V7	0	*	*
	6,2	1,3	0,5
	12,4	2,0	0,2
	31,0	3,2	0,7
R1	0	*	*
	6,2	1,3	0,4
	12,4	2,0	0,2
	31,0	3,9	0,2

*tecido vegetal em quantidade insuficiente para ser analisado.

Tabela 21 - Resultados médios da classificação usando o método GWF em imagens de folhas de plantas milho, submetidas às doses de fósforo, no estágio V7, usando SVM para classificar os dados

GWF	Nº de imagens corretamente classificadas	Probabilidade de acerto global	Índice Kappa	Desvio Padrão do acerto	Confiança do acerto	Número de janelas utilizadas
MeioFV	279,00	69,75	0,59	1,49	0,49	400
MeioFI	217,20	54,30	0,39	1,48	0,49	400
PontaFV	251,60	62,90	0,50	2,20	0,49	400

Quadro 16 – Matriz de confusão do resultado de classificação com o meio das folhas velhas em V7

Dose 0	1/5 de P	2/5 de P	Dose Completa	
95,4	0,0	1,0	3,6	Dose 0
0,0	49,8	41,8	8,4	1/5 de P
0,0	43,0	49,8	7,2	2/5 de P
2,0	8,2	5,8	84,0	Dose Completa

Quadro 17 – Matriz de confusão do resultado de classificação com a ponta das folhas velhas em V7

Dose 0	1/5 de P	2/5 de P	Dose Completa	
100,0	0,0	0,0	0,0	Dose 0
0,0	44,2	27,2	28,6	1/5 de P
0,0	35,6	31,4	33,0	2/5 de P
0,2	28,6	29,6	41,6	Dose Completa

O terço médio das folhas velhas (MeioFV) apresentou maior probabilidade global (70%) em relação ao terço médio das folhas indicativas, no estágio R1 (Tabela 22). Novamente as classes: dose completa, 2/5 e 1/5 obtiveram dificuldades de separação entre elas (Quadro 18), muito provável que essas folhas apresentem características muito similares, que dificultam a separação delas pelo sistema. Observa-se na Tabela 20, que os teores de P são muito próximos, nas folhas indicativas e iguais nas folhas velhas, no estágio R1.

Tabela 22 - Resultados médios da classificação usando o método GWF em imagens de folhas de plantas milho, submetidas às doses de fósforo, no estágio R1, usando SVM para classificar os dados

GWF	Nº de imagens corretamente classificadas	Probabilidade de acerto global	Índice Kappa	Desvio Padrão do acerto	Confiança do acerto	Número de janelas utilizadas
MeioFV	279,00	69,75	0,59	1,49	0,49	400
MeioFI	217,20	54,30	0,39	1,48	0,49	400

Quadro 18 – Matriz de confusão do resultado de classificação com o meio das folhas velhas em R1

Dose 0	1/5 de P	2/5 de P	Dose Completa	
100,0	0,0	0,0	0,0	Dose 0
0,2	60,6	22,0	17,2	1/5 de P
0,0	25,8	43,4	30,8	2/5 de P
0,0	25,4	24,0	50,6	Dose Completa

Os resultados obtidos para o estudo da identificação de deficiência de P indicam que com o avanço do estágio fenológico do milho, a diferenciação entre as classes ficam difíceis. Porém, no estágio inicial os erros de classificação são menores, sugerindo a possibilidade de utilização do sistema para a detecção precoce de carências nutricionais, visto que para o nitrogênio e o potássio o estágio V4 também apresentou índice Kappa “confiável”.

4.4 Fase I – Manganês (Mn)

4.4.1 Sintomas visuais

Não foram observados sintomas característicos de manganês conforme citado por Coelho e França (2002) e Ferreira (2012), nas plantas submetidas às doses de Mn em solução nutritiva. As plantas desenvolveram-se normalmente até a época R1 (Figura 44).

Figura 44 - Plantas de milho no estágio fenológico V7 (a) e R1 (b), submetidas às doses de manganês. (Foto: L. M. ROMUALDO).

4.4.2 Variáveis biométricas

Pelos resultados obtidos, constatou-se que não houve efeito significativo ($P < 0,01$) das doses e da interação sobre as variáveis biométricas (diâmetro do colmo, altura, número total de folhas), massa seca da parte aérea e raiz (Tabela 23) em função do incremento das doses de manganês na solução nutritiva. Houve efeito significativo nos estádios de desenvolvimento estudados. O estágio R1 apresentou maior valor para as variáveis avaliadas, o que já era esperado em função do crescimento das plantas.

O fato das plantas cultivadas na ausência de Mn não terem manifestado sintomas de deficiências, pode ser devido à presença do elemento em algum reagente na solução nutritiva, fornecendo as quantidades de manganês suficientes para a planta. Mingotte et al. (2011) não observaram sintomas típicos de carência de Mn. E, também não verificaram efeitos na altura e número de perfilhos no primeiro corte do capim-mombaça mantidos na ausência do micronutriente. Os autores atribuíram à pequena quantidade presente no solo utilizado no experimento como suficiente para suprir as necessidades das plantas no período, não manifestando a deficiência do nutriente em questão.

Tabela 23 - Valor de F dos resultados da análise de variância referente às variáveis biométricas (diâmetro do colmo, altura da planta e número total de folhas), massa seca da parte aérea e raiz das plantas de milho submetidas às doses de manganês e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento (média de quatro repetições).

Causa de variação	Diâmetro do colmo	Altura	Número total de folhas	Massa seca	
				Parte aérea	Raiz
Doses (D)	----- cm -----			----- g planta ⁻¹ -----	
0 (D1)	1,98	88,02	13,0	58,63	15,36
0,16 (D2)	1,89	86,58	13,0	59,67	15,35
0,32 (D3)	1,88	87,60	13,0	56,65	15,24
0,8 (D4)	1,87	86,92	13,0	57,54	15,73
Teste F	2,36 ^{ns}	0,21 ^{ns}	1,50 ^{ns}	0,30 ^{ns}	0,16 ^{ns}
Épocas (E)					
V4 (E1)	1,08 ^c	18,28 ^c	8,0 ^c	1,79 ^c	1,24 ^c
V7 (E2)	2,18 ^b	50,28 ^b	13,0 ^b	16,41 ^b	8,96 ^b
R1 (E3)	2,46 ^a	193,28 ^a	17,0 ^a	43,03 ^a	36,06 ^a
Teste F	608,82 ^{**}	5745,24 ^{**}	1988,88 ^{**}	1422,60 ^{**}	1601,72 ^{**}
Interação					
D X E	0,60 ^{ns}	0,46 ^{ns}	0,88 ^{ns}	0,51 ^{ns}	0,84 ^{ns}
CV(%)	6,2	5,6	3,2	14	11,8

ns - não significativo, respectivamente.

4.4.3 Manganês na planta

Houve efeito significativo ($P < 0,01$) das doses, épocas e da interação sobre os teores de manganês no tecido vegetal das folhas indicativas, acumulado de Mn na parte aérea e raiz de plantas de milho (Figuras 45 e 46).

Os teores de Mn no tecido vegetal das folhas indicativas nas épocas de desenvolvimento do milho responderam significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de manganês na solução nutritiva. O maior teor de Mn na folha indicativa do estágio V7 foi de 156 mg kg^{-1} observado com $0,60 \text{ mg L}^{-1}$ de Mn na solução nutritiva, nos demais estádios de desenvolvimento (V4 e R1) não foi encontrado o ponto de máximo, pois os modelos foram lineares para a variável em questão (Figura 45).

Figura 45 - Teor de manganês na folha indicativa de plantas de milho submetidas às doses de manganês e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento.

Os teores de Mn obtidos na folha indicativa do milho no estágio de desenvolvimento R1 (43 a 88 mg kg^{-1}) estão dentro dos níveis considerados adequados para a cultura, que segundo a literatura variam de 42 a 150 mg kg^{-1} (BÜLL, 1993), 20 a 200 mg kg^{-1} (RAIJ; CANTARELLA, 1996), 20 a 150 mg kg^{-1} (MARTINEZ et al., 1999; MALAVOLTA, 2006), 50 a 150 mg kg^{-1} (FANCELLI, 2000). Os teores de manganês na dose zero no estágio R1 foram de 43 mg kg^{-1} , concentração dentro do adequado para o elemento, o que reforça o fato de provável contaminação na solução nutritiva como causa de não ter manifestação de sintomas de deficiência de Mn nas plantas.

Verifica-se que, o acúmulo de manganês na parte aérea e raiz das plantas, nas épocas de desenvolvimento do milho foram significativamente ($P < 0,01$) influenciados pelo incremento nas doses de Mn na solução nutritiva, ajustando-se a um modelo quadrático na

parte aérea nos estádio V4 e V7 e nas raízes das plantas no estádio V4. O modelo linear ajustou-se para a parte aérea das plantas em R1, e nas raízes em V7 e R1 (Figuras 46 a e b).

No estádio V4, as doses de 0,55 e 0,72 mg L⁻¹ de Mn proporcionaram, respectivamente, o máximo acumulado na parte aérea de 562,2 µg planta⁻¹ e 390 µ .planta⁻¹ na raiz.

Observou-se no estádio V7, o acúmulo máximo na parte aérea das plantas de 3051 µg planta⁻¹ de manganês obtido com a dose de 0,60 mg L⁻¹.

De acordo com a Figura 46, constatou-se que o maior acúmulo de Mn na parte aérea (14756,2 µg planta⁻¹) e raiz (4853 µg planta⁻¹) foram observados no estádio R1 do milho (aos 78 DAE).

Figura 46 - Acúmulo de manganês na parte aérea (a) e raiz (b) de plantas de milho submetidas às doses de manganês e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento.

As plantas responderam positivamente com as doses de manganês utilizadas, nas épocas estudadas. Observa-se que a quantidade acumulada é mínima até os 30 DAE (V4), após esse período há um incremento acentuado no acúmulo do nutriente na parte aérea e raiz.

Borges et al (2009) verificaram resultados semelhantes em diferentes híbridos de milho em condições de campo. Os mesmos autores constataram aumento no acumulado de Mn pelos híbridos aos 44 DAE e posteriormente aumentou de forma linear até o final do ciclo. Mingotte et al. (2011) também observaram incrementos lineares no acúmulo de Mn na parte aérea do campim-mombaça devido ao aumento das doses de manganês no solo.

O Mn é o segundo micronutriente mais extraído pelo milho, as quantidades absorvidas pela cultura são altas, conforme observado na figura 46. De acordo com Leite et al. (2003), a absorção de Mn em plantas de milho é contínua durante o seu desenvolvimento podendo inferir que a assimilação desse micronutriente é um processo determinado em maior grau pela sua disponibilidade na zona de absorção.

O acúmulo de macro e micronutrientes total (parte aérea e raiz) durante os estádios de desenvolvimento do milho, estimado para a população de 60000 plantas ha^{-1} , está apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 – Acúmulo de nutrientes na planta inteira durante o desenvolvimento do milho estimado para a população de 60000 plantas ha^{-1}

Estádios	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
	----- kg ha^{-1} -----					----- g ha^{-1} -----				
V4	9,8	1,0	9,7	2,1	0,5	0,6	6,1	101,6	51,5	14,7
V7	48,4	4,1	51,2	19,3	5,5	4,9	33,7	1699,0	255,6	64,5
R1	171,7	18,8	263,1	112,3	24,1	26,5	142,6	5229,4	869,0	251,9

Os acúmulos totais dos micronutrientes seguiram a seguinte ordem decrescente de valores, em g ha^{-1} : Fe > Mn > Zn > Cu. Silva (2011) também obteve a mesma ordem de acumulado dos respectivos micronutrientes nos estádios V4, V6 e V8 de plantas de milho cultivadas em solução nutritiva. Em condições de campo resultados semelhantes foram observados por Duarte et al. (2003) e Maggio (2006) em diferentes híbridos.

Andrade et al. (1975b) verificaram pico de absorção de Mn e Zn aos 80 dias DAE nas quantidades de 656 e 332 g ha^{-1} respectivamente. Para o Fe e o Cu foram observadas, respectivamente, as quantidades de 1610 e 150 g ha^{-1} aos 100 DAE. Duarte et al (2003), verificaram o total acumulado dos micronutrientes na seguinte ordem decrescente: Fe (5648 g ha^{-1}) > Mn (980 g ha^{-1}) > Zn (331 g ha^{-1}) > Cu (125 g ha^{-1}) obtidos aos 105, 86 e 91 DAE respectivamente.

4.4.4 Interação manganês (Mn), ferro (Fe) e zinco (Zn)

As doses, épocas e interação foram significativas ($P < 0,01$) sobre os teores de zinco nas folhas indicativas, acumulado de Mn e Zn na parte aérea e raízes com o incremento das doses de Mn na solução nutritiva (Figuras 47, 48, 49, 50). Entretanto, não houve interação entre as épocas avaliadas, para os teores foliares de Zn (Figura 49).

a) Ferro

Os teores de ferro diminuíram linearmente nas folhas indicativas com o incremento das doses de Mn na solução nutritiva no estágio V4. No estágio V7 o teor máximo de Fe (263 mg kg^{-1}) foi observado com a dose de $0,24 \text{ mg L}^{-1}$, à partir dessa dose houve redução na concentração de ferro das folhas (Figura 47).

Os teores adequados de Fe, por ocasião do florescimento, no tecido foliar segundo a literatura variam de 50 a 250 mg kg^{-1} (BÜLL, 1993; FANCELLI, 2000) e de 21 a 250 mg kg^{-1} (RAIJ; CANTARELLA, 1996; MARTINEZ et al., 1999; MALAVOLTA, 2006). Na respectiva época verificou-se concentração dentro das adequadas segundo os autores acima.

Figura 47 - Teor de ferro na folha indicativa de plantas de milho submetidas às doses de manganês e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento.

A dose de $0,50 \text{ mg L}^{-1}$ de Mn proporcionou o máximo acumulado de 1210,8 e 9876,2 $\mu\text{g planta}^{-1}$ de Fe na parte aérea das plantas nos estádios V4 e V7 respectivamente. No estágio V4, o máximo acumulado de Fe nas raízes foi de 2095,8 $\mu\text{g planta}^{-1}$ obtida com o $0,35 \text{ mg L}^{-1}$ de Mn na solução nutritiva (Figuras 48 a e b).

Figura 48 - Acúmulo de ferro na parte aérea (a) e raiz (b) de plantas de milho submetidas às doses de manganês e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento.

Com o incremento das doses de Mn observou-se um decréscimo linear no acúmulo de ferro na parte aérea e raízes no estágio R1. De acordo com os resultados constatou-se que houve uma inibição competitiva do ferro causada pela elevação das doses do manganês. De acordo com Malavolta (2006) há uma correlação negativa entre esses micronutrientes descrevendo que em altos níveis de um reduz a absorção do outro, ou vice-versa. Porém, ressalta-se que a diminuição no acúmulo do ferro não ocasionou deficiência ou limitação nas plantas.

O efeito das doses de manganês pode estar relacionado à presença do elemento em outro reagente da solução nutritiva, conforme citado anteriormente, pode ter havido contaminação, sendo assim as quantidades presentes estarem maiores das que as adicionadas como tratamento (doses de Mn) no estudo.

Resultados semelhantes referindo o efeito inibitório do Mn sob a absorção de ferro em plantas foram observados por Veloso et al. (1995) na cultura da pimenteira do reino. Pereira et al. (2001) e Zanão Júnior et al (2010) verificaram diminuição nos teores foliares e acúmulo de Fe em arroz nas maiores doses de Mn avaliadas. Hernandez (2009) também constatou em caramboleiras.

b) Zinco

Os teores de zinco nas folhas indicativas apresentaram decréscimo quadrático com o incremento das doses de Mn na solução nutritiva (Figura 49). A dose de $0,55 \text{ mg L}^{-1}$ promoveu o valor mínimo de 23 mg kg^{-1} no teor de Zn no tecido foliar.

No entanto, mesmo com a redução na concentração, os teores de Zn estiveram dentro dos níveis adequados para o milho (BÜLL, 1993; RAIJ; CANTARELLA, 1996; MARTINEZ et al., 1999; FANCELLI, 2000; MALAVOLTA, 2006), já citados anteriormente para o elemento em questão.

Figura 49 - Teor de zinco na folha indicativa de plantas de milho submetidas às doses de manganês e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento.

O acumulado de zinco na parte aérea das plantas, no estágio R1, também apresentou decréscimo quadrático com o incremento das doses de Mn na solução nutritiva (Figura 50 a). A dose de $0,62 \text{ mg L}^{-1}$ proporcionou o menor acúmulo de Zn ($2831,6 \text{ } \mu\text{g planta}^{-1}$).

Figura 50 - Acúmulo de zinco na parte aérea (a) e raiz (b) de plantas de milho submetidas às doses de manganês e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento.

Verificou-se ajuste quadrático, com diminuição no acúmulo de Zn nas raízes, no estágio V7. Nessa época notou-se o mínimo acumulado de $255,4 \text{ } \mu\text{g planta}^{-1}$ com $0,64 \text{ mg L}^{-1}$ de Mn na solução nutritiva. Acréscimo linear foi observado no estágio R1 (Figura 50 b).

Assim como para o Fe, o Mn exerce também efeito inibitório na absorção de Zn. Segundo Malavolta (2006), o efeito da interação Mn x Zn depende das plantas e condições essa correlação pode ser positiva, negativa ou ausente.

De acordo com Assmann (1993), a interação Zn x Mn pode ser observada na competição iônica, na translocação de carboidratos e na relação Mn/Zn. O mesmo autor constatou que não ocorreu influência significativa dos níveis de Mn sobre a absorção de zinco

em plantas de milho. Marin (2012) não observou diminuição no acumulado de manganês na parte aérea de plantas de milho no estágio R1, submetidas às doses de Zn em solução nutritiva, por outro lado, o aumento da concentração de zinco na solução nutritiva reduziu o acumulado de manganês na raiz.

De qualquer forma o aumento da dose de manganês, tendo ou não diminuído a disponibilidade do zinco, não houve limitação deste nutriente na planta.

4.4.5 Sistema de visão artificial (SVA) para diagnose de manganês

Verificou-se após a análise das tabelas 25, 27 e 28, que os terços médios das folhas novas apresentaram melhor diferenciação entre as classes, sendo a porcentagem de acertos de 66,0%, 70,0% e 55,0%, nas épocas V4, V7 e R1 respectivamente. Os índices Kappa foram “moderado” para as épocas V4 e V7 e “baixo” em R1.

Os resultados apresentados concordam com a literatura, pois a redistribuição de Mn na planta é lenta, deste modo, as carências entre os níveis deste elemento nas plantas surgem em folhas novas. Conforme relatado anteriormente, não foram observados sintomas característicos de deficiência de Mn nas plantas de milho, o que talvez explique a dificuldade do SVA diferenciar os níveis de manganês.

Tabela 25 - Resultados médios da classificação usando o método GWF em imagens de folhas de plantas milho, submetidas às doses de manganês, no estágio V4, usando SVM para classificar os dados

GWF	Nº de imagens corretamente classificadas	Probabilidade de acerto global	Índice Kappa	Desvio Padrão do acerto	Confiança do acerto	Número de janelas utilizadas
MeioFN	264,80	66,20	0,54	1,61	0,50	400
MeioFI	258,60	64,65	0,52	0,51	0,50	400
PontaFN	254,00	63,50	0,51	1,38	0,50	400
PontaFI	251,00	62,75	0,50	2,31	0,50	400

Na matriz de confusão do Quadro 19, verificou-se que houve dificuldade de diferenciação entre as classes dose zero e 1/5 de Mn, e entre as classes 2/5 e a dose completa. Em contrapartida, a dose zero diferenciou das classes 2/5 e dose completa. Esse fato pode ser devido ao nível de manganês, pois em se tratando de um micronutriente, onde as exigências pelas culturas são menores e os teores nas folhas estando muito próximos nessas classes, podem ter dificultado a separação entre elas, o que pode ser visualizado na Tabela 26.

Quadro 19 – Matriz de confusão do resultado de classificação com o meio das folhas novas em V4

Dose 0	1/5 de Mn	2/5 de Mn	Dose Completa	
75,8	24,2	0,0	0,0	Dose 0
32,8	66,8	0,2	0,2	1/5 de Mn
0,0	0,0	68,4	31,6	2/5 de Mn
0,0	0,0	46,2	53,8	Dose Completa

Quadro 20 – Matriz de confusão do resultado de classificação com o meio das folhas indicativas em V4

Dose 0	1/5 de Mn	2/5 de Mn	Dose Completa	
66,8	33,2	0,0	0,0	Dose 0
35,2	64,8	0,0	0,0	1/5 de Mn
0,0	0,0	63,2	36,8	2/5 de Mn
0,0	0,0	36,2	63,8	Dose Completa

Tabela 26 - Teor de manganês (mg kg^{-1}) na folha indicativa (FI) e na folha nova (FN) de plantas de milho nos estádios de desenvolvimento V4, V7 e R1 submetidas a níveis decrescentes de manganês na solução nutritiva (Média de quatro repetições)

Estádios	Doses de Mn	FI	FN
	----- mg L^{-1} -----	----- mg kg^{-1} -----	
V4	0	54,4	99,9
	0,16	69,0	96,5
	0,32	83,3	92,4
	0,80	122,4	121,9
V7	0	49,8	46,0
	0,16	92,1	47,9
	0,32	134,1	46,3
	0,80	147,0	52,3
R1	0	42,2	43,7
	0,16	44,4	43,3
	0,32	73,5	46,6
	0,80	84,8	54,4

A não observação dos sintomas nas plantas, bem como nas demais variáveis de crescimento analisadas, em contraste às diferenciações pelo sistema de visão artificial tornam-se interessantes nesse estudo, ainda que não sejam possíveis de serem afirmados. Os resultados obtidos indicam que podem ter ocorrido algumas modificações nas folhas que permitiram a identificação nas imagens.

Observou-se também, uma boa diferenciação da dose zero (99%) em relação aos demais tratamentos na época V7 (Quadro 21), bem como a dose 1/5 com a dose zero. Porém, o SVA teve dificuldade de separar a classe 2/5 das classes 1/5 e dose completa, com taxas de acertos bem menores.

Tabela 27 - Resultados médios da classificação usando o método GWF em imagens de folhas de plantas milho, submetidas às doses de manganês, no estágio V7, usando SVM para classificar os dados

GWF	Nº de imagens corretamente classificadas	Probabilidade de acerto global	Índice Kappa	Desvio Padrão do acerto	Confiança do acerto	Número de janelas utilizadas
MeioFN	280,80	70,20	0,60	2,26	0,49	400
MeioFI	184,20	46,05	0,28	2,91	0,49	400

Quadro 21 – Matriz de confusão do resultado de classificação o meio das folhas novas em V7

Dose 0	1/5 de Mn	2/5 de Mn	Dose Completa	
99,0	0,0	0,0	1,0	Dose 0
0,0	73,6	18,2	8,2	1/5 de Mn
0,2	23,0	52,8	24,0	2/5 de Mn
4,4	10,8	29,4	55,4	Dose Completa

Quadro 22 – Matriz de confusão do resultado de classificação o meio das folhas indicativas em V7

Dose 0	1/5 de Mn	2/5 de Mn	Dose Completa	
67,6	32,0	0,2	0,2	Dose 0
35,6	32,2	15,8	16,4	1/5 de Mn
2,4	24,4	42,6	30,6	2/5 de Mn
0,2	26,0	32,0	41,8	Dose Completa

Tabela 28 - Resultados médios da classificação usando o método GWF em imagens de folhas de plantas milho, submetidas às doses de manganês, no estágio R1, usando SVM para classificar os dados

GWF	Nº de imagens corretamente classificadas	Probabilidade de acerto global	Índice Kappa	Desvio Padrão do acerto	Confiança do acerto	Número de janelas utilizadas
MeioFN	221,00	55,25	0,40	3,91	0,48	400
MeioFI	151,20	37,80	0,17	0,97	0,48	400

Quadro 23 – Matriz de confusão do resultado de classificação o meio das folhas novas em R1

Dose 0	1/5 de Mn	2/5 de Mn	Dose Completa	
53,2	13,0	3,4	30,4	Dose 0
18,4	55,2	17,6	8,8	1/5 de Mn
8,0	14,4	70,6	7,0	2/5 de Mn
41,6	6,2	10,2	42,0	Dose Completa

Quadro 24 – Matriz de confusão do resultado de classificação o meio das folhas indicativas em R1

Dose 0	1/5 de Mn	2/5 de Mn	Dose Completa	
61,0	20,6	7,6	10,8	Dose 0
19,2	31,8	29,4	19,6	1/5 de Mn
12,2	31,8	29,4	26,6	2/5 de Mn
13,4	27,4	30,2	29,0	Dose Completa

Nota-se, com o avanço do desenvolvimento das plantas, que as probabilidades de acertos diminuem, assim como a diferenciação entre as classes (Quadros 23 e 24). Nas respectivas matrizes para o estágio R1, verifica-se que houve erros de classificação em todos os níveis do manganês, impossibilitando assim análises consistentes.

4.5 Fase II - Campo

4.5.1 Teores de macro e micronutrientes nas folhas de plantas de milho

Na Tabela 29, estão apresentados o resumo da análise de variância dos teores 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 folha indicativa, nos estádios de desenvolvimento do milho avaliados. Pelos resultados obtidos constatou-se que houve efeito significativo ($P < 0,01$) dos tratamentos (T), épocas (E) e interação TXE para todos os nutrientes, exceto para as épocas para o teor de manganês.

Os nutrientes apresentam interações, ou seja, o efeito da adição de um elemento ou a ausência de um pode aumentar ou diminuir o teor do nutriente nas folhas das plantas, ou pode não ser modificado, até mesmo em uma adubação equilibrada esses fatores podem agir no ambiente (MALAVOLTA, 2006).

De acordo com a Tabela 30, a omissão de N nas plantas, em todos os estádios de desenvolvimento avaliados, em comparação com o tratamento completo, causou redução significativa, respectivamente, nos teores de N, P e de B. A omissão de potássio consequentemente causou redução significativa dos teores de K, aumentou os teores de Ca, de Mg e de Mn. A omissão de fósforo aumentou os teores de Zn.

Os teores foliares de enxofre e boro foram maiores no estágio de desenvolvimento V4; os teores de K e Zn no estágio V7; no estágio R1 os teores foliares de N, P e Ca foram maiores, e os teores de Mg, Cu e Fe foram menores no estágio V7. O teor de manganês não diferiu significativamente nas épocas avaliadas.

A interação P e Zn são relatadas na literatura principalmente pela influência negativa do fósforo na absorção do zinco (BÜLL, 1993), uma explicação sobre isso é que ocorre uma interação P-Zn na raiz e ou nos vasos condutores da planta, reduzindo a translocação de zinco para a parte aérea, ou ainda, uma desordem metabólica causada pelo desbalanceamento desses dois nutrientes (STUKENHOLTZ et al., 1966; BOAWN; BROWN, 1968; EDWARDS; KAMPRATH, 1974; EPSTEIN, 1975; MALAVOLTA et al., 1989).

Outra interação é a do potássio, cálcio e magnésio, conforme já descrito anteriormente, a concentração desses nutrientes reflete no teor do outro, e a competição no processo de absorção, por serem bases em meq (miliequivalente) mais ou menos constantes, e o efeito inibidor na absorção pode depender da planta (MALAVOLTA, 2006), o que pode explicar o aumento dos teores de Ca e Mg no tratamento com omissão de K.

De acordo com Büll (1993), os níveis adequados de nutrientes para a cultura do milho na época R1, devem ser de N=27,5-32,5 g kg⁻¹; P=1,9-3,5 g kg⁻¹; K=17,5-29,7 g kg⁻¹; Ca=2,3-4,0 g kg⁻¹; Mg=1,5-4,0 g kg⁻¹; S=1,5-2,1 g kg⁻¹; B=15-20 mg kg⁻¹; Cu=6-20 mg kg⁻¹; Fe=50-250 mg kg⁻¹; Mn=42-150 mg kg⁻¹ e Zn=15-50 mg kg⁻¹. Entretanto, esses valores são indicações muito gerais, outros fatores podem influenciar como condições de solo, clima e variedade do milho. Raij e Cantarella (1996) indicam os seguintes teores como adequados: N=27-35 g kg⁻¹; P=1,9-4,0 g kg⁻¹; K=17-35 g kg⁻¹; Ca=3,0-10,0 g kg⁻¹; Mg=1,5-5,0 g kg⁻¹; S=1,5-3,0 g kg⁻¹; B=7-25 mg kg⁻¹; Cu=6-20 mg kg⁻¹; Fe=21-250 mg kg⁻¹; Mn=20-200 mg kg⁻¹ e Zn=15-100 mg kg⁻¹. Para Fancelli (2000), os teores foliares adequados de N, P, K, Ca, Mg e S estão, respectivamente, entre as faixas de 30-40 g kg⁻¹, 2,5-4,0 g kg⁻¹, 20-40 g kg⁻¹, 3-5 g kg⁻¹, 1,7-4,5 g kg⁻¹ e 1,0-2,0 g kg⁻¹.

Com base nessas informações, observa-se na tabela 30, no estágio R1, que as concentrações dos nutrientes na folha diagnóstica estiveram dentro dos níveis adequados, exceto para os teores de nitrogênio e potássio no respectivo tratamento em que foram omitidos. Para os teores de fósforo no tratamento correspondente à omissão do elemento, identificou-se abaixo do adequado de acordo com Fancelli (2000).

Tabela 29 - Resumo da análise de variância e resultados médios dos teores de macro e micronutrientes de folhas de milho em diferentes épocas de desenvolvimento da planta

	N	P	K	S	Ca	Mg	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Tratamentos (T)	<i>g kg⁻¹</i>						<i>mg kg⁻¹</i>				
T1 – Todos os nutrientes	36 ^a	2,5 ^a	27 ^a	1,8 ^{bc}	4,5 ^c	1,7 ^{cd}	17 ^a	15 ^{ab}	220 ^{ab}	51 ^b	46 ^b
T2 – sem Manganês	34 ^a	2,5 ^a	27 ^a	2,0 ^{ab}	4,4 ^c	1,6 ^d	16 ^{ab}	17 ^a	258 ^a	53 ^b	45 ^b
T3 – sem Nitrogênio	21 ^b	2,2 ^b	27 ^a	1,5 ^c	5,9 ^{bc}	2,1 ^{bc}	15 ^b	16 ^a	208 ^b	50 ^b	48 ^b
T4 – sem Potássio	34 ^a	2,5 ^a	16 ^b	1,8 ^b	7,6 ^a	3,0 ^a	16 ^{ab}	13 ^b	243 ^{ab}	60 ^a	46 ^b
T5 – sem Fósforo	36 ^a	2,4 ^{ab}	26 ^a	2,1 ^a	6,2 ^{ab}	2,4 ^b	16 ^{ab}	15 ^a	212 ^b	53 ^b	55 ^a
Blocos	1,4 ^{ns}	1,4 ^{ns}	2,0 ^{ns}	0,2 ^{ns}	1,6 ^{ns}	1,4 ^{ns}	0,4 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,5 ^{ns}	0,3 ^{ns}	0,8 ^{ns}
Teste F	103,0 ^{**}	9,9 ^{**}	162,2 ^{**}	10,4 ^{**}	14,2 ^{**}	35,7 ^{**}	3,8 [*]	8,2 ^{**}	5,7 ^{**}	6,7 ^{**}	14,8 ^{**}
Épocas (E)											
E1 – V4	31 ^b	2,3 ^b	25 ^b	2,4 ^a	5,2 ^b	2,4 ^a	17 ^a	17 ^a	238 ^a	54	48 ^b
E2 – V7	31 ^b	2,4 ^b	28 ^a	1,2 ^c	4,3 ^c	1,8 ^b	16 ^b	12 ^b	208 ^b	52	55 ^a
E3 – R1	35 ^a	2,6 ^a	21 ^c	1,8 ^b	7,7 ^a	2,2 ^a	15 ^c	16 ^a	239 ^a	53	40 ^c
Teste F	30,7 ^{**}	22,9 ^{**}	70,5 ^{**}	203,2 ^{**}	69,9 ^{**}	15,0 ^{**}	21,8 ^{**}	73,8 ^{**}	10,9 ^{**}	0,8 ^{ns}	85,7 ^{**}
Interação (TXE)	8,1 ^{**}	11,9 ^{**}	12,7 ^{**}	7,2 ^{**}	9,5 ^{**}	8,2 ^{**}	4,01 ^{**}	8,9 ^{**}	7,1 ^{**}	4,0 ^{**}	13,9 ^{**}
Desdobramentos											
Tratamentos dentro de E1	43,05 ^{**}	16,75 ^{**}	32,81 ^{**}	3,07 [*]	19,71 ^{**}	9,49 ^{**}	9,65 ^{**}	9,09 ^{**}	3,42 [*]	3,65 [*]	8,91 ^{**}
Tratamentos dentro de E2	60,93 ^{**}	4,78 ^{**}	90,35 ^{**}	11,63 ^{**}	12,40 ^{**}	14,64 ^{**}	1,76 ^{ns}	4,20 ^{**}	13,65 ^{**}	7,83 ^{**}	22,55 ^{**}
Tratamentos dentro de E3	28,64 ^{**}	12,03 ^{**}	4,67 ^{**}	10,85 ^{**}	2,88 [*]	26,44 ^{**}	0,34 ^{ns}	12,34 ^{**}	2,31 ^{ns}	2,56 [*]	11,10 ^{**}
CV₁ (%)	7	6	6	14	24	17	6	13	15	11	9
CV₂ (%)	7	5	8	12	18	18	6	10	12	13	9

**, * e ns - Significativo a 1% e a 5 % de probabilidade, e não significativo, respectivamente. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 30 – Desdobramentos dos tratamentos nos estádios de desenvolvimento do milho

Desdobramentos	N	P	K	S	Ca	Mg	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Tratamentos x Épocas											
	<i>g kg⁻¹</i>						<i>mg kg⁻¹</i>				
E1 dentro de T1	36 ^a	2,5 ^a	29 ^a	2,2 ^b	2,9 ^c	2,0 ^{bc}	18 ^a	19 ^a	253 ^a	60 ^a	43 ^b
E1 dentro de T2	35 ^a	2,5 ^a	28 ^a	2,7 ^a	2,7 ^c	1,6 ^c	17 ^a	19 ^a	256 ^a	54 ^{ab}	52 ^a
E1 dentro de T3	20 ^b	1,9 ^b	28 ^a	2,5 ^{ab}	5,4 ^b	2,5 ^{ab}	15 ^b	17 ^{ab}	245 ^{ab}	52 ^{ab}	49 ^{ab}
E1 dentro de T4	33 ^a	2,5 ^a	17 ^b	2,6 ^{ab}	8,0 ^a	2,9 ^a	17 ^a	14 ^b	239 ^{ab}	60 ^a	42 ^b
E1 dentro de T5	36 ^a	2,1 ^b	26 ^a	2,3 ^{ab}	6,7 ^a	2,7 ^{ab}	18 ^a	17 ^{ab}	196 ^b	47 ^b	55 ^a
E2 dentro de T1	35 ^a	2,5 ^a	30 ^a	1,1 ^a	3,2 ^b	1,2 ^c	-	13 ^{ab}	155 ^b	40 ^c	56 ^a
E2 dentro de T2	33 ^a	2,4 ^a	31 ^a	1,4 ^a	3,4 ^b	1,2 ^c	-	14 ^a	262 ^a	49 ^{bc}	40 ^b
E2 dentro de T3	17 ^b	2,2 ^b	32 ^a	0,6 ^b	3,1 ^b	1,7 ^{bc}	-	14 ^a	173 ^b	53 ^{ab}	58 ^a
E2 dentro de T4	33 ^a	2,4 ^a	14 ^b	1,3 ^a	7,5 ^a	2,2 ^{ab}	-	11 ^{ab}	257 ^a	62 ^a	62 ^a
E2 dentro de T5	36 ^a	2,1 ^b	31 ^a	1,5 ^a	4,3 ^b	2,7 ^a	-	10 ^b	194 ^b	56 ^{ab}	62 ^a
E3 dentro de T1	36 ^b	2,6 ^b	21 ^{ab}	1,9 ^b	7,3 ^{ab}	1,9 ^b	-	13 ^b	-	52 ^a	40 ^b
E3 dentro de T2	36 ^b	2,5 ^{bc}	21 ^a	1,9 ^b	6,9 ^b	1,8 ^b	-	18 ^a	-	56 ^{ab}	42 ^{ab}
E3 dentro de T3	27 ^c	2,3 ^c	23 ^a	1,5 ^c	9,2 ^a	2,0 ^b	-	18 ^a	-	45 ^b	31 ^c
E3 dentro de T4	34 ^b	2,5 ^{bc}	18 ^b	1,7 ^{bc}	7,3 ^{ab}	3,8 ^a	-	14 ^b	-	57 ^{ab}	36 ^{bc}
E3 dentro de T5	41 ^a	2,9 ^a	22 ^a	2,4 ^a	7,5 ^{ab}	1,8 ^b	-	19 ^a	-	55 ^a	48 ^a
DMS Tukey	3,9	0,2	3,3	0,4	2,1	0,7	1,7	3,1	53,2	11,9	7,4

Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.5.2 Componentes de produção

Na Tabela 31 estão apresentados os resultados das avaliações dos componentes de produção. Pelos resultados obtidos constatou-se que houve efeito significativo ($P < 0,01$) no peso dos grãos, massa média do sabugo e produtividade do milho em função dos tratamentos.

A omissão de nitrogênio e potássio apresentou redução significativa no peso dos grãos, e na produtividade do milho em relação ao tratamento em que foram aplicados todos os nutrientes (controle). Para o tratamento sem aplicação de N, esses parâmetros também diferenciaram significativamente do tratamento com omissão de manganês. Para a massa média do sabugo observou-se redução significativa em relação ao controle. Os demais tratamentos não diferiram entre si significativamente pelo teste de Tukey para os parâmetros avaliados.

Na Figura 51 c pode ser observado o efeito da omissão de nitrogênio no milho. O N é o nutriente mais exigido pelas culturas de forma geral, o suprimento inadequado no período de crescimento ocasionará redução no número de grãos (SCHREIBER et al., 1988; COELHO et al., 2002; COELHO et al., 2005). E caso o nitrogênio for limitante e as plantas esgotarem o N no período de pico de demanda pelo nutriente, as espigas ficaram pequenas e com baixo teor de proteína, os grãos da extremidade não encherão, o que refletirá na produção final.

De acordo com 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.

Tabela 31 - Resumo da análise de variância e resultados médios dos componentes de produção e produtividade do milho submetido à omissão de N, P, K e Mn

Tratamentos (T)	Peso dos grãos/parcela	Massa de mil grãos	Massa média do sabugo	Produtividade
	----- g -----			-----kg ha ⁻¹ -----
T1 – Todos os nutrientes	5458,8 ^a	266,0	27,91 ^a	7481,8 ^a
T2 – sem Manganês	5035,2 ^{ab}	271,4	24,14 ^{ab}	7191,9 ^{ab}
T3 – sem Nitrogênio	2745,4 ^c	239,2	17,24 ^b	3762,9 ^c
T4 – sem Potássio	3596,8 ^{bc}	232,8	21,49 ^{ab}	4929,8 ^{bc}
T5 – sem Fósforo	3928,8 ^{abc}	250,0	23,72 ^{ab}	5384,9 ^{abc}
Blocos	1,29 ^{ns}	2,61 ^{ns}	3,34 [*]	1,11 ^{ns}
Teste F	7,06 ^{**}	2,25 ^{ns}	5,71 ^{**}	8,57 ^{**}
DMS Tukey	1789,5	48,1	7,1	2319,7
CV (%)	22	10	16	21

**, * e ns - Significativo a 1% e a 5 % de probabilidade, e não significativo, respectivamente.

Figura 51 - Espigas das parcelas do experimento a campo. (Fotos: L. M. ROMUALDO).

4.5.3 Validação do sistema de visão artificial (SVA)

Os Quadros 25, 26 e 27 apresentam as matrizes de predição dos resultados do treinamento com a base de imagens da casa de vegetação (Fase I) e o teste com a base de imagens do campo (Fase II), nos estádios de desenvolvimento do milho.

Nas respectivas matrizes, está destacado em cores diferentes o número de imagens do campo classificados na base de dados das imagens da Fase I.

Observou-se que houve grande confusão de janelas pelo sistema de visão artificial ao classificar as imagens. Tomando como exemplo as imagens de folhas de plantas cultivadas sem fósforo (P) no estádio V4 (Quadro 25), verifica-se que quando essas imagens são lançadas no SVA, ele não identifica em nenhuma classe da base correspondente às doses de P (classes e, p e aa) em destaque. O mesmo ocorre para as imagens dos tratamentos sem manganês (Mn), sem nitrogênio (N), sem potássio (K) e o controle (todos os nutrientes).

Os resultados indicam que a base de treinamento da casa de vegetação não é apropriada para classificar imagens do campo, pois o sistema demonstrou muita dificuldade em reconhecer os padrões estabelecidos em casa de vegetação.

Para verificar se realmente há distinção entre as imagens foi realizado outro experimento com as imagens do campo, onde as mesmas foram incluídas como uma nova classe na base de treinamento da casa de vegetação.

Os resultados estão apresentados nas Tabelas 31, 32 e 33 e Quadros 28, 29 e 30. Nos Quadros, as classes k, l, m, n e am destacadas correspondem, respectivamente, às imagens do campo sem P, sem Mn, sem N, sem K e controle.

Nota-se, de uma forma geral, acerto alto nessas imagens (classes k, l, m, n e am), que corresponderam respectivamente à 35, 82, 75, 79, 72% no estádio V4; 85, 60, 83, 74, 67 em V7, e 44, 57, 76 e 33% em R1, dentro das classes correspondentes, e muitos erros dentro das outras classes, sugerindo nenhuma semelhança com as classes da casa de vegetação, confirmando que seria necessária uma base de dados de imagens para as variadas condições de cultivo.

No campo, as condições mudam muito, a absorção de nutrientes devido às interações entre os elementos, ou até mesmo condições climáticas, pode causar mudança na textura e tamanho das folhas, que podem afetar a extração de características de modo a se tornarem diferentes das imagens de folhas de plantas cultivadas em casa de vegetação.

Sendo assim, a base de treinamento do campo precisa contar com maior quantidade de amostras, para poder expandir o conhecimento do SVA, utilizando imagens de vários estádios de desenvolvimento da cultura, safra de verão e inverno, áreas geográficas e variedades de milho. Sendo assim, a proposta seria treinar a base até atingir um ponto no qual o sistema conheça o suficiente para validar qualquer imagem futura a partir do campo.

Quadro 25 – Matriz de predição dos resultados do treinamento com a base de imagens da casa de vegetação do estádio V4, e o teste com a base de imagens do campo em V4

Classes ⇒	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	aa	ab	ac	ad	ae	af	ag	ah
Sem Fósforo	0	3	0	39	0	3	0	0	0	0	2	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	0	0	0	23	0	0	0	0
Sem Manganês	0	0	0	75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	1	0	0	0	0
Sem Nitrogênio	0	9	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23	0	0	0	52	0	0	0	0
Sem Potássio	0	14	0	42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	2	0	10	0	0	0	0
Controle	0	0	0	56	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	31	0	0	0	0	0	0	1

Classes da base de imagens da casa de vegetação: a=Dose zero de boro; b=Dose zero de cálcio; c=Dose zero de cobre; d=Dose zero de ferro; **e=Dose zero de fósforo**; f=Dose zero de magnésio; **g=Dose zero de manganês**; **h=Dose zero de nitrogênio**; **i=Dose zero de potássio**; j=Dose zero de zinco; k=Dose zero de enxofre; l=1/5 de boro; m=1/5 de cálcio; n=1/5 de cobre; o=1/5 de ferro; **p=1/5 de fósforo**; q=1/5 de magnésio; **r=1/5 de manganês**; **s=1/5 de nitrogênio**; **t=1/5 de potássio**; u=1/5 de zinco; v=1/5 de enxofre; w=2/5 de boro; x=2/5 de cálcio; y=2/5 de cobre; z=2/5 de ferro; **aa=2/5 de fósforo**; ab=2/5 de magnésio; **ac=2/5 de manganês**; **ad=2/5 de nitrogênio**; **ae=2/5 de potássio**; af=2/5 de zinco; ag=2/5 de enxofre; **ah=Dose completa**.

Quadro 26 – Matriz de predição dos resultados do treinamento com a base de imagens da casa de vegetação do estádio V7, e o teste com a base de imagens do campo em V7

Classes ⇨	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	aa	ab	ac	ad	ae
Sem Fósforo	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	47	17	0	0	0	0	0	0	0	0	16	0	16
Sem Manganês	12	0	0	0	4	11	6	0	0	0	6	0	0	0	3	3	6	0	15	11	0	0	0	0	3	0	8	4	7	0	1
Sem Nitrogênio	0	0	14	0	0	0	0	38	0	5	0	0	16	0	0	0	0	0	3	9	0	0	13	0	0	0	0	0	2	0	
Sem Potássio	0	0	3	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31	7	0	0	0	0	0	0	0	12	7	33	
Controle	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	9	0	0	0	0	8	8	0	15	0	0	0	0	0	1	2	5	2	8	0	27

Classes da base de imagens da casa de vegetação: a=Dose zero de boro; b=Dose zero de cálcio; c=Dose zero de cobre; d=Dose zero de enxofre; e=Dose zero de ferro; **f=Dose zero de fósforo**; g=Dose zero de magnésio; **h=Dose zero de manganês**; **i=Dose zero de nitrogênio**; **j=Dose zero de potássio**; k=1/5 de boro; l=1/5 de cálcio; m=1/5 de cobre; n=1/5 de enxofre; o=1/5 de ferro; **p=1/5 de fósforo**; q=1/5 de magnésio; **r=1/5 de manganês**; **s=1/5 de nitrogênio**; **t=1/5 de potássio**; u=2/5 de boro; v=2/5 de cálcio; w=2/5 de cobre; x=2/5 de enxofre; y=2/5 de ferro; **z=2/5 de fósforo**; aa=2/5 de magnésio; **ab=2/5 de manganês**; **ac=2/5 de nitrogênio**; **ad=2/5 de potássio**; ae=Dose completa.

Quadro 27 – Matriz de predição dos resultados do treinamento com a base de imagens da casa de vegetação do estádio R1, e o teste com a base de imagens do campo em R1

Classes ⇨	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	aa	ab	ac	ad	ae	af	ag
Sem Fósforo	10	0	1	0	0	0	1	0	3	0	2	0	0	0	3	0	0	7	0	29	4	0	0	0	0	2	0	1	13	0	8	7	14
Sem Manganês	0	12	22	0	0	0	0	41	0	1	3	0	3	0	6	0	0	0	0	0	0	2	0	5	0	0	0	0	5	0	0	0	
Sem Nitrogênio	0	28	18	7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	21	2	9	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	11	0	0	0
Sem Potássio	18	0	2	0	0	0	10	0	4	7	0	0	10	0	0	14	2	7	9	1	0	0	0	0	0	2	0	0	5	0	4	4	1
Controle	0	8	8	0	0	0	0	38	0	4	4	0	8	0	3	7	3	0	0	0	0	5	0	8	0	0	3	0	0	1	0	0	0

Classes da base de imagens da casa de vegetação: a=Dose zero de boro; b=Dose zero de cálcio; c=Dose zero de cobre; d=Dose zero de enxofre; e=Dose zero de ferro; f=Dose zero de magnésio; **g=Dose zero de manganês**; **h=Dose zero de nitrogênio**; **i=Dose zero de potássio**; j=Dose zero de zinco; k=1/5 de boro; l=1/5 de cálcio; m=1/5 de cobre; n=1/5 de enxofre; o=1/5 de ferro; **p=1/5 de fósforo**; q=1/5 de magnésio; **r=1/5 de manganês**; **s=1/5 de nitrogênio**; **t=1/5 de potássio**; u=1/5 de zinco; v=2/5 de boro; w=2/5 de cálcio; x=2/5 de cobre; y=2/5 de enxofre; z=2/5 de ferro; **aa=2/5 de fósforo**; ab=2/5 de magnésio; **ac=2/5 de manganês**; **ad=2/5 de nitrogênio**; **ae=2/5 de potássio**; af=2/5 de zinco; **ag=Dose completa**.

Tabela 32 - Resultados com inclusão de imagens do campo na base de treinamento de casa de vegetação, com imagens coloridas das folhas de plantas de milho no estádio V4

GWF	Nº de imagens corretamente classificadas	Probabilidade de acerto global	Índice Kappa	Desvio Padrão do acerto	Confiança do acerto	Número de janelas utilizadas
MeioFI	2159	55,4%	0,54	0,66	0,48	3900

Tabela 33 - Resultados com inclusão de imagens do campo na base de treinamento de casa de vegetação, com imagens coloridas das folhas de plantas de milho no estádio V7

GWF	Nº de imagens corretamente classificadas	Probabilidade de acerto global	Índice Kappa	Desvio Padrão do acerto	Confiança do acerto	Número de janelas utilizadas
MeioFI	2082	57,8%	0,57	0,84	0,11	3600

Tabela 34 - Resultados com inclusão de imagens do campo na base de treinamento de casa de vegetação, com imagens coloridas das folhas de plantas de milho no estádio R1

GWF	Nº de imagens corretamente classificadas	Probabilidade de acerto global	Índice Kappa	Desvio Padrão do acerto	Confiança do acerto	Número de janelas utilizadas
MeioFI	1991	52,4%	0,51	0,31	0,18	3800

Quadro 28 – Matriz de confusão dos resultados obtidos com o meio das folhas indicativas do campo utilizadas como uma nova classe na base de treinamento da casa de vegetação, no estágio V4 (Técnica GWF com imagens coloridas e o classificador SVM)

a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	aa	ab	ac	ad	ae	af	ag	ah	ai	aj	ak	al	am			
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	a = 1
0	27	0	3	0	0	0	0	0	0	11	5	0	2	0	0	13	0	6	0	4	0	0	0	1	0	0	0	0	7	0	2	0	19	0	0	0	0	0	0	0	b = 2
0	0	78	0	0	0	4	1	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3	1	5	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	3	0	0	0	c = 3	
0	6	0	39	0	0	0	0	0	0	3	3	9	1	0	0	1	0	12	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	15	0	4	0	3	0	0	0	0	0	0	d = 4	
0	0	0	0	93	0	3	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	e = 5	
0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	f = 6	
0	0	4	0	3	0	58	3	4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	11	2	0	0	3	0	2	1	0	1	0	0	0	1	0	3	3	0	0	g = 7	
0	0	0	0	1	0	1	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	1	7	0	0	11	0	10	2	0	14	0	1	0	0	0	7	1	2	0	h = 8	
1	0	0	0	1	0	3	1	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	i = 9	
0	0	2	0	0	0	0	0	0	55	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	2	0	11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26	0	0	0	0	0	j = 10
0	15	0	7	0	0	0	0	0	1	35	1	0	0	1	0	11	0	10	0	4	0	0	0	2	0	0	0	0	6	0	2	0	5	0	0	0	0	0	0	0	k = 11
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	82	2	7	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	l = 12
0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	9	75	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	m = 13
0	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	12	2	79	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	n = 14
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	8	7	81	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	o = 15
0	0	2	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	p = 16
0	19	0	0	0	0	0	0	0	0	13	1	1	3	0	0	35	0	4	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	1	0	15	0	0	0	0	0	0	q = 17
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	95	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	r = 18	
0	8	0	25	0	0	0	0	0	0	11	1	2	3	1	0	7	0	16	0	5	0	0	0	1	0	0	0	0	12	0	3	0	3	0	2	0	0	0	0	0	s = 19
0	0	1	0	0	0	0	18	0	0	1	0	0	0	0	0	0	4	0	33	0	0	2	0	0	1	0	9	13	0	16	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	t = 20
0	2	0	1	0	0	0	0	0	3	6	0	1	0	1	0	2	0	1	0	60	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	u = 21
0	0	10	1	1	0	7	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33	6	8	0	7	2	1	0	0	1	0	5	0	1	0	7	3	0	0	0	0	v = 22
0	0	2	0	0	0	4	9	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	5	32	5	0	5	0	4	5	0	6	0	1	0	4	0	1	9	0	0	0	0	w = 23
0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	7	64	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0	6	0	1	6	0	0	0	x = 24	
0	0	0	1	0	0	0	0	0	19	0	0	1	0	0	0	1	0	5	0	2	0	0	0	44	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	21	0	0	0	0	0	y = 25
0	0	1	0	0	0	5	9	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	10	8	5	0	36	0	7	0	0	1	0	1	0	0	0	13	2	0	0	0	z = 26
0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	78	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	aa = 27
0	0	0	0	2	0	2	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	4	4	0	0	2	0	26	7	0	11	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	ab = 28
0	0	0	0	0	0	1	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	9	59	0	11	0	0	0	0	0	1	0	0	0	ac = 29	
0	12	0	16	0	0	0	0	0	1	10	2	3	3	1	0	8	0	14	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	19	0	1	0	7	0	0	0	0	0	0	0	ad = 30
0	2	1	0	0	0	0	17	0	0	0	1	0	0	0	0	1	2	0	26	0	1	6	1	0	1	0	4	11	0	25	0	0	0	0	0	1	0	0	0	ae = 31	
0	4	0	6	0	0	0	0	0	1	7	1	0	0	0	0	2	0	4	0	28	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	42	0	2	0	0	0	0	0	0	af = 32	
0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	15	0	1	0	0	0	0	0	0	0	68	0	1	0	0	2	0	0	ag = 33	
0	27	0	1	0	0	0	0	0	0	9	3	0	7	0	0	13	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	2	0	28	0	0	0	0	0	0	0	ah = 34
0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	12	0	2	0	0	0	0	1	0	1	0	44	0	0	32	0	0	0	ai = 35	
0	0	0	1	0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	59	0	0	0	0	0	aj = 36	
0	0	1	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	3	0	2	2	5	0	22	0	2	0	0	3	0	0	0	0	0	52	0	0	0	0	ak = 37
0	0	0	0	0	0	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3	7	0	1	0	0	0	0	0	5	0	30	0	2	42	0	0	0	al = 38	
0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	3	6	3	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	am = 39	

a=D1boro;b=D1cálcio;c=D1ferro;d=D1cobre;e=D1fósforo;f=D1magnésio;g=D1manganês;h=D1nitrogênio;i=D1potássio;j=D1zinco;**k=FósforoCampo;l=ManganêsCampo;m=NitrogênioCampo;n=PotássioCampo**;o=D1enxofre;p=D2boro;q=D2cálcio;r=D2cobre;s=D2ferro;t=D2fósforo;u=D2magnésio;v=D2manganês;w=D2nitrogênio;x=D2potássio;y=D2zinco;z=D2enxofre;aa=D3boro;ab=D3cálcio;ac=D3ferro;ad=D3cobre;ae=D3fósforo;af=D3magnésio;ag=D3manganês;ah=D3nitrogênio;ai=D3potássio;aj=D3zinco;ak=D3enxofre;al=DoseCompleta;**am=ControleCampo**.

Quadro 29 – Matriz de confusão dos resultados obtidos com o meio das folhas indicativas do campo utilizadas como uma nova classe na base de treinamento da casa de vegetação, no estádio V7 (Técnica GWF com imagens coloridas e o classificador SVM)

a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	aa	ab	ac	ad	ae	af	ag	ah	ai	aj				
73	0	0	0	2	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	1	0	0	0	7	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	a = 1
1	80	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	1	1	1	2	0	0	0	1	0	0	0	2	0	5	0	0	1	0	1	0	1	b = 2	
0	0	47	0	0	0	0	4	3	0	0	0	5	2	0	0	19	0	0	0	0	0	10	0	0	0	9	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	c = 3		
0	0	0	95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	d = 4		
3	0	0	0	93	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	e = 5		
11	1	0	0	14	59	1	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	1	3	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	f = 6		
2	1	0	0	0	0	97	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	g = 7		
0	0	7	0	0	0	0	63	0	0	0	0	2	0	0	0	5	0	0	0	0	0	4	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	h = 8	
0	0	1	0	0	0	0	2	91	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	i = 9		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	8	0	0	0	j = 10		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	85	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	k = 11		
3	0	0	0	4	5	1	0	0	0	3	60	0	7	0	0	0	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	2	0	0	5	0	l = 12		
0	0	4	0	0	0	0	6	0	0	0	2	83	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	m = 13		
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	4	2	3	74	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	3	0	0	0	0	0	2	0	0	4	0	n = 14		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	1	81	0	1	0	1	3	3	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	2	o = 15	
1	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	2	38	0	15	0	0	0	13	0	0	6	10	0	8	0	0	0	3	0	0	0	0	0	p = 16		
0	0	26	0	1	0	0	6	3	0	0	1	2	1	2	1	21	0	0	0	0	0	3	0	0	0	32	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	q = 17		
1	0	2	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	2	38	0	0	1	4	0	0	4	11	0	18	0	0	0	2	0	0	0	0	0	r = 18		
2	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	1	30	0	10	1	0	0	8	0	0	1	29	0	2	8	0	0	0	0	0	s = 19		
0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3	0	0	0	1	55	4	0	0	0	0	0	0	0	0	32	1	0	0	2	0	0	0	t = 20		
1	2	1	1	1	3	0	0	1	2	0	3	0	0	5	5	0	0	11	2	30	2	0	4	4	0	1	1	4	1	10	4	0	1	0	0	0	u = 21		
5	2	0	2	3	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	16	0	8	2	0	1	27	0	0	11	5	0	5	3	0	0	7	0	0	0	0	0	v = 22		
0	0	3	0	0	0	0	1	0	0	3	0	4	9	0	0	1	0	0	0	0	0	61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	1	0	0	w = 23		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33	0	0	0	x = 24		
1	0	0	3	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	4	1	5	5	1	3	12	0	0	35	2	0	5	4	0	2	15	0	0	0	0	0	y = 25		
6	0	0	0	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	11	3	0	0	11	0	0	7	34	0	3	1	0	1	1	0	0	0	0	0	z = 26		
0	0	23	0	0	0	0	7	3	0	0	0	5	2	2	0	23	0	0	0	0	0	6	0	0	0	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	aa = 27		
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	30	0	0	1	7	0	0	4	3	0	41	2	0	0	0	0	0	0	0	0	ab = 28		
2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	1	0	26	0	7	1	0	0	5	1	0	1	38	0	9	3	0	0	0	0	0	ac = 29		
0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	49	3	0	0	0	0	0	0	0	0	43	0	0	0	1	0	0	0	ad = 30		
1	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	1	2	1	2	6	1	6	1	1	0	3	0	2	2	4	2	46	3	0	1	0	3	0	0	ae = 31		
1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	13	0	1	13	0	0	25	4	0	0	5	1	3	32	0	0	0	0	0	af = 32		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	55	0	10	1	0	ag = 33		
0	0	0	0	0	0	0	1	0	8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	27	0	0	0	0	0	2	0	0	0	60	0	0	0	0	ah = 34	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	75	5	0	ai = 35	
0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2	4	0	1	8	0	0	0	0	1	4	0	0	0	0	0	1	0	0	3	1	0	1	0	5	67	0	0	aj = 36	

a=D1boro;b=D1cálcio;c=D1cobre;d=D1enxofre;e=D1ferro;f=D1fósforo;g=D1magnésio;h=D1manganês;i=D1nitrogênio;j=D1potássio;**k=FósforoCampo;l=ManganêsCampo;m=NitrogênioCampo;n=PotássioCampo**;o=D2boro;p=D2cálcio;q=D2cobre;r=D2enxofre;s=D2ferro;t=D2fósforo;u=D2magnésio;v=D2manganês;w=D2nitrogênio;x=D2potássio;y=D3boro;z=D3cálcio;aa=D3cobre;ab=D3enxofre;ac=D3ferro;ad=D3fósforo;ae=D3magnésio;af=D3manganês;ag=D3nitrogênio;ah=D3potássio;ai=DoseCompleta;**aj=ControleCampo**.

Quadro 30 – Matriz de confusão dos resultados obtidos com o meio das folhas indicativas do campo utilizadas como uma nova classe na base de treinamento da casa de vegetação, no estágio R1 (Técnica GWF com imagens coloridas e o classificador SVM)

a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	aa	ab	ac	ad	ae	af	ag	ah	ai	aj	ak	al		
81	0	2	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	6	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	0	0	0	0	a = 1
0	83	1	0	1	0	0	0	0	0	0	3	4	0	0	0	0	0	0	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	b = 2	
6	1	32	0	0	0	8	0	0	0	2	5	1	4	8	0	3	0	3	0	0	5	0	0	0	7	0	11	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	c = 3	
0	0	0	62	1	2	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	13	0	7	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	3	0	3	0	0	0	0	d = 4	
0	1	0	1	88	1	0	7	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	e = 5	
0	0	2	2	1	80	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0	0	2	1	0	2	0	0	0	0	1	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	f = 6	
1	0	2	0	0	0	44	0	1	0	0	0	0	1	0	0	7	0	0	0	0	21	1	0	1	0	0	0	8	0	1	7	0	5	0	0	0	0	g = 7	
0	3	0	1	6	1	0	87	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	h = 8		
1	2	0	0	0	0	1	0	41	0	5	1	0	2	1	0	0	0	1	1	1	1	4	17	2	1	0	0	0	0	2	0	5	1	2	0	6	2	i = 9	
5	0	0	0	0	0	2	0	2	49	3	0	0	1	0	1	7	0	0	2	0	0	0	0	3	4	3	0	0	0	8	2	4	0	0	0	3	1	j = 10	
11	0	0	0	0	0	0	0	1	0	44	0	0	18	0	0	1	0	0	0	0	2	0	4	1	0	1	0	0	1	0	0	5	0	0	3	7	1	k = 11	
1	1	7	0	0	0	0	7	0	0	0	57	5	2	3	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	4	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	l = 12	
0	5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	76	0	0	0	0	0	4	3	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	3	0	0	0	5	m = 13	
17	0	0	0	0	0	2	0	3	5	5	0	0	33	0	0	13	0	0	0	0	4	1	6	0	0	0	0	0	2	1	0	4	0	2	1	1	0	n = 14	
0	2	3	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	65	0	0	0	8	0	1	0	0	0	0	13	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	o = 15	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	25	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	p = 16	
7	0	6	0	0	0	3	0	0	2	0	0	0	4	0	0	53	0	0	0	0	2	0	1	1	3	0	0	0	0	5	0	5	0	4	4	0	0	q = 17	
0	0	0	14	7	3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	45	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	29	0	0	0	0	0	0	0	r = 18		
0	2	11	13	0	3	0	0	2	0	0	1	3	0	11	0	0	1	32	1	8	0	0	0	0	4	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	4	s = 19	
0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	70	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	1	0	3	0	0	1	t = 20		
0	0	2	5	1	1	0	0	0	0	0	0	3	0	1	0	0	3	4	0	59	0	0	0	0	1	1	0	4	0	0	11	0	4	0	0	0	0	u = 21	
4	0	2	0	0	0	18	0	2	1	2	0	0	5	0	0	2	0	0	0	0	27	0	0	2	0	0	0	0	4	0	0	25	0	3	2	1	0	v = 22	
0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	80	0	1	0	1	0	0	7	0	2	2	0	0	1	0	0	w = 23	
5	0	2	0	0	0	4	0	6	0	4	0	0	7	0	0	1	0	0	0	0	0	2	18	7	0	0	0	0	2	0	0	11	0	4	5	22	0	x = 24	
5	0	1	0	0	0	6	0	3	3	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	5	2	6	16	0	0	0	0	4	1	1	22	0	7	8	8	0	y = 25	
2	1	8	0	0	0	1	0	0	1	0	3	0	1	19	0	8	0	4	0	1	0	0	0	0	39	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	z = 26	
0	0	1	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	1	6	0	0	0	59	0	0	1	0	2	1	0	0	0	0	0	aa = 27	
0	0	10	0	0	1	0	1	0	0	0	7	0	0	4	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	6	0	68	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	ab = 28	
0	0	0	8	3	5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	37	4	0	4	0	0	0	0	0	0	0	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ac = 29	
4	0	1	0	0	0	22	0	3	0	1	0	0	4	0	0	1	0	0	0	0	2	4	3	2	0	2	0	0	18	0	7	14	0	6	2	4	0	ad = 30	
0	2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	72	0	0	0	0	0	4	ae = 31		
0	0	2	4	2	0	8	0	1	0	0	0	1	0	1	2	0	1	1	0	22	2	4	0	4	0	0	0	3	6	0	30	3	1	2	0	0	0	af = 32	
12	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	1	0	0	3	0	0	0	0	12	0	3	3	0	0	0	4	0	0	56	0	0	1	1	0	0	ag = 33	
0	0	2	2	0	0	1	0	3	0	0	0	4	1	0	0	0	1	2	2	7	0	0	0	0	1	0	0	0	2	10	0	61	1	0	0	0	ah = 34		
3	0	2	0	0	0	6	0	1	0	2	0	0	2	0	0	8	0	0	0	0	2	0	8	4	0	0	0	2	0	0	3	0	41	5	11	0	ai = 35		
3	0	2	0	0	0	3	0	2	4	1	0	0	2	0	0	5	0	0	0	0	2	0	8	15	0	1	0	0	1	0	1	19	0	5	20	6	0	aj = 36	
6	0	0	0	0	0	1	0	8	0	3	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	1	0	21	3	0	0	0	0	1	0	0	3	0	11	7	32	0	ak = 37	
0	1	3	0	0	0	0	5	2	0	0	10	3	0	2	0	2	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	67	al = 38	

a=D1boro;b=D1cálcio;c=D1cobre;d=D1enxofre;e=D1ferro;f=D1magnésio;g=D1manganês;h=D1nitrogênio;i=D1potássio;j=D1zinco;**k=FósforoCampo;l=ManganêsCampo;m=NitrogênioCampo;n=PotássioCampo**;o=D2boro;p=D2cálcio;q=D2cobre;r=D2enxofre;s=D2ferro;t=D2fósforo;u=D2magnésio;v=D2manganês;w=D2nitrogênio;x=D2potássio;y=D2zinco;z=D3boro;aa=D3cálcio;ab=D3cobre;ac=D3enxofre;ad=D3ferro;ae=D3fósforo;af=D3magnésio;ag=D3manganês;ah=D3nitrogênio;ai=D3potássio;aj=D3zinco;ak=DoseCompleta;**am=ControleCampo**.

5. CONCLUSÃO

A omissão de nitrogênio (N), potássio (K) e fósforo (P) proporcionaram deficiências nutricionais características nas folhas do milho quando cultivado em casa de vegetação.

As modificações nas folhas do milho com as doses de N, P, K e manganês possibilitaram a obtenção de imagens necessárias para o treinamento do sistema de visão artificial (SVA) em casa de vegetação, proporcionando bons índices de acertos do sistema para identificação do estado nutricional.

A base de imagens de casa de vegetação foi ideal para testar a hipótese de que um sistema de visão artificial pode identificar o estado nutricional do milho, detectando possível deficiência nos estádios iniciais de desenvolvimento.

A utilização das imagens da casa de vegetação para treinar o SVA visando à validação de imagens do campo não é adequada, pois gera confusão na interpretação levando a erros de classificação.

Para o treinamento do SVA para identificação do estado nutricional do milho cultivado a campo, deverá ser desenvolvido um banco de imagens geradas no campo para os diversos fatores de produção que possam afetar a manifestação dos sintomas nutricionais.

A utilização do SVA para diagnose nutricional do milho, tanto em casa de vegetação como no campo é promissora.

REFERÊNCIAS

AGRIANUAL. **Anuário da agricultura brasileira**. FNP/M&S. São Paulo, 2011. 419p.

ABRAHÃO, S. A.; PINTO, F. A. C.; QUEIROZ, D. M.; SANTOS, N. T.; CARNEIROS, J. E. S. Determination of nitrogen and chlorophyll levels in bean-plant leaves by using spectral vegetation bands and indices. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.44, n.3, p.464-4173, 2013.

ALMEIDA M. L.; SANGOI, L.; NAVA, I. C.; GALIO, J.; TRENTIN, O. S.; RAMPAZZO, C. Crescimento inicial de milho e sua relação com o rendimento de grãos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, p.189-194, 2003.

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.

ALVES, V. M. C.; NOVAIS, R. F.; OLIVEIRA, M. F. G.; BARROS, N. F. Efeito da omissão de fósforo na absorção de nitrogênio por híbrido de milho (*Zea mays*, L.). **Revista Ceres**, Viçosa, v.43, n.248, p.435-443, 1996.

ANDERSON, E. L.; MILLNER, P. D.; KUNISHI, H. M. Maize root length density and mycorrhizal infection as influenced by tillage and soil phosphorus. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.10, n.1, p. 349-356, 1987.

ANDRADE, A. G.; HAAG, H. P.; OLIVEIRA, G. D. Acumulação diferencial de nutrientes por cinco cultivares de milho (*Zea mays* L.). I. Acumulação de macronutrientes, 32, 1975, Piracicaba. **Anais da Escola Superior “Luiz de Queiroz”**. Piracicaba, p.115-149, 1975a.

ANDRADE, A. G.; HAAG, H.P.; OLIVEIRA, G. D. Acumulação diferencial de nutrientes por cinco cultivares de milho (*Zea mays* L.). II. Acumulação de micronutrientes, 32, 1975, Piracicaba. **Anais da Escola Superior “Luiz de Queiroz”**. Piracicaba, p.150-172, 1975b.

ANDREOTTI, M.; RODRIGUES, J. D.; CRUSCIOL, C. A. C.; SOUZA, E. C. A.; BÜLL, L. T. Crescimento do milho em função da saturação por bases e da adubação potássica. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.58, n.1, p.145-150, 2001.

ANKENBRANDT, C. A.; BUCKLES, B. P.; PETRY, F. E. Scene recognition using genetic algorithms with semantic nets, **Pattern Recognition Letters**, Washington, v.11, p. 285-293, 1990.

ASSMANN, A. L. **Efeito da aplicação de Fe, Mn e Zn no crescimento do milho e nos teores de Fe, Mn, Zn e Cu do solo e da planta**. 1993, 91f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1993.

AVALHÃES, C. C.; PRADO, R. M.; ROZANE, D. E.; ROMUALDO, L. M.; CORREIA, M. A. Omissão de macronutrientes no crescimento e no estado nutricional de capim-elefante (cv. Mott) cultivado em solução nutritiva. **Scientia Agrária**, Curitiba, v.10, p.215-222, 2009.

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. **Internacional Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence**, v.23, n.6, p.1145-1160, 2009.

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 Agrônomo, 1983. 48 p. (Boletim Técnico, 78).

BESDEK, J. C.; KELLER, J.; KRISNAPURAM, R.; PAL, N. R. **Fuzzy Models and Algorithms for Pattern Recognition and Image Processing**, Kluwer, 1999.

BOAWN, L. C.; BROWN, J. C. Furthen evidences for a P x Zn imbalance in plants. **Soil Science Society of Americam Proceedings**, Madison, v.32, p.94-97, 1968.

BORGES I. D.; VON PINHO, R. A.; PEREIRA, J. L. A. R. Acúmulo de micronutrientes em híbridos de milho em diferentes estádios de desenvolvimento. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.33, n.4, p.1018-1025, 2009.

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.

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.

CAKMAK, I.; MARSCHNER, H.; BANGERTH, F. Effect of zinc nutritional status on growth, protein metabolism and levels of índole-3-acetic acid and other phytohormones in bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Journal Experimental Botany**, Lancaster, v.40, p.405-412, 1989.

CAMACHO, R.; MALAVOLTA, E.; GUERRERO-ALVES, J.; CAMACHO, T. Vegetative growth of grain sorghum in response to phosphorus nutrition. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 4, p.771-776, 2002.

CANTÃO, F. R. O. Marcadores morfológicos de raiz em genótipos de milho contrastantes para tolerância à seca em resposta a estresses de fósforo e alumínio. 2007. 108 f. Monografia (Graduação) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

CARVALHO, M. M.; MARTINS, C. E.; VERNEQUE, R. S. Respostas de uma espécie de brachiaria à fertilização com nitrogênio e potássio em um solo ácido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.15, n.2, p.195-200, 1991.

CHENG, H.D.; JIANG, X.H.; SUN, Y.; WANG, J. Color image segmentation: advances and prospects. **Pattern Recognition**, v.34, p.2259-2281, 2001.

CICERO, S. M.; BANZATTO JUNIOR, H. L. Avaliação do relacionamento entre danos mecânicos e vigor, em sementes de milho, por meio da análise de imagens. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v.25, n.1, p.29-36, 2003.

COELHO, A. M.; FRANÇA, G. E. **Seja o doutor do seu milho: nutrição e adubação**. Piracicaba: POTAFOS, 1995. p.1-9. Arquivo do Agrônomo, n.2, 2ed. Ampliada e totalmente modificada. Informações Agronômicas, Piracicaba, n.71, 1995.

COELHO, A. M.; DURÃES, F. O. M.; FRANÇA, G. E.; OLIVEIRA, A. C. Parcelamento da adubação potássica e nitrogenada na eficiência de absorção e produção de grãos de milho sob condições irrigadas. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 21., 1996, Londrina. **Resumos...**Londrina: ABMS; IAPAR, 1996. P. 170.

COELHO, A. M.; FRANÇA, G. E.; PITTA, G. V. E.; ALVES, V. M. C. **Cultura do milho: diagnose foliar do estado nutricional da planta**. Sete Lagoas: EMBRAPA Milho e Sorgo. 2002. (Circular técnica, 45).

COELHO, A. M.; CRUZ, J. L.; SANTOS, P. H. A. D.; AMARAL, L. R. do. Nitrogênio mineral no solo e índice de clorofila na folha como indicadores da necessidade de nitrogênio para o milho. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 3, 2005 [resumos expandidos]. Sete Lagoas. **Anais**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo: UFV: SBEA: CIGR, 2005. 6p. CD-ROM.

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).

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos, quarto levantamento, janeiro 2013**. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_01_09_17_44_20_boletim_graos_janeiro_2013.pdf. Acesso em 04 de abril de 2013.

COSTA, K. A. P.; OLIVEIRA, I. P.; FAQUIN, V.; MACHADO, E. L.; RAMOS, J. C.; LIMA FILHO, A. K. Efeitos quantitativo e qualitativo do nitrogênio e do potássio no desenvolvimento da *Brachiaria brizantha* CV. MG5. **Revista Eletrônica da Faculdade de Montes Belos**, Montes Belos, v.1, n.1, p.56-70, 2006.

DECHEN, A. R.; HAAG, H. P.; CARMELLO, Q. A. C. Funções dos micronutrientes nas plantas. In: FERREIRA, M. E; CRUZ, M. C. P. (eds), **Micronutrientes na agricultura**. p.1-34. POTAFOS, Piracicaba. 1991.

DUARTE, A. P.; KIEHL, J. C.; CAMARGO, M. A. F.; RECO, P. C. Acúmulo de matéria seca e nutrientes em cultivares de milho originárias de clima tropical e introduzidas de clima temperado. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.2, n.3, p.1-20, 2003.

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.

EDWARDS, J. H.; KAMPRATH, E. J. Zinc accumulation by corn seedlings as influenced by phosphorus, temperature and light intensity. **Agronomy Journal**, Madison, v.66, p.479-482, 1974.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 1999. 412p.

EPSTEIN, E. **Nutrição mineral das plantas; princípios e perspectivas**. Trad. e notas de E. Malavolta. 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 das plantas: princípios e perspectivas**. Trad. de Maria Edna Tenório Nunes: Mineral Nutrition of Plants) Londrina: Editora Planta, 2006. 403p.

EVERITT, B. S., DUNN, G. **Applied Multivariate Data Analysis**. 2. nd. London: Arnold, London, 2001, 342p.

FALCÃO NETO, R. **Produção de mudas de castanha-do-gurguéia com calagem e NPK**. 2010. 63f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Piauí, Campus Professora Cinobelina Elvas. Bom Jesus, 2010.

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, Editora Agropecuária, 2000. 360p.

FANCELLI, A. L. Influência da nutrição na ocorrência de doenças de plantas. In: FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Milho. Manejo e Adubação**. Piracicaba: USP/ESALQ/LPV, Piracicaba, p.1-35, 2008.

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.

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: ESAL: FAEPE, 1994. 227 p.

FAVARIN, J. L.; TEZOTTO, T.; RAGASSI, C. F. Uso racional de micronutrientes na cultura de milho (*Zea mays* L.). In: FANCELLI, A. L. (ed), **Milho: nutrição e adubação**. Piracicaba: USP/ESALQ/LPV, Piracicaba, p.112-141, 2008.

FERNANDES, M. S. **Nutrição Mineral de Plantas**. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: UFV, Viçosa, 2006. 432p.

FERRARI NETO, J., FAQUIN, V., VALE, F. R. et al. Limitações nutricionais do Colômbio (*Panicum maximum* Jacq.) e da Braquiária (*Brachiaria decumbens* Stapf), em amostras de um latossolo do noroeste do Paraná: I. Produção de matéria seca e perfilhamento. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.23, n.4, p.538-551, 1994.

FERREIRA, M. M. M. Sintomas de deficiência de macro e micronutrientes de plantas de milho híbrido BRS 1010. **Revista Agro@mbiente**, v.6, p.74-83, 2012.

FILGUEIRA, F. A. R. Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. Viçosa: [s.n], 2000. 402p.

FLANNERY, R. L. Exigências nutricionais do milho em estudo de produtividade máxima. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v.37, n.6-7, 1987.

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, n.2, p.113-124, 2008.

FORNASIERI FILHO, D. **A cultura do milho**. Jaboticabal: FUNRP, 1992. 273p.

FURLANI, P. R.; SILVEIRA, L. C. P.; BOLONHEZI, D.; FAQUIN, V. Cultivo hidropônico de plantas. Campinas: IAC, 52p. (**Boletim Técnico 180**), 1999.

GAMBOA, A. **La fertilizacion del maíz**. Berna, Instituto Internacional de la Potassa, 1980. 72p. (Boletim IIP, 5)

GAUTAM, P. GUSTAFSOON, D. M.; WICKS III, Z. Phosphorus concentration, uptake and dry matter yield of corn hybrids. **World Journal of Agricultural Sciences**, v.7, n.4, p. 418-24, 2011.

GONDIM, A. R. O.; PRADO, R. M.; ALVES, A. U.; FONSECA, I. M. Eficiência nutricional do milho cv. BRS 1030 submetido à omissão de macronutrientes em solução nutritiva. **Revista Ceres**, Viçosa, v.57, n.4, p. 539-544, 2010.

GONZALEZ, R. C. ; WOODS, R. E. **Digital Image Processing**. Addison-Wesley, 1993.

GONZALEZ, M.; BENITEZ, D.; SUAREZ, C. P. Segmentation and recognition in visual chromatic spaces, **Cybernetics Systems**, Washington, v.21, p.241-247, 1990.

GRANT, C. A.; FLATEN, D. N.; TOMASIEWICZ, D. J.; SHEPPARD, S. C. A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta. **Informações Agronômicas**, Potafos, Piracicaba, n. 95, 2001 (Encarte Técnico).

GRASSI FILHO, H. Diagnóstico foliar: princípios e aplicações. In: PRADO, R. M.; ROZANE, D. E.; VALE, D. W.; CORREIA, M. A. R.; SOUZA, H. A. (eds), **Nutrição de plantas: diagnóstico foliar em grandes culturas**. FCAV, Capes/Fundunesp. Jaboticabal. p.35-60. 2008.

HARGER, N.; BRITO, O. R.; RALISCH, R.; ORTIZ, F. R.; WATANABE, T. S. E. Avaliação de fontes e doses de fósforo no crescimento inicial do milho. **Ciências Agrárias**, Londrina, v.28, n.1, p.39-44, 2007.

HERNANDES, A. **Influência do manganês no crescimento e na composição mineral de mudas de caramboleiras**. 2009. 58p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista. Jaboticabal, 2009.

HOAGLAND, D.R.; ARNON, D. I. **The water culture method for growing plants without soils**. Berkeley: California Agricultural Experimental Station, 1950. 347p.

LANGE, A.; CARVALHO, J. L. N.; DAMIN, V.; CRUZ, J. C.; GUILHERME, L. R. G.; MARQUES, J. J. Doses de nitrogênio e de palha em sistema de plantio direto de milho no cerrado. **Revista Ceres**, Viçosa, v.53, n.306, p.171-178, 2006.

LAVRES JÚNIOR, J.; MONTEIRO, F. A. Perfilhamento, área foliar e sistema radicular do capim-Mombaça submetido a combinações de doses de nitrogênio e potássio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.32, n.5, p.1068-1075, 2003.

LAWLOR, D. W. Carbono and nitrogen assimilation in relation to yield: mechanisms are the key to understanding production systems. **Journal of Experiment Botany**, v. 53, p. 773-787, 2002.

LEITE, U. T.; AQUINO, B. F.; ROCHA, R. N. C.; SILVA, J. Níveis críticos de boro, cobre, manganês e zinco em milho. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.19, n.2, p.115-125, 2003.

LIM, Y. W.; LEE, S. U. On the color image segmentation algorithm based on the thresholding and the fuzzy c-means techniques, **Pattern Recognition**, Washington, v. 23, n.9, p.935-952, 1990.

LOUÉ, A. **The interaction of potassium with other growth factors, particularly with other nutrients**. Process 11th Congress International Potash Institute, Bern, p.407-434, 1978.

MAÇÃS, J. E. S. **Nitrogênio nítrico e amoniacal no desenvolvimento da parte aérea de milho cultivado em Argissolo**. 2008. 59f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

MACHADO, C. T. T. ; FURLANI, A. M. C.; MACHADO, A. T. Índices de eficiência de variedades locais e melhoradas de milho ao fósforo. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 3, p. 225-238, 2001.

MAGGIO, M. A. **Acúmulo de massa seca e extração de nutrientes por plantas de milho doce híbrido "tropical"**. 2006, 56f. Dissertação (Mestrado). Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, 2006.

MALAVOLTA, E.; CROCOMO, O. J. O potássio e a planta. In: POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, Londrina, 1982. **Anais**, Piracicaba, Instituto Da Potassa e Fosfato: Institute Internacional da Potassa, p.95-162, 1982.

MALAVOLTA, E.; DANTAS, J. P. Nutrição e adubação do milho. In: PATERNIANI, E; VIEGAS, G. P., ed. **Melhoramento e produção do milho**. 2.ed. Campinas, Fundação Cargill, v.2. p.541-93. 1987.

MALAVOLTA, E. **Abc da adubação**. 5. ed. São Paulo, SP: Ceres, 1989. 292 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989. 201p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas. Princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição de plantas**. São Paulo, ed. Agronômica Ceres, 2006, p.571, 638p.

MAR, G. D.; MARCHETTI, M. E.; SOUZA, L. C. F.; GONÇALVES, M. C.; NOVELINO, J. O. Produção do milho safrinha em função de doses e épocas de aplicação de nitrogênio. **Bragantia**, Campinas, v.62, n.2, p.267-274, 2003.

MARIN, M. A. **Sistema de visão artificial para diagnose nutricional de ferro, boro, zinco e cobre em plantas de milho**. 2012. 129f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo. Pirassununga, 2012.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic Press, 1986. 647p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press, 1995. 889 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 6th ed. London: Academic Press, 2005.

MARTINEZ, H. E. P.; CARVALHO, J. G.; SOUZA, R. B. Diagnose foliar. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V., V. H. (Eds). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5ª Aproximação. Viçosa: Comissão de Fertilidade do solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p.143-168.

MATTOS, W. T. de; SANTOS, A. R. dos; ALMEIDA, A. A. da S.; CARREIRO, B. D. C.; MONTEIRO, F. A. **Aspectos produtivos e diagnose nutricional do capim-tanzânia submetido a doses de potássio**. **Magistra**, Cruz das Almas, v.14, n.1, p.37-44, 2002.

McDONALD, T.; CHEN, Y. R. Application of morphological image processing in agriculture. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.33, n.4, p.1345-1352, 1990.

MEGDA, M. M.; MONTEIRO, F. A. Nitrogen and potassium supply and the morphogenic and productive characteristics of marandu palisadegrass. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.39, n.8, p.1666-1675, 2010.

MENGEL, K; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. Bem: Intern. Postash Institute, 1987. 687 p.

MINGOTTE, F. L. C.; SANTOS, C. L. R. dos; PRADO, R. M.; FLORES, R. A.; TOGORO, A. H.; SILVA, J. A. S. da; POLITI, L. S.; PINTO, A. S.; AQUINO, D. S. Manganês na nutrição e na produção de massa seca do capim-mombaça. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.27, n.6, p.879-887, 2011.

MONDO, V. H. V.; CICERO, S. M. Análise de imagens na avaliação da qualidade de sementes de milho localizadas em diferentes posições na espiga. **Revista Brasileira de Sementes**, Pelotas, v.27, n.1, p.9-18, 2005.

MONTEIRO, F. A.; LIMA, S. A. A.; WERNER, J. C. Adubação potássica em leguminosas e em capim-colonião (*Panicum maximum* Jacq.) adubado com níveis de nitrogênio ou consorciado com leguminosas. **Boletim de Indústria Animal**, Nova Odessa, v.37, n.1, p.127-147, 1980.

MONTEIRO, F. A.; RAMOS, A. K. B.; CARVALHO, D. D. de; ABREU, J. B. R. de; DAIUB, J. A. S.; SILVA, J. E. P.; NATALE, W. Cultivo de *Brachiaria brizantha* Stapf. cv. Marandu em solução nutritiva com omissões de macronutrientes. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.52, n.1, p.135-141, 1995.

MONTEIRO, F. A.; COLOZZA, M. T.; 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: FEALQ, 2004. p.279-301.

MONTEIRO, F. A.; CONSOLMAGNO NETO, D. Sistema radicular do capim-tanzânia adubado com potássio e magnésio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.37, n.5, p.810-818, 2008.

MOREIRA, J. **Uma proposta de estruturação e integração de processamento de cores em sistemas artificiais de visão**. Tese (Doutorado), Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.

MOURA, W. de M.; CASALI, V. W. D.; CRUZ, C. D. Genetic divergence of phosphorus nutritional efficiency in sweet pepper lines. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n.2, p.217-224, 1999.

MULLINS, G. L.; BURMESTER, C. H. Potassium uptake by crops during the season. In: OOSTERHUTS, D. M.; BERKOWITZ, G. A. **Frontier in potassium nutrition: new perspectives on the effect of potassium on crop plant physiology**. BERN: Potash e Phosphate Institute, p.123-141, 1996.

NOGUEIRA-JÚNIOR., S.; NOGUEIRA, E. A.; TSUNECHIRO, A. **Considerações sobre a agroindústria do milho**. São Paulo: Instituto de Economia Agrícola, 1987. 18p. (IEA Relatório de Pesquisa, 27).

OLIVEIRA, F. A.; CARMELLO, Q. A. C.; MASCARENHAS, H. A. A. Disponibilidade de potássio e suas relações com cálcio e magnésio em soja cultivada em casa-de-vegetação. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 2, p. 329-335, 2001.

OLIVEIRA, P. P. A.; MARCHESIN, W.; LUZ, P. H. C.; HERLING, V. R. **Guia de identificação de deficiências nutricionais em *Brachiaria brizantha* cv. Marandu**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2007, p.1-38 (Comunicado Técnico, 76).

OLNESS, A.; BENOIT, G. R. A closer look at corn nutrient demand. **Better Crops with Plant Food**, Norcross, v.76, n.2, p.18-20, 1992.

PAULA, L. K. et al. Cultivo de milho (BRS 1501) em solução nutritiva com omissão de macronutrientes. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 5., 2000, Taubaté. **Resumos...** Taubaté: Universidade de Taubaté, 2000.

PEREIRA, W. L. M. **Doses de potássio e de magnésio em solução nutritiva para capim-mombaça**. 2001. 124f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

PEREIRA, G. D.; BERTONI, J. C.; CARVALHO, J. G.; MORAIS, A. R. Doses e modos de adubação com manganês e seus efeitos na produção da cultura do arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa**, v.25, n.3, p.625-633, 2001.

PINAZZA, L. A. Perspectivas da cultura do milho e do sorgo no Brasil. In: BÜLL, L. T.; CANTARELLA, H. **Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: POTAFOS, p.1-10. 1993.

PINHO, R. A. V.; BORGES I. D.; PEREIRA, J. L. A. R.; REIS, M. C. Marcha de absorção de macronutrientes e acúmulo de matéria seca em milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.8, n.2, p.157-173, 2009.

PLOTZE, R. O. Identificação de espécies vegetais através da análise da forma interna de órgãos foliares. 2014. 152f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

PRADO, R. M.; FRANCO, C. F. Omissão de nutrientes no crescimento, na nutrição e nos sintomas visuais de plantas de milho variedade Al-Bandeirante. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v.82, p.84-97, 2007.

PRADO, R. M.; VIDAL, A. A. Efeitos da omissão de macronutrientes em solução nutritiva sobre o crescimento e a nutrição do milho. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.38, n.3, p.208-214, 2008.

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; CANTARELLA, H. Milho para grãos e silagem. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. (Boletim Técnico, 100). Campinas: Instituto Agrônomo, p.56-59, 1996.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Boletim Técnico 100**. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1997. 285p.

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.

ROZANE, D. E.; PRADO, R. M.; ROMUALDO, L. M. Deficiências de macronutrientes no estado nutricional da aveia preta cultivar comum. **Científica**, Jaboticabal, v.3, p.116-122, 2008.

SÁVIO, F. L.; FARIA, P. N.; PEREIRA, W. A.; OLIVEIRA, A. B. de; TARDIN, F. D.; RODRIGUES, J. A. S.; SCHAFFERT, R. E. Divergências genética em híbridos de sorgo cultivados sob diferentes níveis de fósforo, em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.7, n.3, p.305-321, 2008.

SILVA, S. H. M. G. DA. **Processamento digital de imagens para identificação da sigatoka negra em bananais utilizando análise de componentes principais e redes neurais artificiais**. 2008. 83f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2008.

SILVA, F. F. **Sistema de visão artificial para identificação da nutrição de milho submetido a níveis de cálcio, magnésio e enxofre**. 2011. 143f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo. Pirassununga, 2011.

SENA JUNIOR, D. G.; PINTO, F. A. C.; QUEIROZ, D. M. Algorithm for classification of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*, Smith) damaged corn plants on digital images. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.3, p.502 – 509, 2001.

SENA JÚNIOR, D. G.; PINTO, F. A. C.; GOMIDE, L. A.; TEIXEIRA, M. M. Avaliação de métodos automáticos de limiarização para imagens de plantas de milho atacadas por *Spodoptera frugiperda*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.2, p.359 – 366, 2003.

SENA JÚNIOR, D. G.; PINTO, F. A. C.; QUEIROZ, D. M.; SANTOS, N. T.; KHROURY JÚNIOR, J. K. Discriminação entre estágios nutricionais na cultura do trigo com técnicas de visão artificial e medidor portátil de clorofila. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.1, p.187-195, 2008.

SILVA JÚNIOR, M. C.; PINTO, F. A. C.; QUEIROZ, D. M.; GÓMEZ, J. G.; NAVAS, L. M. G. Weed mapping using a machine vision system. **Plantas Daninhas**, Viçosa, v.30, n.1, p.217-227, 2012.

SCHRÖDER, J. J. et al. Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? Reviewing the state of art. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.66, n.1, p.151-164, 2000.

SCHREIBER, H. A.; STANBERRY, C. O.; TUCKER, H. Irrigation and nitrogen effects on sweet corn row number at various growth stages. **Science**, New York, v.135, p.135-136, 1988.

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.

SPÓSITO, M. B.; AMORIM, L.; AQUINO, J. B. J.; BASSANEZI, R. B.; AQUINO, R. Elaboração e validação de escala diagramática para avaliação da severidade da mancha preta em frutos cítricos. **Fitopatologia Brasileira**, v.29, n.1, p.81-85, 2004.

STRICKER, M.; ORENGO, M. **Similarity of color images**. In: Process SPIE Storage and Retrieval, for Image and Video Databases, 1995.

STUKENHOLTZ, D. P.; OLSEN, R. J.; GOGAN, G.; OLSON, R. A. On the mechanism of phosphorus-zinc interaction in corn nutrition. **Soil Science Society of America Proceeding**, Madison, v.30, p.759-763, 1966.

SWAIN, M.; BALLARD, D. Color indexing. **International Journal of Computer Vision**, v. 7, n.1, p. 11-32, 1991.

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**, Londrina, v.28, n.2, p.56-61, 2006.

TEIXEIRA, E. F.; NETO, D. D.; CÍCERO, S. M.; MARTIN, T. N. Análise da uniformidade de sementes de milho via processamento de imagens digitais. **Revista da FZVA**, Uruguaiiana, v.14, n.1, p.14 – 24, 2007.

USHERWOOD, N. R. Interação do potássio com outros íons. In: YAMADA, T. et al. **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba, SP: Instituto da Potassa e Fosfato: Instituto Internacional da Potassa, p.227 – 235, 1982.

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.

VASCONCELLOS, C. A.; BARBOSA, J. V. A.; SANTOS, H. L. dos; FRANÇA, G. E. de. Acumulação de massa seca e de nutrientes por dois híbridos de milho com e sem irrigação suplementar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.18, n.8, p.887- 901, 1983.

VALE, D. W.; PRADO, R. M.; SOUZA, H. A.; MARTINS, A. B. G. Doses de nitrogênio, fósforo e potássio na nutrição do porta-enxerto cítrico de limoeiro ‘Cravo’. **Scientia Agrária**, Curitiba, v.10, n.1, p.061-066, 2009.

VELOSO, C. A. C.; MURAOKA, T.; MALAVOLTA, E.; CARVALHO, J. G. de. Influência do manganês sobre a nutrição mineral e crescimento da pimenteira do reino. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.52, n.2, p.376-383, 1995.

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.

VIEIRA JUNIOR, P. A. **Emprego da técnica de análise de imagens na determinação do comprimento e da largura de sementes de milho.** 1998. 153f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1998.

VOOREN, J. G.; HEIJDEN, G. W. A. M. Measuring the size of french beans with image analysis. **Plant Varieties and Seeds**, v.6, n.47, p.47-53, 1993.

VYN, T. J.; JANOVICEK, K. J. Potassium placement and tillage system effects on corn response following longterm no till. **Agronomy Journal**, v.93, p.487-495, 2001.

WANG, J. J. Kinetics of manganese uptake by excised roots of sensitive and tolerant tobacco genotypes. **Journal Plant Nutrition**, Philadelphia, v.26, p.1439-1450, 2003.

WERNER, J. C., PAULINO, V. T., CANTARELLA, H., ANDRADE, N. O.; QUAGGIO, J. A. Forrageiras. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. (2ª ed. rev. atual.). Campinas, IAC, 1997. p. 261-273. (Boletim técnico, 100).

YAMADA, Y. Melhoria na eficiência da adubação aproveitando as interações entre os nutrientes. **Informações Agronômicas**, Potafos, Piracicaba, n.100, 2002 (Encarte Técnico).

YOST, M. A.; RUSSELLE, M. P.; COULTER J. A.; KING, R.P.; SHEAFFER, C.C.; KAISER, D. E. Potassium management during the rotation from alfafa to corn. **Agronomy Journal**, Madison, v.103, n.6, p.1785-1793.

ZAMBOLIM, L.; VENTURA, J. A. Resistência a doenças induzidas pela nutrição mineral de plantas. **Informações Agronômicas**, Potafos, Piracicaba, n.75, 1996 (Encarte Técnico).

ZANÃO JÚNIOR, L. A.; FONTES, R. L. F.; ÁVILA, V. T.; KORNDÖRFER, G. H. Absorção de cálcio e ferro por arroz cultivado em solução nutritiva com doses de silício e manganês. **Scientia Agrária**, Curitiba, v.11, n.3, p.263-269, 2010.

ZÚÑIGA, A. M. G. **Sistema de visão artificial para identificação do estado nutricional de plantas.** 2012. 142f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2012.

APÊNDICE

ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS VARIÁVEIS BIOMÉTRICAS E MASSA SECA
DA PARTE AÉREA E RAÍZES DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS EM CASA DE
VEGETAÇÃO

ANÁLISE DE SOLO NAS PARCELAS EXPERIMENTAIS APÓS A COLHEITA
DO MILHO

Tabela 1 - Valor de F dos resultados da análise de variância referente às variáveis biométricas (diâmetro do colmo, altura da planta e número total de folhas), massa seca da parte aérea e raiz das plantas de milho submetidas das às doses de nitrogênio e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento

Causa de variação	Diâmetro do colmo	Altura	Número total de folhas	Massa seca	
				Parte aérea	Raiz
Doses (D)	cm			g.planta ⁻¹	
0 (D1)	0,22 ^d	17,46 ^b	7,0 ^b	0,41 ^c	0,36 ^c
42 (D2)	1,08 ^c	97,26 ^a	13,0 ^a	24,13 ^b	9,23 ^b
84 (D3)	1,28 ^b	98,11 ^a	13,0 ^a	24,55 ^b	9,49 ^b
210 (D4)	1,48 ^a	99,92 ^a	13,0 ^a	32,53 ^a	11,66 ^a
Teste F	449,64 ^{**}	782,32 ^{**}	958,29 ^{**}	242,93 ^{**}	257,99 ^{**}
Épocas (E)					
V4 (E1)	0,68 ^b	30,14 ^c	7,0 ^c	1,79 ^c	0,65 ^c
V7 (E2)	1,20 ^a	80,61 ^b	12,0 ^b	16,41 ^b	7,00 ^b
R1 (E3)	1,16 ^a	123,82 ^a	15,0 ^a	43,03 ^a	15,40 ^a
Teste F	167,92 ^{**}	1397,88 ^{**}	2083,94 ^{**}	734,99 ^{**}	751,43 ^{**}
Interação					
D X E	26,21 ^{**}	171,62 ^{**}	32,18 ^{**}	87,19 ^{**}	88,71 ^{**}
Desdobramentos					
Época dentro de D1	7,66 ^{**}	0,07 ^{ns}	211,76 ^{**}	0,02 ^{ns}	0,02 ^{ns}
Época dentro de D2	47,29 ^{**}	786,85 ^{**}	652,94 ^{**}	347,20 ^{**}	276,05 ^{**}
Época dentro de D3	69,27 ^{**}	646,94 ^{**}	652,94 ^{**}	238,37 ^{**}	265,38 ^{**}
Época dentro de D4	122,32 ^{**}	478,87 ^{**}	662,82 ^{**}	410,96 ^{**}	476,12 ^{**}
Dose dentro de E1	51,83 ^{**}	13,53 ^{**}	135,53 ^{**}	0,48 ^{ns}	0,24 ^{ns}
Dose dentro de E2	297,08 ^{**}	305,95 ^{**}	378,36 ^{**}	64,74 ^{**}	68,35 ^{**}
Dose dentro de E3	153,15 ^{**}	806,08 ^{**}	508,76 ^{**}	352,06 ^{**}	366,82 ^{**}
CV(%)	8,9	6,4	3,1	15	14

Tabela 2 - Valor de F dos resultados da análise de variância referente às variáveis biométricas (diâmetro do colmo, altura da planta e número total de folhas), massa seca da parte aérea e raiz das plantas de milho submetidas às doses de potássio e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento

Causa de variação	Diâmetro do colmo	Altura	Número total de folhas	Massa seca	
	cm	cm		g.planta ⁻¹	
				Parte aérea	Raiz
Doses (D)					
mg/L					
0 (D1)	1,17 ^c	69,81 ^b	12,0 ^b	24,53 ^c	4,50 ^d
47 (D2)	1,38 ^{ab}	79,48 ^a	13,0 ^a	36,19 ^{ab}	5,70 ^c
94 (D3)	1,36 ^b	84,69 ^a	13,0 ^a	34,10 ^b	6,89 ^b
235 (D4)	1,48 ^a	84,96 ^a	13,0 ^a	38,73 ^a	9,20 ^a
Teste F	19,71 ^{**}	11,56 ^{**}	3,74 [*]	49,91 ^{**}	100,47 ^{**}
Épocas (E)					
V4 (E1)	0,82 ^c	15,32 ^c	8,0 ^c	1,48 ^c	0,57 ^c
V7 (E2)	1,67 ^a	48,67 ^b	12,0 ^b	19,10 ^b	3,50 ^b
R1 (E3)	1,56 ^b	175,22 ^a	17,0 ^a	79,58 ^a	15,62 ^a
Teste F	319,16 ^{**}	2186,12 ^{**}	1139,74 ^{**}	2904,45 ^{**}	2103,58 ^{**}
Interação					
D X E	4,38 ^{**}	5,62 ^{**}	3,74 ^{**}	24,11 ^{**}	73,45 ^{**}
Desdobramentos					
Época dentro de D1	43,66 ^{**}	403,10 ^{**}	275,67 ^{**}	397,82 ^{**}	214,01 ^{**}
Época dentro de D2	78,87 ^{**}	559,62 ^{**}	315,09 ^{**}	903,13 ^{**}	338,35 ^{**}
Época dentro de D3	81,79 ^{**}	600,95 ^{**}	280,11 ^{**}	754,19 ^{**}	608,24 ^{**}
Época dentro de D4	127,93 ^{**}	639,31 ^{**}	280,11 ^{**}	921,64 ^{**}	1163,33 ^{**}
Dose dentro de E1	0,38 ^{ns}	0,061 ^{ns}	0,94 ^{ns}	0,005 ^{ns}	0,039 ^{ns}
Dose dentro de E2	21,06 ^{**}	2,94 [*]	9,94 ^{**}	9,26 ^{**}	4,52 ^{**}
Dose dentro de E3	7,03 ^{**}	19,79 ^{**}	0,34 ^{ns}	88,87 ^{**}	242,80 ^{**}
CV(%)	7,6	9,0	4,0	9,0	10

Tabela 3 - Valor de F dos resultados da análise de variância referente às variáveis biométricas (diâmetro do colmo, altura da planta e número total de folhas), massa seca da parte aérea e raiz das plantas de milho submetidas às doses de fósforo e avaliadas em diferentes épocas de desenvolvimento

Causa de variação	Diâmetro do colmo	Altura	Número total de folhas	Massa seca	
	cm	cm		g.planta ⁻¹	
				Parte aérea	Raiz
Doses (D)					
mg/L					
0 (D1)	0,70 ^c	17,46 ^c	7,0 ^c	0,88 ^d	0,35 ^b
6,2 (D2)	1,56 ^{ab}	97,26 ^a	11,0 ^b	37,20 ^c	9,29 ^a
12,4 (D3)	1,67 ^b	98,11 ^a	11,0 ^b	44,07 ^b	8,60 ^a
31,0 (D4)	1,73 ^a	99,92 ^a	12,0 ^a	50,76 ^a	8,80 ^a
Teste F	205,72 ^{**}	1383,19 ^{**}	833,73 ^{**}	517,13 ^{**}	346,17 ^{**}
Épocas (E)					
V4 (E1)	0,72 ^c	15,90 ^c	7,0 ^c	2,47 ^c	0,80 ^c
V7 (E2)	1,49 ^b	41,89 ^b	10,0 ^b	20,56 ^b	4,06 ^b
R1 (E3)	2,04 ^a	136,09 ^a	14,0 ^a	76,65 ^a	15,42 ^a
Teste F	518,42 ^{**}	4895,74 ^{**}	2430,82 ^{**}	2080,70 ^{**}	1482,05 ^{**}
Interação					
D X E	33,90 ^{**}	571,70 ^{**}	183,55 ^{**}	257,35 ^{**}	169,65 ^{**}
Desdobramentos					
Época dentro de D1	161,72 ^{**}	0,96 ^{ns}	22,90 ^{**}	0,002 ^{ns}	0,04 ^{ns}
Época dentro de D2	125,78 ^{**}	2102,87 ^{**}	946,90 ^{**}	608,66 ^{**}	653,39 ^{**}
Época dentro de D3	156,80 ^{**}	2238,21 ^{**}	946,90 ^{**}	870,18 ^{**}	620,88 ^{**}
Época dentro de D4	175,82 ^{**}	2268,80 ^{**}	1064,72 ^{**}	1373,90 ^{**}	716,70 ^{**}
Dose dentro de E1	17,89 ^{**}	7,68 ^{**}	13,09 ^{**}	0,44 ^{ns}	0,44 ^{ns}
Dose dentro de E2	222,09 ^{**}	175,59 ^{**}	257,45 ^{**}	61,07 ^{**}	41,30 ^{**}
Dose dentro de E3	33,54 ^{**}	2343,32 ^{**}	930,27 ^{**}	970,31 ^{**}	643,73 ^{**}
CV(%)	8,2	5,6	2,7	10,2	11,8

Tabela 4 - Análise química do solo, realizada em agosto de 2011, após a colheita dos grãos nas parcelas experimentais, nas profundidades de 0-20 cm (Média de cinco repetições)

Tratamentos	pH CaCl ₂	M.O.	P resina	S	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	T	V	B	Cu	Fe	Mn	Zn
		<i>g dm⁻³</i>	<i>---mg dm⁻³---</i>					<i>-----mmol_c dm⁻³-----</i>					<i>%</i>		<i>-----mg dm⁻³-----</i>		
Todos os nutrientes	5,6	30	12	7	2,8	21	9	21	TR	33	54	61	0,32	1,1	25	3,7	1,0
Sem Manganês	5,5	28	11	10	2,4	22	10	20	TR	35	55	63	0,48	0,5	19	3,0	0,6
Sem Nitrogênio	5,5	26	12	8	2,5	22	9	20	TR	33	53	63	0,47	0,8	16	3,1	0,6
Sem Potássio	5,4	28	12	10	0,8	22	10	19	TR	32	51	63	0,52	1,3	20	4,5	1,2
Sem Fósforo	5,2	31	7	8	1,1	21	9	19	TR	31	50	63	0,52	1,0	19	4,6	1,1

Tabela 5 - Análise química do solo, realizada em agosto de 2011, após a colheita dos grãos nas parcelas experimentais, nas profundidades de 20-40 cm (Média de cinco repetições)

Tratamentos	pH CaCl ₂	M.O.	P resina	S	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	T	V	B	Cu	Fe	Mn	Zn
		<i>g dm⁻³</i>	<i>---mg dm⁻³---</i>					<i>-----mmol_c dm⁻³-----</i>					<i>%</i>		<i>-----mg dm⁻³-----</i>		
Todos os nutrientes	5,3	24	11	8	2,5	20	8	24	TR	30	54	55	0,27	1,1	26	3,6	0,9
Sem Manganês	5,3	24	9	9	1,6	21	9	23	TR	31	54	57	0,48	0,7	17	2,1	0,5
Sem Nitrogênio	5,2	23	11	10	2,1	20	9	23	TR	31	54	57	0,46	0,9	15	2,5	0,7
Sem Potássio	5,1	26	7	7	0,7	20	9	23	TR	29	52	56	0,46	1,2	20	3,9	0,8
Sem Fósforo	5,1	26	6	7	0,7	19	8	22	TR	28	50	56	0,45	1,2	17	3,9	0,7