UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS

MÁRIO ANTONIO MARIN

**Sistema de visão artificial para a diagnose nutricional de ferro,
boro, zinco e cobre em plantas de milho**

Pirassununga-SP

2012

MÁRIO ANTONIO MARIN

**Sistema de visão artificial para a diagnose nutricional de ferro,
boro, zinco e cobre em plantas de milho**

“Versão Corrigida”

Dissertação apresentada à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Zootecnia.

Área de Concentração: Qualidade e Produtividade Animal

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique de Cerqueira Luz

Pirassununga-SP

2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

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

M337s	<p>Marin, Mário Antonio</p> <p>Sistema de visão artificial para diagnose nutricional de ferro, boro, zinco e cobre em plantas de milho / Mário Antonio Marin. -- Pirassununga, 2012. 127 f.</p> <p>Dissertação (Mestrado) -- Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos - Universidade de São Paulo. Departamento de Zootecnia.</p> <p>Área de Concentração: Qualidade e Produtividade Animal.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique de Cerqueira Luz.</p> <p>1. Nutrição mineral 2. <i>Zea mays</i> 3. Diagnose foliar 4. Sistema de visão artificial. I. Título.</p>
-------	--

Dedicatória

A minha amada esposa, Aline, sempre ao meu lado me ajudando a superar os desafios.

A meus pais, Sonia e João, por forjarem o meu caráter através da educação, dos bons princípios, dos estudos e da ciência.

Ao meu irmão, João Henrique, que desde cedo me ensinou a terminar aquilo que se começa.

A meu avô Mário (in memoriam), por me incentivar a estudar.

A alguém que um dia me disse: “Não importa o que, mas continue estudando”.

A todos os professores, acadêmicos ou não, que eu tive ao longo da minha vida.

Agradecimentos

Ao professor Dr. Pedro Henrique de Cerqueira Luz, por sua orientação, compreensão e por sua transmissão clara de conhecimentos ao longo do período de elaboração desse trabalho contribuindo para o meu crescimento intelectual e científico.

Aos meus amigos e colegas de estudo, que me ajudaram em todas as etapas desse trabalho, Liliane, Fernanda, Mariana, Celso, e ao professor Dr. Valdo R. Herling.

À FAPESP pela concessão do auxílio pesquisa, o qual sem ele seria impossível à realização desse trabalho.

Aos funcionários e estagiários do laboratório de Ciências Agrárias da FZEA-USP, especialmente ao Marquinhos, ao Paulo, a Lorena, ao Leonardo e ao Uanderson, por sua dedicação em todos os processos analíticos realizados.

À equipe do IFSC-USP, pelas análises de visão artificial realizadas com esmero e agilidade.

“A terra é a mãe de todos nós – plantas, animais e homens. O fósforo e o cálcio da terra constroem nossos esqueletos e sistema nervoso. Tudo o que os nossos corpos necessitam, exceto ar e sol, vem da terra”.

Henry Wallace

RESUMO

MARIN, M.A. **Sistema de visão artificial para a diagnose nutricional de ferro, boro, zinco e cobre em plantas de milho.** 2012. 127 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2012.

A pesquisa visou avaliar a metodologia do projeto Tree Vis para determinar a nutrição de ferro, boro, zinco e cobre em plantas de milho submetidas a doses desses nutrientes. Foram utilizados tratamentos constituídos pela omissão, 1/5, 2/5 e a dose completa dos elementos com quatro repetições em cada fase de coleta, sendo essas V4, V7 e R1. Os experimentos foram realizados em casa de vegetação, em cultivo hidropônico, conduzidos em vasos com solução nutritiva. Foi determinada a produção de massa seca da parte aérea e do sistema radicular, além da determinação dos teores dos nutrientes nas folhas indicativas dos estádios fenológicos de cada época de coleta. Em cada estágio foram coletadas imagens das folhas indicativas e novas através de um scanner para as análises de visão artificial. As doses crescentes dos nutrientes promoveram maior produção de massa seca na parte aérea e nas raízes e reduziram a produção quando utilizada a dose máxima do nutriente. O sistema de visão artificial mostrou-se promissor na identificação de deficiência de ferro com 77,5% de acerto, boro com 81,7% de acerto, zinco com 81,0% e cobre com 57,2 % de acerto, tendo identificado as com boa confiabilidade.

Palavras-chave: diagnose foliar, nutrição mineral, sistema de visão artificial, *Zea mays*.

ABSTRACT

MARIN, M.A. **Artificial vision system for the nutritional diagnosis of iron, boron, zinc and copper in maize plants.** 2012. 127 f. M.Sc. Dissertation – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2012.

The research aimed to evaluate the methodology of the Project Tree Vis for determining nutrition iron, boron, zinc and copper in maize plants subjected to doses of these nutrients. Treatments used were made by omission, 1/5, 2/5 and the full dose of the elements with four replicates at each stage of collection, these are V4, V7 and R1. The experiments were conducted in a greenhouse in hydroponics, conducted in pots with nutrient solution. Was determined the dry mass production of the aerial part and roots, besides the determination of nutritional content in the leaves indicative of phenological stages of each harvest time. At each stage were collected images of indicative and new leaves through with a scanner for the analyzes of artificial vision. The increasing doses of nutrients promoted higher dry mass production in the aerial part and roots and reduced the production when using the highest dose of the nutrient. The artificial vision system showed promise in identifying of deficiency of iron with 77.5% accuracy, of boron with 81.7% of correct, of zinc with 81.0% accuracy and copper with 57.2% accuracy, with a good reliability in the identifi.

Keywords: leaf diagnosis, mineral nutrition, artificial vision system, *Zea mays*.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1	Importância nacional do milho	11
2.2	O milho	12
2.2.1	História	12
2.2.2	A planta	12
2.3	Nutrição mineral do milho	15
2.3.1	Estudo dos nutrientes boro, ferro, cobre e zinco	18
2.3.1.1	Boro	18
2.3.1.2	Ferro	20
2.3.1.3	Cobre	21
2.3.1.4	Zinco	22
2.3.2	Avaliação do estado nutricional das plantas	23
2.3.2.1	Diagnose visual	24
2.3.2.2	Diagnose foliar	24
2.3.2.2.1	Nível crítico	25
2.3.2.2.2	Faixa de suficiência	25
2.3.2.2.3	Métodos para auxiliar na interpretação da diagnose foliar	26
2.3.2.3	Outros métodos para avaliar a nutrição vegetal	27
2.3.3	Interações entre os nutrientes	29
2.4	Sistema de visão artificial (SVA)	30
2.4.1	Sistema de visão artificial (SVA) para a identificação do estado nutricional do milho	31
2.4.2	O projeto tree vision system (Tree Vis)	31
2.5	Objetivos	32
3	MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1	Local dos experimentos	33
3.2	Descrição do protocolo experimental	33
3.2.1	Experimento do ferro	36
3.2.2	Experimento do boro	37
3.2.3	Experimento do zinco	38
3.2.4	Experimento do cobre	40
3.3	Coleta de imagem para o sistema de visão artificial (SVA)	42
3.4	Avaliações do material vegetal	43
3.4.1	Variáveis biométricas da planta	43
3.4.2	Análises químicas	44
3.4.3	Acúmulo de nutrientes	44
3.4.4	O sistema de visão artificial (SVA)	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	Ferro	49
4.1.1	Sintomas visuais de deficiência	49
4.1.2	Parâmetros de crescimento da planta	50
4.1.3	Relação entre ferro, manganês e zinco	52
4.1.3.1	Teores na folha indicativa de desenvolvimento do milho	52
4.1.3.2	Acúmulo de ferro, manganês e zinco na parte aérea e nas raízes	55
4.1.4	Sistema de visão artificial (SVA) na identificação nutricional do milho em relação ao ferro	60
4.2	Boro	65
4.2.1	Sintomas visuais de deficiência	65

4.2.2	Parâmetros de crescimento da planta	67
4.2.3	Relação entre boro, cálcio e zinco.....	69
4.2.3.1	Teores na folha indicativa de desenvolvimento do milho.....	69
4.2.3.2	Acúmulo de boro, cálcio e zinco na parte aérea e nas raízes	73
4.2.4	Sistema de visão artificial (sva) na identificação nutricional do milho em relação ao boro.....	79
4.3	Zinco	83
4.3.1	Sintomas visuais de deficiência	83
4.3.2	Parâmetros de crescimento da planta	85
4.3.3	Relação entre zinco, fósforo e manganês	87
4.3.3.1	Teores na folha indicativa de desenvolvimento do milho.....	87
4.3.3.2	Acúmulo de zinco, fósforo e manganês na parte aérea e nas raízes.....	91
4.3.4	Sistema de visão artificial (SVA) na identificação nutricional do milho em relação ao zinco.....	97
4.4	Cobre	101
4.4.1	Sintomas visuais de deficiência	101
4.4.2	Parâmetros de crescimento da planta	102
4.4.3	Relação entre cobre, cálcio e zinco	104
4.4.3.1	Teores na folha indicativa de desenvolvimento do milho.....	104
4.4.3.2	Acúmulo de cobre, cálcio e zinco na parte aérea e nas raízes.....	108
4.4.4	Sistema de visão artificial (SVA) na identificação nutricional do milho em relação ao cobre.....	113
5	CONCLUSÕES	117
5.1	Ferro	117
5.2	Boro	117
5.3	Zinco.....	117
5.4	Cobre.....	117
	REFERÊNCIAS.....	119

1 INTRODUÇÃO

O início da atividade agropastoril remonta ao princípio da própria civilização humana, a consolidação da agricultura e da pecuária mudou de forma impar a forma de vida do ser humano levando-o de nômades para sedentários dando origem ou nosso atual modelo de vida.

Com a evolução da agricultura o homem passou a ter a sua disposição mais alimento do que ele precisava para se manter e isso possibilitou o armazenamento de provisões para momentos de escassez, possibilitando aumento da população de forma exponencial, visto que, a população humana há 10 mil anos a.C. no período paleolítico era de aproximadamente 5 milhões de indivíduos e com o advento da agropecuária em cinco mil anos já alcançava 100 milhões de pessoa e no início da civilização ocidental no século I atingiu 300 milhões de seres humanos, tudo isso, graças à domesticação de plantas e animais o que possibilitou uma vida sedentária e com isso o desenvolvimento de novas técnicas e tecnologias para melhorar a qualidade de vida das pessoas (COTRIN, 2002).

A realidade atual superou muito esses números. Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU) (2012) a população mundial já supera sete bilhões de pessoas e segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2010), no Brasil já há mais de 190 milhões de brasileiros. Para atender a crescente demanda por alimento, fibras e fontes de energia renováveis a agricultura vem expandindo em área, nos países que isso ainda é possível e buscando aumento de produtividade, principalmente nos países que não há mais áreas para a expansão. Esse aumento de produtividade se deve em grande parte ao desenvolvimento de novas pesquisas em diversos ramos, como em melhoramento genético, controle de pragas e doenças, mecanização e nutrição mineral de plantas, este ultimo item reconhecidamente um dos ramos científicos de maior importância para o aumento da produtividade das principais culturas agrícolas.

Dento da agricultura mundial destaca-se a produção de grãos com 2,2 bilhões de toneladas por ano e entre eles o mais produzido é o milho com 791 milhões de toneladas, seguido pelo trigo, o arroz e a soja, com 609, 433, 221 milhões de toneladas, respectivamente (BRANDALIZZE, 2009).

A demanda mundial por grãos vem crescendo em virtude do aumento da população, a ascensão econômica de uma fatia da população de países pobres ou emergentes, como a China e Índia, que saem da pobreza para a linha de consumidores de alimentos, atualmente essa parcela da população supera a marca de 100 milhões de pessoas por ano.

Já o aumento da procura por milho cresce em duas frentes, a principal para o setor de ração, visto que o milho é o principal componente da alimentação de aves, suínos e bovinos, e a segunda frente vem do setor de energia limpa, ou renovável, como a produção de etanol, que tem como principal produtor e consumidor os Estados Unidos da América, que avançou forte e caminha nesta linha nos próximos anos, porque os americanos buscam alternativas para diminuir a dependência externa de petróleo e tentam fugir de fornecedores instáveis politicamente (BRANDALIZZE, 2009).

O milho é uma das culturas mais exigentes em fertilizantes. O suprimento inadequado de nutrientes é considerado um dos fatores limitantes ao rendimento de grãos, desta forma, deve-se manter a planta sempre bem nutrida (RAMBO et al., 2004).

Para o milho, em sistemas mais tecnificados, os gastos com correção do solo e adubação representam, em média, 40 a 45% do custo de produção (COELHO; ALVES, 2003). Portanto, há necessidade de se estimar corretamente a quantidade de fertilizante que deve ser aplicada no solo, com o intuito de satisfazer as necessidades da cultura (BAESSO et al., 2007). Nos últimos anos a atividade agrícola tem sofrido profundas modificações em razão do aumento do custo de produção com reflexos na rentabilidade da cultura, especialmente em grãos como o milho. A adubação é reconhecidamente o fator que mais afeta a produtividade e a sustentabilidade da atividade, de modo que o consumo de adubo pela cultura do milho tem crescido acentuadamente nos últimos anos no Brasil, em função do aumento por unidade de área (ARAÚJO et al., 2008).

Para evitar perdas e, conseqüentemente, aumento do custo de produção do milho em função da adubação, faz-se necessário o constante aprimoramento dos métodos de recomendação e aplicação de fertilizantes e corretivos da fertilidade do solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância nacional do milho

No Brasil, o crescimento da demanda por esse cereal tem como principal fator o crescimento da população e a entrada nas classes de consumo de pessoas antes marginalizadas pela sua condição social, que agora consomem mais alimentos e de maior qualidade, como carnes e laticínios e o milho se destaca na composição das rações para aves, suínos e bovinos, principalmente gado leiteiro. O milho também é consumido na forma de farelo e “in natura”, pelos animais e pelas pessoas.

O Brasil também tem vislumbrado a possibilidade de aumentar as suas exportações de milho, que eram de 3,9 milhões de toneladas em 2006 e foram estimadas para 2009 em 8,5 milhões de toneladas (BRANDALIZZE, 2009), aumentando o superávit primário do Brasil. No início da década de 1990 o Brasil exportava 1,5 e importava quase 10 milhões de toneladas (PINAZZA, 1993), dessa forma, aumentando o déficit primário.

Na indústria, o milho é utilizado na fabricação de mais de 600 produtos, como na produção de amido, óleo, farinha, glicose, produtos químicos, elaboração de formulações alimentícias e outros (PINAZZA, 1993).

No final da década de 1980 a população brasileira era de aproximadamente 149 milhões (IBGE, 2012), a área plantada de milho e a produção eram de aproximadamente 10 e 22 milhões, de hectares e toneladas, respectivamente (PINAZZA, 1993), ou seja, produtividade média de 2,2 toneladas de grãos por hectare. Hoje para atender as exportações e a demanda interna de uma população de mais de 190 milhões de brasileiros a área plantada aumentou para 12 milhões de hectares e a produção para aproximadamente 50 milhões de toneladas (CONAB, 2010), evidenciando grande aumento na produtividade brasileira de milho, que em 2010 foi de aproximadamente 4,12 toneladas por hectare. Isso demonstra um grande incremento na produtividade brasileira, mas que ainda fica muito a quem da dos EUA que em 2010 cultivaram 36 milhões de hectares e colheram 307 milhões toneladas de milho (AGRIANUAL, 2011), o que representa uma produtividade média de 8,5 toneladas por hectare, os mantém como maiores produtores mundial de milho, seguidos da China com 160 milhões de toneladas de grãos de milho por ano.

Os principais estados brasileiros produtores de milho em ordem decrescente são: Paraná com 9,5, Minas Gerais com 6,4, Mato Grosso com 5,7, Rio Grande do Sul, Santa

Catarina, São Paulo e Goiás com produções variando entre 3,6 a 5,3 e Mato Grosso do Sul com aproximadamente três milhões de toneladas por ano (BRANDALIZZE, 2009).

Para atender esta demanda cada vez maior, existem duas alternativas, como a expansão da fronteira agrícola ou o aumento da produtividade das áreas cultivadas.

A expansão das áreas de plantio necessita de menores investimentos científicos e de conhecimento específico, uma vez que após o desmatamento e a instalação da atividade o modelo produtivo não se altera, mas sempre depende de novas áreas para seu crescimento.

Por sua vez, o aumento da produtividade das áreas cultivadas requer o constante investimento em tecnologias envolvidas no modelo produtivo como o melhoramento genético, aumento da disponibilidade de nutrientes e técnicas de manejo que visam manter a fertilidade do solo.

2.2 O milho

2.2.1 História

Nativo das Américas vem sendo cultivado na região que onde hoje se compreende como México e Guatemala, desde tempos imemoriáveis pelos povos nativos, acredita-se que os indígenas começaram a cultivá-lo há mais de 7 mil anos a.C. (FORNASIERI FILHO, 1992).

O milho foi encontrado por membros da expedição de Cristóvão Colombo, em 1492, na ilha de Cuba e no ano seguinte levado para a Europa, essas sementes foram muito cultivadas na região do Mediterrâneo, espalhando-se posteriormente, quase que, pelo mundo todo (PATERNIANI, 1984).

Hoje esse cereal, o mais plantado do mundo, pode ser encontrado em áreas de cultivo comercial em altitudes de 3000 metros ao nível do mar e entre latitudes até 60°.

Essa incrível adaptação é, em parte, fruto dos milênios de seleção e melhoramento genético que essa planta vem sofrendo ao longo do tempo da sua domesticação, o que demonstra a sua importância para a sociedade humana (BRIEGER; BLUMENSCHIN, 1966).

2.2.2 A planta

Segundo Fornasieri Filho (1992) o milho (*Zea mays* L.) pode ser classificado como: família, *Poaceae*; subfamília, *Panicoideae*; tribo, *Andropogoneae*; subtribo, *Tripsacinae* e gênero, *Zea*.

O gênero *Zea* consiste em cinco espécies, a saber: *Zea mays*, *Zea mexicana*, *Zea luxurians*, *Zea diploperennis* e *Zea perennis*.

Existe cerca de 250 raças de milho, cada uma com inúmeras variedades tanto cultivadas comercialmente como de interesse científico (FISHER; PALMER, 1984).

Atualmente as áreas comerciais de milho que utilizam maiores tecnologias plantam os híbridos selecionados. O advento do milho híbrido representou grande impacto para o aumento da produtividade do milho (PATERNIANI, 1993).

Nos anos 1980 iniciaram os trabalhos de transformação genética, que iniciou com o estudo do Sistema Agrobactéria (FRALEY et al., 1986; ZAMBRYNSKI; TEMPE; SCHELL, 1989) que vem propiciando maximizar a produtividade, a qualidade e a sanidade da cultura.

O milho é uma planta 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 podem permanecer no seu estado normal ou desenvolver-se para formar a inflorescência feminina, ou espiga, 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).

O milho é caracterizado em razão do seu processo fotossintético como planta do tipo C_4 , como a maioria das gramíneas, no qual o dióxido de carbono (CO_2) é continuamente concentrado em células dispostas em forma de anel que circundam os feixes vasculares, essa característica faz com que a planta tenha baixas perdas de CO_2 na luz e baixo consumo de água por unidade de matéria seca produzida (FORNASIERI FILHO, 1992).

Segundo Fornasieri Filho (1992), os estádios de desenvolvimento do milho são identificados pelo número de folhas totalmente emergidas, sendo considerada a folha 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 organizados por algarismos arábicos para orientar adequadamente a condução da cultura.

A descrição dos estádios fenológicos do milho segundo Fancelli (1986), pode ser observada na figura 1:

Fase vegetativa (V).

Estádio V_0 – Germinação/Emergência: embebição, digestão de substâncias de reserva do cariópse, divisão celular e crescimento das raízes seminais.

Estádio V_2 – Emissão da segunda folha: emissão das raízes primárias e das raízes seminais, início do processo fotossintético com duas folhas totalmente expandidas.

Estádio V_4 – Emissão da 4ª folha: definição do potencial produtivo.

Estádio 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.

Estádio V_8 – Emissão da 8ª folha: início da definição da altura da planta e da espessura do colmo.

Estádio V_{12} – Emissão da 12ª folha: início da definição do número e tamanho de espiga.

Estádio V_{14} – emissão da 14ª folha.

Fase reprodutiva (R).

Estádio V_t – emissão do pendão e abertura das flores masculinas.

Estádio R_1 – florescimento pleno: início da confirmação da produtividade.

Estádio R_2 – grão leitoso.

Estádio R_3 – grão pastoso.

Estádio R_4 – grão farináceo.

Estádio R_5 – grão farináceo duro.

Estádio R_6 – maturidade fisiológica: máximo acúmulo de matéria seca e máximo vigor da semente, aparecimento do ponto preto na base do grão.

Figura 1. Estádios fenológicos da cultura do milho.

2.3 Nutrição mineral do milho

A história da nutrição mineral de plantas teve início na Grécia antiga quando o filósofo e biólogo Aristóteles (384-322 a.C.) afirmava “as plantas são como animais invertidos e mantêm a boca no chão”, mas o grande avanço no conhecimento da nutrição de plantas foi a partir do século XIX, quando o químico alemão Justus von Liebig formulou e passou a ensinar que as plantas crescem de acordo com os elementos encontrados no solo e que seu desenvolvimento pode ser limitado pelo elemento presente no solo em quantidade menor do que a adequada, postulando assim a famosa Lei do Mínimo (MALAVOLTA, 2006).

Quando um dos elementos químicos essenciais para a vida da planta está presente no meio em quantidades insuficientes ou em combinações que o tornam pouco disponível, a deficiência de tal elemento nas células provocará distúrbios no metabolismo da planta (EPSTEIN, 1975).

Todos os elementos essenciais são encontrados nas plantas, mas nem todos os elementos encontrados na planta são essenciais (MALAVOLTA, 1997). Um elemento essencial é definido como aquele que é componente intrínseco na estrutura ou no metabolismo da planta ou cuja ausência causa anormalidades severas no crescimento, desenvolvimento e reprodução do vegetal (EPSTEIN; BLOOM, 2006).

Segundo Epstein (1999), os elementos requeridos pelas plantas são:

Hidrogênio (H), carbono (C) e oxigênio (O), esses três elementos não são classificados como nutrientes minerais, porque as plantas os obtêm da água e do ar.

Nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), esses seis elementos são classificados como macronutrientes, pois as plantas os necessitam em grandes quantidades, gramas por quilograma de tecido vegetal.

Cloro (Cl), ferro (Fe), boro (B), manganês (Mn), sódio (Na), zinco (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni) e molibdênio (Mo), esses são denominados micronutrientes, não pela sua importância e sim pela dose que as plantas os exigem, que normalmente são miligramas por quilograma de tecido vegetal.

A maneira com que o conjunto de processos e reações afeta a dinâmica dos nutrientes no sistema solo-planta determinará a manutenção da vida e o crescimento dos constituintes de seu metabolismo (PARRY et al., 2008).

De acordo com Oliveira e Caldas (2004), a obtenção de boa produtividade está diretamente ligada à nutrição balanceada da planta. Da mesma forma, sabe-se que uma planta nutrida adequadamente apresenta maior resistência às doenças e pode atingir seu potencial de

produtividade. Uma alta produtividade é, em grande parte, resultado do adequado suprimento, distribuição e acúmulo de nutrientes pela planta (FONTES; DIAS; GRAÇA, 2005). O uso racional de corretivos e fertilizantes é uma das premissas necessárias para o sucesso na produção (HEINRICHS et al., 2008).

Para se obter a máxima eficiência do fertilizante (MAR et al., 2003) é importante determinar as épocas em que os nutrientes são mais exigidos pelas plantas, permitindo assim, corrigir as deficiências que possam ocorrer no desenvolvimento da cultura.

A marcha de absorção, expressa na forma de curvas de resposta em função da idade das plantas, informa as épocas em que essas absorvem os nutrientes em maiores quantidades, aumentando, assim, o conhecimento de épocas em que a adição de nutrientes às plantas faz-se necessário. Por isso, ela constitui ferramenta importantíssima ao manejo de fertilizantes das culturas (VIDIGAL; PACHECO; FACION, 2007). A marcha de absorção de nutrientes fornece informação sobre a exigência nutricional das plantas em seus diferentes estádios fenológicos, sinalizando as épocas mais propícias à adição dos nutrientes. Entretanto, a quantidade e a proporcionalidade dos nutrientes absorvidos pelas plantas são funções de características intrínsecas do vegetal, como, também, dos fatores externos que condicionam o processo (GRANGEIRO; CECÍLIO FILHO, 2004). Ela é referência importante para o fornecimento dos mesmos em doses adequadas ao bom desenvolvimento das plantas. Assim, o estudo das quantidades dos nutrientes absorvidos durante os vários estádios de desenvolvimento da planta pode auxiliar sobremaneira na determinação da composição de adubações da cultura (BARBOSA et al., 2003).

O planejamento da adubação deve estar fundamentado na necessidade nutricional da cultura, na marcha de absorção dos nutrientes, na fertilidade do solo, através de análise química do solo, no histórico da gleba, nas condições climáticas, na análise química da folha da cultura e na produtividade almejada (FANCELLI, 2009).

Os elementos minerais têm funções essenciais no metabolismo das plantas. Dessa forma, quando um dos nutrientes essenciais não está presente em quantidades suficientes para garantir o desenvolvimento da planta ou em condições que o tornam pouco disponível, a deficiência desse nutriente nas células promoverá alterações no seu metabolismo (CONCEIÇÃO et al., 2002).

A cultura do milho é muito exigente em termos de nutrição mineral. Os macronutrientes e os micronutrientes são exigidos em quantidades relativamente elevadas pela cultura. Isto ocorre devido a grande quantidade exportada na colheita dos grãos.

As quantidades de macronutriente extraídas pela cultura do milho para produção de 1 tonelada de grãos por hectare são: 18 kg de N, 3,2 kg de P, 16 kg de K, 4,0 kg de Ca, 4,0 kg de Mg e 3,0 kg de S e as quantidades de micronutrientes para se obter a mesma produção são: 230 g de Fe, 42 g de Zn, 37 g de Mn, 18 g de B, 12 g de Cu e 1,2 g de Mo (FANCELLI, 2008).

As quantidades de micronutrientes podem parecer baixas, entretanto, a deficiência de um deles pode ter tanto efeito na desorganização de processos metabólicos quanto à deficiência de um macronutriente (VITTI; FAVARIN, 1997).

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

Segundo Awad e Castro (1983), Malavolta (2006), Raij (1991), Raven, Evert e Eichhorn (2007) e Taiz e Zeiger (2009), as principais funções dos elementos minerais nas plantas, resumidamente, são:

Nitrogênio: Fotossíntese; respiração; síntese de produtos, como os aminoácidos e as proteínas; multiplicação celular; hereditariedade.

Fósforo: Acúmulo de energia; membrana plasmática; tilacóides de cloroplastos; multiplicação celular; hereditariedade; síntese proteica.

Potássio: Translocação de açúcares; pressão osmótica; abertura e fechamento de estômatos; alto uso de energia (ATP) para mantê-lo na célula.

Cálcio: Forma lamela média para constituição da parede celular, funcionamento da membrana plasmática, auxilia no transporte de auxinas.

Magnésio: Fotossíntese; regulador enzimático, síntese orgânica e balanço eletrolítico.

Enxofre: Fotossíntese; fixação não fotólita do CO₂; fixação do N₂; estrutura de proteínas.

Boro: Estrutura e funcionamento da membrana plasmática; síntese e transporte de carboidratos; controle hormonal, crescimento e reprodução.

Ferro: Ativador enzimático; metabolismos de auxinas; fotossíntese; respiração; assimilação de N e S; fixação biológica do nitrogênio (FNB); síntese de lignina e suberina.

Cobre: Fotossíntese; respiração; regulador hormonal; metabolismo de compostos.

Zinco: Ativador enzimático; fotossíntese; respiração; síntese de produtos fotossintetizados; distribuição hormonal.

Manganês: Fotólise da água na fotossíntese; ativador enzimático da glicólise; absorção iônica; fotossíntese, respiração; síntese de carboidratos; controle hormonal.

Molibdênio: Absorção de N (FBN); formação de aminoácidos.

2.3.1 Estudo dos nutrientes boro, ferro, cobre e zinco

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

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

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

2.3.1.1 Boro

O boro (B) é reconhecidamente o micronutriente cuja deficiência é mais comum no Brasil, tanto em culturas anuais como nas perenes. Na verdade o B “disputa” com o zinco o primeiro lugar (MALAVOLTA, 2006).

A maior fonte de boro no solo é a turmalina (LOUÉ, 1993), mas esse permanece insolúvel resistindo ao intemperismo, por isso a fonte mais importante para as plantas é a matéria orgânica, da qual o B se liberta por mineralização (BERGER; PRATT, 1963).

O boro, na faixa de pH (H_2O) entre 4,0 e 8,0, encontra-se na solução do solo na forma de ácido bórico (H_3BO_3), o que explica a facilidade com que lixívia, em pH acima de 8,0 o ácido bórico por hidrólise passa para a forma de borato ($B(OH)_4$). Ele pode ser adsorvido pelos óxidos e hidróxidos de Fe e Al, minerais de argila e hidróxidos de Mg dos minerais ferromagnesianos (LOUÉ, 1993).

Embora o papel do boro no metabolismo da planta não seja claro, evidências sugerem que ele desempenha funções no alongamento celular, síntese de ácidos nucleicos, respostas hormonais e funcionamento de membranas (SHELP, 1993). Dependendo da espécie e da idade da planta a deficiência de boro pode apresentar uma variedade de sintomas.

Um sintoma característico é a necrose preta de folhas jovens e gemas terminais. A necrose das folhas jovens ocorre principalmente na base da lâmina foliar. Os caules podem se apresentar rígidos e quebradiços. A dominância apical pode ser perdida, tornando a planta altamente ramificada; entretanto, os ápices terminais dos ramos logo se tornam necróticos devido à inibição da divisão celular. Estruturas como frutos, raízes carnosas e tubérculos podem exibir necroses ou anomalias relacionadas à desintegração de tecidos internos. O boro é considerado imóvel dentro das plantas, por isso os sintomas de deficiências aparecem nas vegetações novas (TAIZ; ZEIGER, 2009).

Para Raven et al. (2007), o boro ainda influencia a utilização do cálcio e o primeiro sintoma de deficiência é a falha no alongamento das raízes; folhas jovens verdes claras na base; as folhas tornam-se enroladas e o sistema caulinar morre, começando da gema terminal.

Segundo Lima Filho e Malavolta (1998), a falta de boro leva a má germinação do grão de pólen no florescimento e na frutificação e no milho causa a esterilidade.

Conforme observaram Blevins e Lukaszewski (1998), embora a quantidade de boro na membrana celular seja muito menor que na parede celular, é significativa para a absorção iônica, sendo assim a absorção do P é lenta em solução isenta de B, entretanto, é restaurada por 1 hora de pré-tratamento das raízes com boro.

Para Fancelli (2000), ele atua no processo de divisão celular; auxilia no transporte de carboidratos, participa na formação dos grãos e é importante para a germinação da semente.

Sintomas de deficiência no milho são faixas alongadas aquosas ou transparentes; que depois ficam brancas ou secas nas folhas novas; o ponto de crescimento morre; baixa polinização; quando as espigas se desenvolvem podem mostrar faixas marrons de cortiça na base dos grãos; falha na granação (MALAVOLTA; DANTAS, 1987; MALAVOLTA et al., 1989); folhas avermelhadas no final do ciclo; espigas pequenas e falhas na granação; grãos nas extremidades das espigas com aspecto de cortiça (FANCELLI; 2000), ainda segundo Fancelli (2009) podem aparecer vincos salientes no limbo foliar acompanhando as nervuras.

As principais interações entre os elementos com o boro, segundo Malavolta (2006), são B x N: excesso de N pode induzir a deficiência de B, possivelmente por efeito de diluição e falta de N pode ocasionar acumulação de boro; B x P: plantas com deficiência de P tem maior concentração de boro; B x K: o aumento de K no solo pode diminuir o B em algumas plantas, como é o caso do algodão, do amendoim e da soja, o suprimento adequado de B no substrato pode diminuir efeito de inibição competitiva do K sobre o Ca e o Mg no caso da soja; B x Ca: quando Ca é baixo no solo pode-se evitar a deficiência desse aumentando a dose de B e a recíproca também é verdadeira, a calagem tem sido associada à deficiência de B

devido à fixação e à diminuição da difusão no solo, especialmente em baixas umidades do solo.

O B pode apresentar efeito de inibição não competitiva ao zinco quando em solução (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

Lima Filho (1991) estudou, no cafeeiro, a relação B x Zn onde a produção de matéria seca aumentou com as doses de zinco somente quando se elevou o teor de boro no solo.

2.3.1.2 Ferro

O Fe é considerado um elemento ubíquo devido a sua frequência com que aparece no planeta, é o quarto elemento mais abundante nas rochas da litosfera e forma compostos estáveis com enxofre, oxigênio e silício (KRAUSKOPF, 1972).

Na solução do solo, em condições aeróbicas, aparece o Fe_2O_3 coloidal e complexos com ligantes orgânicos. Quando há muita matéria orgânica aparece o Fe na solução, como complexos e a fase lábil mostra Fe^{+2} ; em condições anaeróbicas dá-se a redução do Fe^{+3} . O Fe forma complexos com compostos orgânicos que ocorrem tanto na fase sólida, lábil, como em solução; ácidos orgânicos como cítrico, oxálico málico e fenóis formam complexos solúveis que são liberados quando a matéria orgânica se decompõe, aumentando a mobilidade e a disponibilidade do elemento (FAGERIA et al., 2002).

A deficiência do elemento é consequência geralmente da atuação dos fatores que afetam a sua disponibilidade. De acordo com Lindsay (1972), além do potencial de redox que favorece a conversão do Fe^{+2} em Fe^{+3} , o pH afeta a disponibilidade mais do que qualquer outro micronutriente.

O ferro assim como o cobre, o zinco, o níquel e o molibdênio, podem sofrer oxidação e redução reversível. Eles têm importantes papéis, além de desempenharem funções na transferência de elétrons, são encontrados em associação com moléculas maiores, como citocromos, clorofilas e proteínas, normalmente enzimas.

O Fe é importante na composição de enzimas envolvidas na transferência de elétrons (reações redox), nesse papel ele é reversivelmente reduzido de Fe^{+2} a Fe^{+3} (TAIZ; ZEIGER, 2009). Ele também participa dos processos de fotossíntese, respiração, fixação biológica de nitrogênio, assimilação de nitrogênio e de enxofre, na síntese de lignina e suberina e no metabolismo de auxinas (MALAVOLTA, 2006).

Da mesma forma que na deficiência de magnésio, um sintoma característico da deficiência de Fe é a clorose entre as nervuras. Ao contrário dos sintomas da deficiência do

magnésio, tais sintomas inicialmente aparecem nas folhas mais jovens, porque o ferro não pode ser prontamente mobilizado das folhas mais velhas. Sob deficiência extrema ou período de tempo prolongado as nervuras podem também se tornarem cloróticas, fazendo com que toda a folha torne-se branca (TAIZ; ZEIGER, 2009).

O potencial hidrogeniônico (pH) do solo é o principal fator de interação com o Fe, sendo solos alcalinos a principal causa de deficiência de ferro. Isso ocorre pois o aumento do pH aumenta a insolubilidade do ferro, além dessa as principais interações com o ferro são Fe x N: em muitas plantas teores maiores de ferro estão associados a N amoniacal devido ao abaixamento do pH do substrato; Fe x P: alto teor de P no solo diminui absorção de ferro; Fe x Cu: pode induzir deficiências de cobre e este último pode deslocar o ferro de quelados diminuindo absorção e transporte; Fe e Mn: altos níveis de um diminui a absorção do outro; Fe x Zn: aplicações de zinco podem causar deficiência de ferro na soja e o zinco, assim como o Cu, pode deslocar o Fe de quelados diminuindo a sua disponibilidade; Fe x metais pesados: podem causar clorose férrica, o efeito está relacionado com a estabilidade do Fe em complexos orgânicos obedecendo a ordem de estabilidade em ordem decrescente tem-se Cu, Ni, Co, Fe^{+3} , Zn, Cd, Fe^{+2} e Mn^{+2} , os dois últimos em mesma posição (MALAVOLTA, 2006).

2.3.1.3 Cobre

O Cu ocorre na natureza como sulfetos, sulfatos, outros sais diversos, inclusive carbonatos e, em condições redutoras pode aparecer na forma metálica (BAKER, 1993).

Nos solos ácidos aparecem $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+2}$ e nos alcalinos $\text{Cu}(\text{OH})_2\text{O}$. O Cu é fixado energeticamente o que resulta pouco movimento no solo, a maior parte está presa a matéria orgânica, é comum em solos arenosos e nos ricos em matéria orgânica (MALAVOLTA, 2006).

Como o Fe, o Cu está associado a enzimas envolvidas em reações redox, sendo reversivamente oxidado de Cu^+ a Cu^{+2} (TAIZ; ZEIGER, 2009). Atua no sistema enzimático, na produção de fenóis e quinonas, no processo de assimilação do nitrogênio e na síntese de proteína (FANCELLI, 2009).

Os sintomas de deficiência mais comuns no milho, segundo Malavolta e Dantas (1987); Malavolta et al. (1989) e Fancelli (2009), são o amarelecimento das folhas logo após o seu desdobramento, o encurvamento das extremidades das folhas e margens necrosadas e colmos frágeis, ainda para Fancelli (2009 p.89) “A carência de cobre tem contribuído para o aumento da predisposição do milho à cercosporiose e ao complexo da mancha branca”.

Os principais elementos do solo que indisponibilizam o Cu são a matéria orgânica e o húmus, pois esses formam complexos muito estáveis com o cobre diminuindo a sua disponibilidade para as plantas. Outras relações são Cu x N: adição de N amoniacal em solos pobres de Cu pode induzir a deficiência o mesmo, a aplicação foliar de Cu aumenta os teores de N, P, K, Ca e Mg na planta possivelmente por efeito no metabolismo da planta; Cu x P: fósforo alto no substrato pode induzir a carência de Cu; Cu x Ca: os efeitos do cálcio em diminuir a absorção do cobre estão associados à elevação do pH no substrato; Cu x Mn: geralmente tem sido encontrada correlação negativa entre estes dois no algodão e na soja e Cu x Zn: o aumento do cobre, normalmente, leva a uma diminuição no teor de zinco (MALAVOLTA, 2006).

2.3.1.4 Zinco

O zinco, juntamente com o boro aparece como o micronutriente cuja deficiência é mais comum no Brasil, tanto nas culturas perenes quanto nas anuais, como é o caso do milho (MALAVOLTA, 2006).

Segundo Fageria et al. (2002), a falta de zinco é um limitante para o aumento da produtividade e da qualidade dos produtos agrícolas no mundo inteiro.

Ele aparece no solo em cinco frações. Na solução do solo está presente na forma de Zn^{+2} e complexos orgânicos; na fração trocável, preso eletrostaticamente nas partículas do solo; adsorvido, quelatizado ou complexado em ligantes orgânicos e minerais de argila; argilas e óxidos metálicos insolubilizam o Zn, pode ser reversível quando ocorre a entrada na rede cristalina, por exemplo, nas argilas 2:1, e, por fim, ele aparece nos minerais primários.

O pH do solo influencia fortemente a sua disponibilidade para as plantas, visto que o aumento deste diminui a concentração de Zn na solução do solo, mas em determinados solos o aumento do pH pode aumentar a sua disponibilidade devido à dissolução da matéria orgânica (MALAVOLTA, 2006).

A matéria orgânica pode afetar a disponibilidade de Zn aumentando a sua solubilidade, através da complexação com ácidos orgânicos e aminoácidos; diminuí-la devido à formação de complexos insolúveis; os exsudatos das raízes também podem formar complexos com o zinco na rizosfera e os microrganismos podem imobilizá-lo na biomassa e depois liberá-lo na através da mineralização (FAGERIA et al., 2002).

Segundo Malavolta (2006), as baixas temperaturas influenciam negativamente a disponibilidade e a absorção do Zn.

Os principais sintomas de deficiência de zinco no milho são faixas brancas ou amareladas entre a nervura principal e os bordos, podendo seguir-se necrose e ocorrer tons roxos, folhas novas se desenrolando na região do crescimento são esbranquiçadas ou de cor amarelo pálida e internódios curtos (MALAVOLTA; DANTAS, 1987; MALAVOLTA et al., 1989).

O zinco é requerido por muitas enzimas para suas atividades, ele pode ser exigido para a biossíntese de clorofila, além de ser importante para a produção do ácido indol acético, uma auxina, importante para o crescimento e, assim como o Fe e o Cu, está envolvido nas reações de transferência de elétrons, as reações redox (TAIZ; ZEIGER, 2009).

Segundo Fancelli (2009), no milho o zinco participa do crescimento das plantas, é ativador de inúmeras enzimas e participa da formação dos grãos e os sintomas de deficiências são folhas com coloração esbranquiçada próxima à região do “cartucho”, crescimento reduzido da planta e encurtamento dos internódios.

O zinco é o micronutriente que apresenta as maiores respostas de produção de milho no Brasil, provavelmente decorrente da falta generalizada desse em solos brasileiros (BÜLL, 1993).

As principais interações são Zn x N: fornecimento de N aumenta o teor de Zn, o efeito maior sendo devido ao N amoniacal que aumenta a disponibilidade no solo, teor de N nítrico na folha diminui com o aumento da dose de Zn; Zn x P: relação inversa, ou seja, o aumento de um diminui a disponibilidade do outro sendo mais comum à deficiência de zinco causada pelo excesso de fósforo; Zn x K, Ca, Mg, S, Na: aumento na concentração de zinco na solução nutritiva causou diminuição no teor de potássio, cálcio, magnésio e enxofre e aumento na de sódio; Zn x Fe: ver item 2.3.3.4.2 Ferro e Zn x Mn: efeito inconsistente, pois dependendo da planta pode ocorrer correlação positiva, negativa ou nenhuma posição (MALAVOLTA, 2006).

2.3.2 Avaliação do estado nutricional das plantas

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

A anormalidade visível causada pela deficiência de um elemento é o final de uma cadeia de eventos que começa com uma modificação ao nível molecular, continua com uma mudança ao nível submolecular, prossegue com modificações ao nível celular e, finalmente, o

conjunto de células, o tecido, é afetado e a desordem nutricional aparece, o que é visualizado nas folhas e frutos (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

Há vários métodos para avaliar o estado nutricional das plantas, todos frutos de muitos anos de observações dos sintomas das deficiências minerais, suas causas e seus efeitos, além de muita pesquisa para estabelecer as quantidades de nutrientes necessárias para atingir determinados níveis de produtividade nas culturas agrícolas e correlacionar a quantidade de elementos minerais no solo e o teor dos mesmos nas plantas (PRADO et al., 2008).

2.3.2.1 Diagnose visual

Uma maneira prática e rápida de determinar a existência da deficiência de nutrientes na planta é por meio do diagnóstico visual, porém, a sua precisão é limitada e passível de erros, pois depende da acuidade do avaliador (BAESSO et al., 2007). Na maioria das vezes, só é possível diagnosticar visualmente a deficiência quando ela ocorre de forma aguda, isto é, quando provavelmente parte significativa da produção já estiver comprometida. Além disso, em estágio avançado de desenvolvimento, os sintomas de deficiência dos diversos nutrientes se assemelham, confundindo o diagnóstico (FONTES, 2004).

2.3.2.2 Diagnose foliar

A folha é o órgão que, reconhecidamente, expressa melhor o estado nutricional das plantas, pois é onde ocorre a maioria dos processos metabólicos, desta forma, a diagnose foliar consiste em métodos de extração dos elementos que estão nas folhas para definir o seu estado nutricional, através de relações com o suprimento de mineral (M) do solo e ou do adubo, ou seja, a planta como extrator dos elementos do solo, e interações dos teores foliares e as produtividades atingidas (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

O teor de nutriente na folha é um valor que expressa os fatores que interagem para afetá-la. É surpreendente que as relações entre a análise foliar de plantas, o suprimento de nutrientes e a produção sejam tão validas (MUNSON; NELSON, 1973).

A maioria dos erros cometidos na interpretação da análise foliar ocorre em função da amostra de folhas coletada na lavoura (PRADO et al., 2008). Segundo Fancelli (2009), a época correta de se coletar material para a análise foliar é na ocorrência do florescimento feminino, quando aparecer os estilos-estigma (“cabelo” da espiga), deve-se coletar o terço

médio da folha oposta e imediatamente abaixo da espiga (inflorescência feminina), excluindo a nervura central da folha e coletar de 20 a 30 folhas por hectare.

Para Prado et al. (2008 p.56), “A folha que melhor expressa o estado nutricional é aquela cujo crescimento já terminou (recém-madura) e não entrou em senescência, sendo, portanto, a ‘folha fisiologicamente ativa, ou madura’, com alta taxa metabólica”.

Para determinar os teores totais dos elementos minerais nas folhas, faz-se a digestão ácida da amostra, normalmente com ácido sulfúrico para determinar o nitrogênio e com ácido nítrico e perclórico para os demais, a não ser para o boro e o molibdênio que se usa a digestão a seco da amostra em forno. Esses procedimentos servem para destruir a matéria orgânica mineralizando os elementos que depois são determinados por métodos analíticos diversos (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

A interpretação da análise foliar exige estudo e experiência do avaliador, pois vários fatores como a amostra, o balanço dos nutrientes, o efeito de híbridos e o efeito da variação dos nutrientes alterados por processos fisiológicos podem levar a diagnósticos errados (PRADO et al., 2008). Existem vários métodos para interpretar o resultado da análise foliar como o nível crítico, índices nutricionais de Kenworthy, o registro agrônomo (Crop log), a relação entre os elementos, o sistema integrado de diagnose e recomendação (DRIS) (MALAVOLTA, 2006) e o método da faixa de suficiência (PRADO et al., 2008).

2.3.2.2.1 Nível crítico

O nível crítico pode ser definido como a concentração na qual o crescimento da planta é restrito em comparação com o de plantas com níveis mais altos (ULRICH, 1948). Também pode ser definido com o ponto médio da zona de transição entre os níveis de deficiência e suficiência (ULRICH; HILL, 1973). Segundo Büll (1993), o conceito de “faixa crítica” tem sido mais aceito.

A relação entre o teor de nutrientes na folha com a produção final da planta constitui o nível crítico, sendo este ponto correspondente a 90% da produção máxima (PRADO et al., 2008).

Para Malavolta (2006 p.571), “níveis críticos, tratam-se de ‘zonas’ cujos limites inferiores e superiores não são matematicamente determinados”.

2.3.2.2.2 Faixa de suficiência

Nesse método o teor de nutrientes da amostra é comparado com faixas de teores considerados insuficientes, adequados ou tóxicos (MARTINEZ; CARVALHO; SOUZA, 1999). Segundo Prado et al. (2008), esse é o método mais utilizado para interpretar os resultados da análise foliar.

Nas folhas de milho as faixas de teores totais adequados de macronutrientes, expresso em gramas por quilograma (g.kg^{-1}) são: 27,5-32,5 para o N, 2,5-3,5 para o P, 17,5-22,5 para o K, 2,5-4,0 para o Ca, 2,5-4,0 para o Mg e 1,5-2,0 para o S, e dos micronutrientes, expresso em miligramas por quilograma (mg.kg^{-1}) são: 15-20 para o B, 6-20 para o Cu, 50-250 para o Fe, 50-150 para o Mn, 0,15-0,20 para o Mo e 15-50 para o Zn (MALAVOLTA, VITTI e OLIVEIRA, 1997).

Para Fancelli e Dourado Neto (2000), os teores adequados de macronutrientes (g.kg^{-1}) são: 30-40 para o N, 2,5-4,0 para o P, 20-40 para o K, 3-5 para o Ca, 1,7-4,5 para o Mg e 1-2 para o S, e dos micronutrientes (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.

Nota-se uma grande diferença para o N, o K o B, o Cu e o Zn, das pesquisas do primeiro para o segundo pesquisador, supracitados, sendo os dados mais atuais indicadores de uma maior demanda por esses nutrientes. Assim como a produtividade média do milho no Brasil vêm crescendo, a necessidade da planta por elementos minerais, parece fazer o mesmo, em concordância com os fatores que determinam o próprio nível crítico.

2.3.2.2.3 Métodos para auxiliar na interpretação da diagnose foliar

Além dos métodos tradicionais, para avaliar a nutrição das plantas, existem outros que surgiram para tentar diminuir possíveis erros e ou facilitar o diagnóstico nutricional, os mais conhecidos são:

Índices nutricionais de Kenworthy: muitos fatores que atuam e interagem modificam a composição das folhas, o que explica as faixas de níveis nutricionais, para amenizar essas variáveis nas faixas, foi introduzido os aspectos estatísticos como erro padrão e o coeficiente de variação, dessa maneira os elementos nas amostras são avaliados em relação a valores padrões, plantas com altas produções, com correção introduzida para levar em conta a dispersão dos dados (KENWORTHY, 1961).

Registro agronômico (CROP LOG): esse método consiste em um monitoramento do estado nutricional da cana-de-açúcar durante o seu ciclo em que se determinam os teores de açúcar, umidade na bainha e os teores de N, P e K na folha. O resultado é interpolado em

equações e o resultado é comparado com resultados obtidos em plantações de alta produtividade (CLEMENTS, 1961).

Relação entre os elementos: trata-se de um gráfico triangular de coordenadas para mostrar o balanço entre os teores de nutrientes que apresentam alguma interação fisiológica como o K, o Ca e o Mg (LAGATO; MAUME, 1934).

Sistema integrado de diagnose e recomendação (DRIS): nesse sistema faz-se a comparação das relações entre nutrientes em várias amostras e com as relações encontradas nas folhas de populações com altas produtividades, essas observações são feitas em um grande número de casos para diminuir os coeficientes de variação. As relações ótimas são as “normas”. Faz-se a comparação entre as relações dos nutrientes entre si e com as normas, determinando os nutrientes deficientes, adequados ou níveis de consumo de luxo (BEAUFILS; SUMNER, 1976).

Segundo Prado et al. (2008), esse sistema utiliza o princípio das relações entre os nutrientes para determinar a ordem em que eles são os mais limitantes para o aumento da produção.

2.3.2.3 Outros métodos para avaliar a nutrição vegetal

“O cientista deve ser motivado pelo desejo de relacionar a ciência a outras coisas além da ciência, ao mundo em que é usada, aos valores da sociedade civilizada.”

Sir Edward Appleton

Os métodos que serão apresentados a seguir são pouco utilizados nas condições de campo, sendo usados na maioria em pesquisas científicas (MALAVOLTA, 2006).

Testes bioquímicos, estes testes consistem em analisar algumas substâncias, compostos orgânicos e atividades enzimáticas relacionadas a alguns nutrientes minerais (M). Sabendo que a deficiência de M pode diminuir o teor de um dado composto e ou afetar a atividade de uma ou de várias enzimas, pode-se criar correlações com a carência ou o excesso do M relacionado ao processo biológico, determinando assim a nutrição da planta em relação a determinado elemento (MALAVOLTA, 2006).

Técnicas de infiltração, geralmente essas técnicas são usadas para distinguir deficiências foliares que apresentam clorose foliar e que são muito semelhantes como as de zinco e manganês, ferro e manganês, cobre e zinco e nitrogênio e enxofre, sem o uso da análise química foliar. Essas técnicas consistem em aplicar através de infiltração determinada

dose do M que se suspeita da deficiência em uma folha que apresente o sintoma e verificar se o sintoma regride (MALAVOLTA, 2006).

Determinação indireta da clorofila, esse método consiste na avaliação da quantidade de luz transmitida pela folha em duas regiões de comprimento de onda através de aparelho chamado clorofilômetro, visto que o nitrogênio é o principal M na molécula de clorofila que é caracterizada pela cor verde, pode-se correlacionar os valores da medição da cor da folha com o teor do N para isso é preciso se certificar previamente que a planta não apresente outras cloroses devido à falta de outros elementos (MALAVOLTA, 2006).

Segundo Waskom et al. (1996) na cultura do milho, a relação entre o teor de N na folha e a produtividade de grãos já está bem estabelecida. No entanto, o consumo de luxo do nitrogênio na forma de nitrato, o qual não está ligado à molécula de clorofila, pode resultar em concentrações bem acima do nível adequado desse elemento na análise foliar (Prado et al., 2008).

Para se evitar possíveis equívocos Waskom et al. (1996) recomendam um método de normalização das leituras do clorofilômetro para cada cultura, híbrido/cultivar, estágio de desenvolvimento fenológico, condições edafoclimáticas e práticas de manejo.

Testes no tecido e análise de toque, esses testes baseiam-se em reações coloridas entre dado elemento e reagente específico para o mesmo, seguindo o princípio de que plantas bem nutridas de nutrientes tem teores solúveis do elemento em maior quantidade que plantas deficientes, o que é revelado pelo teste, geralmente através da intensidade da cor que se desenvolve em contato com o reagente, também podem ser usados eletrodos específicos para N-nítrico e K^+ . Essas técnicas, por serem simples, podem ser usadas a campo (MALAVOLTA, 2006).

Bioavaliação, esse método consiste em colocar raízes ou plantas inteiras para absorver o elemento em estudo, usualmente N ou K, durante tempo determinado. De modo geral usa-se um isótopo radioativo ou estável como traçador, isso facilita a quantificação devido à maior sensibilidade da técnica. Esse método baseia-se no fato de que uma planta bem nutrida, em um determinado elemento, tem menor capacidade de absorvê-lo (MALAVOLTA, 2006).

Refletância, trata-se de um método para avaliar o estado nutricional da planta, usando a refletância da cultura em diferentes comprimentos de onda, medida com sensor apropriado (MOGES et al., 2004).

Escala de cores, é uma escala de cores com intensidade de verde que guarda relação direta com o teor de nitrogênio na folha, por isso uma indicação do estado nutricional em relação a esse nutriente (WITT et al., 2005).

2.3.3 Interações entre os nutrientes

Para ser possível que a planta absorva um nutriente (M), este precisa necessariamente passar da fase sólida para a fase líquida do solo, solução do solo, desse processo dá-se à disponibilidade do M para a planta. Vários fatores influenciam a disponibilidade do M, como a umidade, a aeração, a matéria orgânica, o pH, a temperatura e a interação entre os elementos presentes no solo (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

Interação, nesse caso, significa o efeito da adição de um elemento no teor de outro que pode ser aumentado, diminuído ou não ser modificado. Em um solo fértil ou em uma adubação equilibrada, os nutrientes são fornecidos nas proporções adequadas, favoráveis ao crescimento, produção e qualidade da planta (MALAVOLTA, 2006).

Os elementos são absorvidos em velocidades diferentes, geralmente obedecendo a seguinte ordem decrescente para os ânions: nitrato, cloreto, sulfato e ortofosfato, para os cátions: amônio, potássio, sódio, magnésio e cálcio. O íon acompanhante também influencia na absorção do seu par, assim a absorção máxima do amônio ocorrerá quando este estiver acompanhado do nitrato, e a velocidade será mínima se estiver acompanhado do ortofosfato (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Segundo Malavolta (2006 p.70) “Isto se deve ao fato que para manter a neutralidade elétrica, cátions e ânions devem entrar de mãos dadas”.

A solução do solo é uma população heterogênea de íons, por esse motivo, a velocidade de absorção de dado elemento pode ser influenciada pela presença de outro. Sendo os casos mais comuns o antagonismo, a inibição competitiva ou não competitiva e o sinergismo.

Antagonismo significa que a presença de um elemento elimina o efeito tóxico de outro. Pode-se aceitar que a relação entre outros elementos e os metais pesados tóxicos por sua natureza seja antagonista. Um caso clássico de antagonismo é a presença de Ca^{++} anulando o efeito deletério do excesso de Cu^{++} (MALAVOLTA, 2006).

Inibição trata-se da diminuição, geralmente parcial e reversível na absorção de um elemento devido à presença de concentrações suficientes de outro íon. Os casos mais conhecidos são a inibição da absorção de ânions onde há excesso de OH^- , em solos com pH alto, e a inibição de cátions na presença de grandes quantidades de H^+ , como é o caso dos solos ácidos. A inibição pode ser competitiva e não competitiva (MALAVOLTA, 2006).

Inibição competitiva é quando o elemento M e o seu inibidor competem, com o mesmo sítio do carregamento para cruzar a membrana plasmática. Os principais exemplos são: $\text{K} \times \text{Mg}$, $\text{Ca} \times \text{K}$, $\text{Ca} \times \text{Mg}$, $\text{Ca} \times \text{Mn}$, $\text{Mg} \times \text{Mn}$, $\text{Fe} \times \text{Mn}$, $\text{H}^+ \times \text{cátions}$, $\text{OH}^- \times \text{ânions}$ (MALAVOLTA, 2006).

Inibição não competitiva é quando elemento e o inibidor não combinam ao mesmo sítio do carregador. Exemplos clássicos: N x Mg, N x B, P x Cu, P x Fe, P x Mn, P x Zn (MALAVOLTA, 2006).

Sinergismo trata-se de quando a presença de um elemento aumenta a absorção de outro. Por exemplo, concentrações adequadas de cálcio aumentam a absorção dos cátions e ânions por seu papel na manutenção da integridade funcional do plasmalema (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

2.4 Sistema de visão artificial (SVA)

Atualmente os métodos para identificar possíveis deficiências nutricionais em plantas consistem basicamente em diagnose visual e diagnose foliar, sendo os dois métodos passivos de erros de interpretação e de resultados tardios, visto que ao identificar uma deficiência foliar visualmente, o distúrbio metabólico já ocorreu, causando dano na produção da cultura, e no caso da análise química, pode demorar muito para ficar pronto ou nem ser possível devido à disponibilidade de laboratórios credenciados para esse tipo de análise, sendo que normalmente quando usado serve para o planejamento da safra seguinte, pois após o diagnóstico geralmente não há mais a possibilidade de correção da deficiência e a interpretação dos resultados da análise foliar podem apresentar variações devido vários fatores como a amostra, o balanço dos nutrientes, o efeito de híbridos e o efeito da variação dos nutrientes alterados por processos fisiológicos podem levar a diagnósticos errados (PRADO et al., 2008).

Buscando novo método de identificação do estado nutricional de plantas, que possibilite diagnosticar de forma não subjetiva e de resultado imediato, surgiu a proposta de desenvolvimento de um sistema de visão artificial (SVA) para identificação de deficiências nutricionais em milho.

A análise de imagens digitais consiste no reconhecimento da cena para a geração de características dimensionais, como áreas ou comprimentos de objetos, ou atributos, como padrões de cores e texturas, e a sua mensuração através de métodos de contagem ou frequência dos elementos formadores da imagem denominados "pixels" (TEIXEIRA; CICERO; DOURADO NETO, 2006).

Para eliminar divergências na interpretação dos resultados, Assad et al. (2002) estabeleceram um método baseado no comportamento espectral e análise de imagens digitais, para detectar diferentes materiais de origem orgânica no pó de café.

Utilizando a análise de imagens, Cícero e Banzatto Junior (2003) avaliaram os danos mecânicos e vigor em sementes de milho, enquanto 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.

Um sistema de visão artificial também foi proposto para discriminar os defeitos da madeira de eucalipto em imagens digitais (KHOURY JUNIOR et al., 2005).

2.4.1 Sistema de visão artificial (SVA) para a identificação do estado nutricional do milho

O SVA para a identificação do estado nutricional do milho nasceu da parceria do Departamento de Ciências Agrárias da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo (FZEA-USP) em Pirassununga com o Grupo de Computação Interdisciplinar do Instituto Física de São Carlos da Universidade São Paulo (IFSC – USP) em São Carlos que tem como objetivo desenvolver métodos matemáticos e computacionais para serem utilizados como ferramentas de pesquisa em botânica, fisiologia e evolução.

2.4.2 O projeto tree vision system (Tree Vis)

Iniciado em 2003, pelo Grupo de Computação Interdisciplinar do IFSC – USP, o projeto Tree Vis tem o objetivo de desenvolver um conjunto de métodos e técnicas para a identificação e classificação de espécies vegetais de diferentes ecossistemas brasileiros e caracterização do estado nutricional de plantas (GÓMEZ ZÚÑIGA, 2012).

Segundo Casanova (2008) o Tree Vis apresenta quatro fundamentos básicos para o desenvolvimento da metodologia computacional para a identificação do estado nutricional de plantas, são eles: exploração de atributos, sinergismo, análise estatística e validação.

Utilizando um SVA para a identificação nutricional de milho do projeto Tree Vis, Silva (2011), conseguiu identificar deficiências de cálcio, magnésio e enxofre com uma taxa de acerto de 80, 75,5 e 78%, respectivamente, no estágio 2 de desenvolvimento da cultura.

Gómez Zúñiga (2012) desenvolveu, dentro do projeto Tree Vis, um sistema de detecção de deficiências nutricionais para macronutrientes no milho, desde a aquisição até a classificação de imagens, com ótimos resultados na distinção de níveis desses nutrientes na planta num estágio inicial de desenvolvimento das plantas de milho, permitindo medidas corretivas antes da produtividade ser comprometida, sendo o melhor método Wavelets de

Gabor Multiespectral e fractais para análise de textura colorida, ele concluiu que esse método superou outros testados em mais de 10% na taxa de acerto global de classificação.

O aprimoramento da utilização dos parâmetros de planta já conhecidos, bem como o desenvolvimento de novos parâmetros que auxiliem no manejo da adubação, são fundamentais para contribuir no aumento da eficiência de uso fertilizantes, reduzir o custo de produção da lavoura, otimizar a margem de lucro do produtor e minimizar a contaminação ambiental do solo e da água (RAMBO et al., 2004).

2.5 Objetivos

O objetivo foi avaliar o estado nutricional do milho (*Zea mays* L.) cultivado em casa de vegetação, com deficiência nutricional induzida dos nutrientes, boro (B), ferro (Fe), cobre (Cu) e zinco (Zn) utilizando a metodologia do projeto Tree Vis, comparando os resultados com a análise química foliar, visando validar o diagnóstico de deficiência nutricional através do sistema de visão artificial.

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, no setor das Ciências Agrárias.

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 recomendado população de 55.000 a 65.000 plantas.ha⁻¹. O milho foi cultivado em casa de vegetação, em hidroponia, conduzido em vasos com solução nutritiva visando à indução dos sintomas de deficiência de ferro (Fe), boro (B), zinco (Zn) e cobre (Cu), para possibilitar a utilização do sistema de visão artificial (SVA).

3.2 Descrição do protocolo experimental

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 4x3, sendo quatro tratamentos e três épocas de coleta, com quatro repetições. Os tratamentos estabelecidos para os experimentos foram constituídos por quatro doses dos nutrientes Fe, B, Zn e Cu, sendo T1= omissão completa do nutriente; T2 = 1/5 da dose completa; T3 = 2/5 da dose completa; T4 = dose completa, em três épocas de coleta de folhas (estádio de desenvolvimento da cultura), quando as plantas apresentarem quatro folhas plenamente expandidas (estádio V4); sete folhas (estádio V7) e no florescimento (estádio R1), totalizando 48 unidades experimentais. Em cada coleta foram retirados 16 vasos (quatro repetições de cada tratamento). Ressalta-se que os experimentos foram independentes para cada elemento, desta forma foram conduzidos quatro experimentos em casa de vegetação. Para determinação das doses de Fe, B, Zn e Cu foram feitos, previamente, estudos com base na composição da solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) e Furlani et al. (1999) (Tabela 1).

Sendo assim, a semeadura do milho foi feita em bandejas plásticas com areia lavada, onde as plântulas foram mantidas e irrigadas com água desmineralizada por volta de duas semanas após a emergência (Figura 2).

Após esse período, as plântulas foram selecionadas de acordo com a uniformidade e transplantadas duas para cada unidade experimental, que correspondeu a vaso com capacidade de 3,5L, onde as plantas foram fixadas na tampa do vaso por uma espuma, na altura do colo da planta, permitindo às raízes ficarem imersas na solução nutritiva (Figura 3). Desse modo, as

plantas foram mantidas até a segunda época de coleta (estádio V7), após esse período as plantas foram transferidas para os vasos com 10L de solução nutritiva (Figura 4), onde foram cultivadas até o florescimento.

As soluções nutritivas foram renovadas após 15 dias do transplante, após esse período foram renovadas semanalmente, completando-se quando necessário o nível da solução no vaso com água desmineralizada. Durante o período experimental cada vaso recebeu ar comprimido filtrado e borbulhante durante 10 segundos a cada 30 segundos (Figura 5).

Tabela 1 - Concentração completa de nutrientes na solução nutritiva dos experimentos.

Sal ou Fertilizante	Concentração da solução estoque (g.L ⁻¹ H ₂ O)	Volume da concentração estoque por litro da solução nutritiva
		----- ml.L ⁻¹ -----
1. KH ₂ PO ₄	136,09	1
2. KNO ₃	101,11	5
3. NH ₄ NO ₃	80,04	3
4. Ca (NO ₃) ₂ .5H ₂ O	254,16	2
5. CaCl ₂ .2 H ₂ O	147,01	3
6. MgSO ₄ .7H ₂ O	246,47	2
7. H ₃ BO ₃	3,43	1
8. CuCl ₂	0,111 g	1
9. MnCl ₂ .4H ₂ O	2,88	1
10. H ₂ MoO ₄ H ₂ O	0,06	1
11. ZnCl ₂	0,354	1
13. Solução de Fe-EDDH (6% de Ferro)	57,5	2

Adaptado de Hoagland e Arnon (1950) e Furlani et al. (1999).

Figura 2. Milho na bandeja com areia pronto para o transplante.

Figura 3. Milho sendo transplantado para os vasos de 3,5L.

Figura 4: Plantas já transplantadas nos baldes de 10L.

Figura 5. Sistema de aeração para os vasos dos experimentos.

3.2.1 Experimento do ferro

Foram utilizadas quatro doses de ferro (Fe) correspondentes a zero (dose zero – T1); 11,80 (dose 1/5 – T2); 23,60 (dose 2/5 – T3) e 59 microgramas por litro da solução nutritiva (mg.L^{-1}) (dose completa – T4). As soluções nutritivas foram preparadas com base na Tabela 1.

A semeadura do milho nas bandejas com areia lavada foi realizada em 19-04-2011 e as plantas foram transplantadas para a solução nutritiva em 03-05-2011.

Nesse experimento, o milho foi cultivado do dia 19-04 a 18-07-2011, totalizando 90 dias.

No dia 24-05-2011, quando as plantas estavam no estágio V4 de desenvolvimento, realizou-se a primeira coleta de resultados. Foram amostrados 16 vasos correspondentes à primeira coleta, sendo avaliadas as variáveis biométricas de planta: a) parte aérea; b) raízes; c) folha indicativa do estágio de desenvolvimento V4: folha 4 e d) folha nova; as folhas 4 e nova foram separadas para coleta de imagens e para posterior determinação da massa seca e de macro e micro nutrientes para a folha 4. Para o T1 (dose 0) nessa coleta devido às plantas não estarem no mesmo estágio de desenvolvimento, considerou-se a folha 3 como folha indicativa.

Dia 21-06-2011, quando as plantas estavam no estágio V7 de desenvolvimento (Figura 6) realizou-se a segunda coleta de resultados. Foram amostrados os 16 vasos correspondentes à segunda coleta, sendo avaliadas as variáveis biométricas de planta e separando-se o material vegetal das amostras pelo mesmo critério adotado na primeira coleta, sendo que a folha indicativa nesta coleta foi a folha 7. Para o T1 (dose 0) nessa coleta, devido às plantas terem morrido, considerou-se os dados da primeira coleta para o banco de dados, para fins estatísticos.

No dia 18-07-2011, quando as plantas estavam no estágio R₁(florescimento) realizou-se a terceira coleta de resultados. Foram amostrados os 16 vasos correspondentes à terceira coleta, sendo avaliadas as variáveis biométricas de planta e separando-se o material vegetal das amostras pelo mesmo critério adotado nas coletas anteriores, sendo que a folha indicativa nesta coleta foi a folha imediatamente abaixo e oposta à primeira espiga, também chamada folha diagnóstica para o milho, trata-se da folha recomendada para avaliar o estado nutricional da cultura. Para o T1 (dose 0) nessa coleta, novamente, devido às plantas terem morrido, considerou-se os dados da primeira coleta para o banco de dados para fins estatísticos.

Figura 6. Segunda coleta do experimento do Fe. T1, T2, T3 e T4 da esquerda para a direita.

3.2.2 Experimento do boro

Foram utilizadas quatro doses de boro correspondentes a 0 (dose zero – T1); 0,12 (dose 1/5 – T2); 0,24 (dose 2/5 – T3) e 0,60 mg.L⁻¹ (dose completa – T4). As soluções nutritivas foram preparadas com base na Tabela 1.

A semeadura do milho nas bandejas com areia lavada foi realizada em 22-06-2011 e as plantas foram transplantadas para a solução nutritiva em 12-07-2011. Neste experimento, o milho foi cultivado do dia 22-06 a 16-09-2011, totalizando 86 dias.

No dia 02-08-2011, quando as plantas estavam no estágio V4 de desenvolvimento realizou-se a primeira coleta de resultados. Foram amostrados 16 vasos correspondentes à primeira coleta, sendo avaliadas as variáveis biométricas de planta: a) parte aérea; b) raízes; c) folha indicativa do estágio de desenvolvimento V4: folha 4 e d) folha nova; as folhas 4 e nova foram separadas para coleta de imagens e para posterior determinação da massa seca e de macro e micro nutrientes da folha 4.

Dia 22-08-2011, quando as plantas estavam no estágio V7 de desenvolvimento (Figura 7) realizou-se a segunda coleta de resultados. Foram amostrados os 16 vasos correspondentes à segunda coleta, sendo avaliadas as variáveis biométricas de planta e separando-se o material vegetal das amostras pelo mesmo critério adotado na primeira coleta, sendo que a folha indicativa nesta coleta foi a folha 7.

No dia 16-09-2011, quando as plantas estavam no estágio (R1) (florescimento) (Figura 8) realizou-se a terceira coleta de resultados. Foram amostrados os 16 vasos correspondentes à

terceira coleta, sendo avaliadas as variáveis biométricas de planta e separando-se o material vegetal das amostras pelo mesmo critério adotado nas coletas anteriores, sendo que a folha indicativa nesta coleta foi a folha imediatamente abaixo e oposta à primeira espiga, também chamada folha diagnóstica para o milho, trata-se da folha recomendada para avaliar o estado nutricional da cultura.

Figura 7. Segunda coleta do boro. T1, T2, T3 e T4 da esquerda para direita.

Figura 8. Terceira coleta do boro. T4, T3, T2 e T1 da esquerda para direita.

3.2.3 Experimento do zinco

Foram utilizadas quatro doses de zinco (Zn) correspondentes a 0 (dose zero – T1); 0,034 (dose 1/5 – T2); 0,068 (dose 2/5 – T3) e 0,170 mg.L⁻¹ (dose completa – T4). As soluções nutritivas foram preparadas com base na Tabela 1.

A semeadura do milho nas bandejas com areia lavada foi realizada em 27-07-2011 e as plantas foram transplantadas para a solução nutritiva em 16-08-2011. Neste experimento, o milho foi cultivado do dia 27-07 a 17-10-2011, totalizando 82 dias.

No dia 31-08-2011, quando as plantas estavam no estágio V4 de desenvolvimento (Figura 9), realizou-se a primeira coleta de resultados. Foram amostrados 16 vasos correspondentes à primeira coleta, sendo avaliadas as variáveis biométricas de planta: a) parte aérea; b) raízes; c) folha indicativa do estágio de desenvolvimento V4: folha 4 e d) folha nova; as folhas 4 e nova foram separadas para coleta de imagens e para posterior determinação da massa seca e de macro e micro nutrientes da folha 4.

Dia 19-09-2011, quando as plantas estavam no estágio V7 de desenvolvimento (Figura 10), realizou-se a segunda coleta de resultados. Foram amostrados os 16 vasos correspondentes à segunda coleta, sendo avaliadas as variáveis biométricas de planta e separando-se o material vegetal das amostras pelo mesmo critério adotado na primeira coleta, sendo que a folha indicativa nesta coleta foi a folha 7.

No dia 17-10-2011, quando as plantas estavam no estágio (R1)(florescimento) (Figura 11) realizou-se a terceira coleta de resultados. Foram amostrados os 16 vasos correspondentes à terceira coleta, sendo avaliadas as variáveis biométricas de planta e separando-se o material vegetal das amostras pelo mesmo critério adotado nas coletas anteriores, sendo que a folha indicativa nesta coleta foi a folha imediatamente abaixo e oposta à primeira espiga, também chamada folha diagnóstica para o milho, trata-se da folha recomendada para avaliar o estado nutricional da cultura.

Figura 9. Primeira coleta do zinco. T4, T3, T2 e T1 da esquerda para a direita.

Figura 10. Segunda coleta do zinco. T4, T3, T2 e T1 da esquerda para a direita.

Figura 11. Terceira coleta do zinco. T4, T3, T2 e T1 da esquerda para a direita.

3.2.4 Experimento do cobre

Foram utilizadas quatro doses de cobre (Cu) correspondentes a 0 (dose zero – T1); 0,01 (dose 1/5 – T2); 0,02 (dose 2/5 – T3) e 0,05 mg.L⁻¹ (dose completa – T4). As soluções nutritivas foram preparadas com base na Tabela 1.

A semeadura do milho nas bandejas com areia lavada foi realizada em 24-08-2011 e as plantas foram transplantadas para a solução nutritiva em 08-09-2011. Neste experimento, o milho foi cultivado do dia 24-08 a 07-11-2011, totalizando 75 dias.

No dia 23-09-2011, quando as plantas estavam no estágio V4 de desenvolvimento (Figura 12) realizou-se a primeira coleta de resultados. Foram amostrados 16 vasos correspondentes à primeira coleta, sendo avaliadas as variáveis biométricas de planta: a) parte aérea; b) raízes; c) folha indicativa do estágio de desenvolvimento V4: folha 4 e d) folha nova; as folhas 4 e nova foram separadas para coleta de imagens e para posterior determinação da massa seca e de macro e micro nutrientes da folha 4.

Dia 06-10-2011, quando as plantas estavam no estágio V7 de desenvolvimento (Figura 13) realizou-se a segunda coleta de resultados. Foram amostrados os 16 vasos correspondentes à segunda coleta, sendo avaliadas as variáveis biométricas de planta e separando-se o material vegetal das amostras pelo mesmo critério adotado na primeira coleta, sendo que a folha indicativa nesta coleta foi a folha 7.

No dia 07-11-2011, quando as plantas estavam no estágio (R1) (florescimento) (Figura 14) realizou-se a terceira coleta de resultados. Foram amostrados os 16 vasos correspondentes à terceira coleta, sendo avaliadas as variáveis biométricas de planta e separando-se o material vegetal das amostras pelo mesmo critério adotado nas coletas anteriores, sendo que a folha indicativa nesta coleta foi à folha imediatamente abaixo e oposta à primeira espiga, também chamada folha diagnóstica para o milho, trata-se da folha recomendada para avaliar o estado nutricional da cultura.

Tabela 12. Primeira coleta do cobre. T1, T2, T3 e T4 da esquerda para a direita.

Tabela 13. Segunda coleta do cobre. T1, T2, T3 e T4 da esquerda para a direita.

Tabela 14. Terceira coleta do cobre. T4, T3, T2 e T1 da esquerda para a direita.

3.3 Coleta de imagem para o sistema de visão artificial (SVA)

As coletas de imagens das folhas para o SVA foram realizadas utilizando um scanner de mesa convencional com até 1.200 DPI (“dot per inch” – pontos por polegada) de alta resolução. As imagens foram digitalizadas e armazenadas no computador para posterior processamento.

As coletas das imagens das folhas das plantas para a análise por meio do SVA foram feitas nos estádios V4, V7 e R1(primeira folha abaixo e oposta à primeira espiga). As folhas

digitalizadas foram: folha indicativa do estágio de desenvolvimento (FI): folhas 4, 7 e abaixo e oposta à primeira espiga e folha nova (FN) para todos os experimentos.

Em cada época estabelecida para o estudo foram removidas uma FI e uma FN, de cada planta em cada vaso dos respectivos tratamentos 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 FN por tratamento em cada coleta para o escaneamento.

Após serem removidas, as folhas foram limpas com um papel toalha, para a remoção de poeira ou sujeira que possa de alguma forma interferir na qualidade da imagem. Após a limpeza, as folhas foram colocadas no scanner e digitalizadas a frente e o verso das mesmas (Figura 15).

Figura 15. Coleta da imagem das folhas de milho para o SVA.

3.4 Avaliações do material vegetal

3.4.1 Variáveis biométricas da planta

Em cada uma das três coletas, duas plantas de cada vaso foram coletadas e agrupadas compondo uma única amostra sendo separada em parte aérea, folha indicativa, folha nova e raízes.

As folhas indicativas e as folhas novas, após a coleta das imagens foram lavadas em água desmineralizada. Ressalta-se que na última coleta, as folhas indicativas após as leituras das imagens, como critério de coleta de folha diagnóstica para a cultura do milho, deve ser retirada a nervura central das folhas e separar apenas o terço médio delas para determinações de macro e micro nutrientes. As raízes, por sua vez, foram lavadas em água corrente e, posteriormente, foram lavadas na seguinte ordem: água com detergente neutro, água

desmineralizada, ácido clorídrico (HCl) diluído em água desmineralizada e finalmente água desmineralizada novamente.

Posteriormente, as partes das plantas foram secas em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 65°C, até atingir massa constante, para a determinação da massa seca (MS), sendo posteriormente moídas em moinho de facas do tipo Wiley, com um milímetro de abertura de malha e acondicionados em sacos plásticos para a posterior determinação dos teores dos macro e micronutrientes.

Para a determinação da massa seca da parte aérea total somaram-se a massa dos seus componentes (parte aérea e folha diagnóstica), enquanto a massa das raízes foi obtida diretamente pela pesagem do material.

Os resultados da massa seca da parte aérea e raízes das plantas foram analisados estatisticamente por meio de análise de variância e, nos casos em que o teste F foi significativo, foi realizada a análise de regressão polinomial simples ou múltipla, para os efeitos principais (doses do nutriente) e secundários (épocas de coleta).

3.4.2 Análises químicas

As determinações das concentrações dos nutrientes no tecido vegetal das amostras foram realizadas 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 ácida a quente 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 e a determinação do boro por via seca, segundo métodos descritos por Bataglia et al. (1983).

3.4.3 Acúmulo de nutrientes

O acúmulo de nutrientes na parte aérea e nas raízes foi obtido multiplicando-se as concentrações dos nutrientes em cada componente da parte aérea, parte aérea, folha indicativa do estágio de desenvolvimento e folha nova, pela produção de massa seca de cada componente e das raízes só se multiplicou a concentração do nutriente na amostra pela produção de massa seca da mesma.

3.4.4 O sistema de visão artificial (SVA)

Os estudos para ajustar o melhor método para o SVA para detecção de sintomas de deficiências dos nutrientes Fe, B, Zn e Cu no milho foram realizados no Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo (IFSC - USP), em São Carlos-SP. Com a colaboração do Prof. Dr. Odemir Martinez Bruno, do IFSC-USP, esta etapa desenvolveu métodos e técnicas necessários para a identificação de níveis de deficiência de Fe, B, Zn e Cu na cultura do milho utilizando o SVA.

O estudo de análise de imagens de folha foi constituído por três fases, depois de obtidas as imagens das amostras foram feitas a segmentação, que consiste na subdivisão da imagem em regiões distintas, extração de características e classificação.

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 16). Cada janela de 80x80 pixels extraída foi orientada em posição horizontal e armazenada em formato sem compressão. O programa seleciona de forma aleatória o maior número de janelas possíveis em cada imagem, para que ele possa considerar na base de dados final as 50 “melhores”, excluindo as janelas que tem variação de iluminação, presença de bordas ou nervura central da folha. Essa seleção das janelas é de fundamental importância no estudo, pois serão essas seleções que poderão reunir a melhor qualidade de distinção entre as classes.

Figura 16. Exemplo de segmentação (BACKES; BRUNO, 2009).

Para os estudos foram padronizadas as doses dos nutrientes: T1, T2, T3, T4 onde T1 é a dose 0, T2 é a dose 1/5, T3 é a dose 2/5 e T4 é a dose completa dos nutrientes em estudo. De cada uma das folhas considera-se 3 partes: Base, Meio e Ponta (Figura 17) separando em classes distintas as folhas indicativas (FI) e as folhas novas (FN). No total foram geradas 24 classes e cada uma das classes contém 50 imagens coloridas. O conteúdo de cada uma das classes:

1. BDColoridaBaseFI: Janelas tiradas das bases das folhas indicativas somente, considerando as 4 doses do nutriente, gera as classes: T1, T2, T3 e T4.
2. BDColoridaMeioFI: Janelas tiradas do meio das folhas indicativas somente, considerando as 4 doses do nutriente, gera as classes: T1, T2, T3 e T4.
3. BDColoridaPontaFI: Janelas tiradas das pontas das folhas indicativas somente, considerando as 4 doses do nutriente, gera as classes: T1, T2, T3 e T4.
4. BDColoridaBaseFN: Janelas tiradas das bases das folhas novas somente, considerando as 4 doses do nutriente, gera as classes: T1, T2, T3 e T4.
5. BDColoridaMeioFN: Janelas tiradas do meio das folhas novas somente, considerando as 4 doses do nutriente, gera as classes: T1, T2, T3 e T4.
6. BDColoridaPontaFN: Janelas tiradas das pontas das folhas novas somente, considerando as 4 doses do nutriente, gera as classes: T1, T2, T3 e T4.

Adicionalmente estas 24 classes foram duplicadas gerando 24 classes em escala de cinza (cada nome de classe muda a palavra “colorido” para “cinza”, por exemplo: BDColoridaMeioFIT1 gera BDCinzaMeioFIT1), o objetivo foi testar a importância da cor e textura na classificação.

Figura 17. Exemplo de separação das folhas de milho para a análise de imagens considerando as partes: base, meio e ponta da folha.

Os experimentos para o estudo do SVA foram realizados usando várias técnicas com o objetivo de encontrar a técnica que forneça a melhor separação entre as classes.

As técnicas utilizadas foram:

Dimensão Fractal Volumétrica: gera uma assinatura num espaço bidimensional que caracteriza a imagem analisada, essa assinatura, do ponto de vista de aprendizado de máquina, possui muitos descritores não sendo todos eles úteis para a classificação, assim é necessário o uso de métodos de redução de dimensionalidade (análise canônica, por exemplo) para obter os pontos principais da assinatura com a menor perda de informação possível (BACKES; BRUNO, 2006).

Dimensão Fractal Volumétrica usando Análise Canônica: reduz a dimensionalidade de uma assinatura calculando os pontos mais próximos das assinaturas de uma mesma classe e os mais distantes entre assinaturas de distintas classes gerando como resultados descritores descorrelacionados e de pouca dimensionalidade (BACKES; BRUNO, 2006).

Gabor Wavelets: 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 é que faz essa imagem diferenciar das demais. Assim, os filtros de Gabor geram uma imagem representativa a partir de uma imagem original. Uma das características mais importantes do Gabor é que permite analisar as imagens em distintas escalas e orientações gerando uma representação para cada uma delas (BACKES; BRUNO, 2006).

Cada experimento possui uma justificativa e conclusões dos resultados. Por cada tabela gerada são mostrados as matrizes de confusão dos dois melhores resultados além dos seguintes resultados:

Porcentagem de imagens corretamente classificadas é o dado mais importante, indica a quantidade de imagens que foram identificadas corretamente pelo classificador.

Índice Kappa, segundo Gómez Zúniga (2012) esse índice indica a concordância entre o acerto global e a verdade tomando em consideração que uma parte do acerto global gerado pelo classificador pode ser unicamente obtido pelo acaso. Os valores gerados pelo índice kappa vão até 1,0 e considera o seguinte para avaliar o valor gerado:

- <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

Matriz de confusão: mostra a quantidade de janelas classificadas corretamente (na diagonal principal) e o restante são os erros na classificação. A matriz de confusão é muito importante para conhecer as classes difíceis de classificar.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ferro

4.1.1 Sintomas visuais de deficiência

Nesse experimento os sintomas visuais de deficiência de Fe apareceram no tratamento T1, expressando clorose internerval nas folhas novas e posteriormente generalizada em todas as folhas, ocasionando morte precoce das plantas, não atingindo o estágio V4 (Figura 18a e 18b). Os sintomas também apareceram nas plantas do tratamento T2, mas de forma menos severa.

Figura 18. (a) Sintoma de deficiência de Fe em plantas do tratamento T1 no estágio V3 e (b) planta morta por falta do elemento ainda no mesmo estágio fenológico.

A clorose generalizada na lâmina foliar se justifica, pois segundo Fancelli (2009), o ferro auxilia na síntese de clorofila.

Tais sintomas inicialmente aparecem nas folhas mais jovens, porque o ferro não pode ser prontamente mobilizado das folhas mais velhas, sob deficiência extrema ou período de tempo prolongado as nervuras podem também se tornarem cloróticas, fazendo com que toda a folha torne-se branca (TAIZ; ZEIGER, 2009), desta forma os sintomas observados, principalmente no tratamento T1, estão de acordo com a literatura.

O Fe participa das reações de troca de elétrons (reações redox) na cadeia respiratória, ativador enzimático, metabolismos de auxinas, fotossíntese, respiração, assimilação de N e S,

fixação biológica do nitrogênio, síntese de lignina e suberina, implicando em amarelecimento das folhas e redução do desenvolvimento (AWAD; CASTRO, 1983; MALAVOLTA, 2006; RAIJ, 1991; RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2007; TAIZ; ZEIGER 2009).

4.1.2 Parâmetros de crescimento da planta

Os resultados de produção de massa seca da parte aérea variaram significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de Fe na solução nutritiva dentro das épocas de coleta dois e três, respectivamente, nos estádios de desenvolvimento V7 e R1, e ambos se ajustaram a equação quadrática. (Figura 19).

Na época V7 a máxima produção de MS da parte aérea foi de 27,39 g com 42,71 mg.L⁻¹ de Fe e no estágio R1 foi de 129,62 g com 37,66 mg.L⁻¹ de Fe na solução nutritiva.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 44 e 45 g de M.S. da parte aérea por planta aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, valores que corroboram com os resultados encontrados nesse estudo, na respectiva época.

Figura 19. Produção de massa seca da parte aérea das plantas de milho submetidas a doses de ferro na solução nutritiva em três épocas.

Os resultados de produção de massa seca das raízes variaram significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de Fe na solução nutritiva dentro das épocas de coleta

dois e três, respectivamente, nos estádios de desenvolvimento V7 e R1, e ambos se ajustaram a equação quadrática (Figura 20).

Na época V7 a máxima produção de MS das raízes foi de 9,99 g com $37,66 \text{ mg.L}^{-1}$ de Fe e no estágio R1 foi de 38,22 g com $37,09 \text{ mg.L}^{-1}$ de Fe na solução nutritiva, resultados das doses de Fe muito semelhantes aos encontrados para a máxima produção de M.S. da parte aérea desse experimento.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 12 a 16 g de M.S. de raiz por planta aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, valores semelhantes ao do presente estudo, na respectiva época.

Deve-se ressaltar que as plantas do tratamento T1, ou seja, dose zero de ferro na solução nutritiva, morreram antes da segunda coleta de dados. Por isso, os resultados da primeira coleta são repetidos para fins estatísticos para as épocas V7 e R1.

Figura 20. Produção de massa seca das raízes das plantas de milho submetidas a doses de ferro na solução nutritiva em três épocas.

O conhecimento dos padrões de produção de massa seca possibilita melhor entendimento dos fatores relacionados à nutrição mineral. O acúmulo de massa seca na cultura do milho sofre grande influência do nível de fertilidade do substrato (BÜLL, 1993).

As deficiências de ferro podem ocorrer em solos com pH muito elevado ou onde haja fortes interações com fósforo e manganês (GALLO et al., 1970; 1976)

Batista e Batista (1981) observaram efeito positivo do ferro na produção de biomassa de milho, entretanto em solos brasileiro as respostas da cultura do milho a aplicações de Fe praticamente inexistem, chegando a ocorrer aumento na produção quando houve omissão desse nutriente, provavelmente, por causa de efeito tóxico do ferro no desenvolvimento da cultura (GALRÃO; MESQUITA FILHO, 1981b; GALRÃO, 1984), visto que esse elemento é abundante nos solos agricultáveis do Brasil (MALAVOLTA, 2006).

4.1.3 Relação entre ferro, manganês e zinco

4.1.3.1 Teores na folha indicativa de desenvolvimento do milho

Os teores de ferro no tecido vegetal das folhas indicativas do desenvolvimento do milho responderam significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de Fe na solução nutritiva para a época R1 e para época V4 e V7 ($P < 0,05$).

Nas épocas V4 e R1 os teores de Fe no tecido foliar responderam às doses de Fe segundo um modelo linear e a época V7 se ajustou melhor ao modelo quadrático (Figura 21).

Figura 21. Teor de Fe nas folhas indicativas do desenvolvimento do milho submetido a doses de ferro na solução nutritiva.

O maior teor de Fe na folha indicativa do estágio V7 foi de $508,19 \text{ mg.kg}^{-1}$ observado com $33,89 \text{ mg.L}^{-1}$ de Fe 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.

Os teores de Fe encontrados no tecido foliar estão de acordo com os parâmetros normais de Fe para o milho que podem variar, segundo vários autores, de 20 a 250 mg.kg⁻¹, para uma nutrição adequada (BÜLL, 1993; RAIJ et al., 1997; MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; MARTINEZ et al., 1999; FANCELLI, 2000) e não atingiram o nível de toxicidade, que para Bataglia (1991) é acima de 1000 mg.kg⁻¹.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 188 a 418 mg.kg⁻¹ de Fe no tecido foliar aos 60 D.A.E., quando o milho estava em V8, estando similar aos resultados do presente trabalho.

Os teores de manganês no tecido vegetal das folhas indicativas do desenvolvimento do milho responderam significativamente ($P < 0,01$) ao incremento da dose de Fe na solução nutritiva para a época V4 e para época V7 ($P < 0,05$), tendo os teores de Mn dentro das duas épocas se ajustando ao modelo quadrático (Figura 22).

Figura 22. Teor de Mn nas folhas indicativas do desenvolvimento do milho submetido a doses de ferro na solução nutritiva.

O maior teor de Mn na folha indicativa do estágio V4 foi 280,57 mg.kg⁻¹, observado com 36,73 mg.L⁻¹ de Fe e no estágio V7 de 269,60 mg.kg⁻¹ com 38,13 mg.L⁻¹ de Fe na solução nutritiva.

Os teores de Mn encontrados no tecido foliar estão de acordo com os parâmetros normais de Mn para o milho que podem variar, segundo vários autores, de 20 a 200 mg.kg⁻¹, para uma nutrição adequada (BÜLL, 1993; RAIJ et al., 1997; MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; MARTINEZ et al., 1999; FANCELLI, 2000). Não foi relatado o teor de toxidez de Mn para o milho, mas no caso da cana de açúcar e do arroz é acima de 600 mg.kg⁻¹ (BORKERT; PAVAN; BATAGLIA, 2001). Para Gupta e Gupta (1998) a faixa de teor tóxico de manganês está entre 400 a 7000 mg.kg⁻¹.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 19 a 23 mg.kg⁻¹ de Mn no tecido foliar aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, valores muito menores dos encontrados nesse trabalho, na respectiva época.

Esses resultados demonstram que não houve prejuízo na disponibilidade do Mn para a absorção radicular em função das doses de Fe utilizadas.

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 Fe na solução nutritiva para a época V4 e para época V7 ($P < 0,05$), tendo os teores de Zn dentro da primeira época ajustando-se ao modelo quadrático e a segunda época ao modelo linear (Figura 23).

O maior teor de Zn na folha indicativa do estágio V4 foi de 86,24 mg.kg⁻¹, observado com 31,91 mg.L⁻¹ de Fe na solução nutritiva.

Os teores de Zn encontrados no tecido foliar estão de acordo com os parâmetros normais de Zn para o milho que podem variar, segundo vários autores, de 15 a 100 mg.kg⁻¹, para uma nutrição adequada (BÜLL, 1993; RAIJ et al., 1997; MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; MARTINEZ et al., 1999; FANCELLI, 2000). Para Gupta e Gupta (1998) a faixa de teor tóxico de zinco está entre 95 a 340 mg.kg⁻¹, já em plantas tolerantes pode-se encontrar até 8000 mg.kg⁻¹ de Zn, sendo para a maioria das culturas encontrado em uma faixa de 200 a 500 mg.kg⁻¹ (RÖMHELD; MARSCHNER, 1991).

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 8 a 12,5 mg.kg⁻¹ de Zn no tecido foliar aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, valores semelhantes aos encontrados nesse estudo na ocorrência da época V7.

Esses resultados demonstram que não houve prejuízo na disponibilidade do Zn para a absorção radicular em função das doses de Fe utilizadas, uma vez que ocorreram acréscimos com o aumento do Fe na solução nutritiva, provavelmente mantendo a mesma relação entre esses elementos.

Figura 23. Teor de Zn nas folhas indicativas do desenvolvimento do milho submetido a doses de ferro na solução nutritiva.

4.1.3.2 Acúmulo de ferro, manganês e zinco na parte aérea e nas raízes

O acúmulo de ferro na parte aérea do milho respondeu significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de Fe na solução nutritiva para as épocas V7 e R1. Ambas ajustando-se ao modelo quadrático (Figura 24).

Na época V7 o maior acúmulo de Fe na parte aérea do milho foi de 10364,33 μg na ocorrência da dose de 42,75 mg.L^{-1} de Fe e no estágio R1 de 33036,33 μg com 43,24 mg.L^{-1} de Fe na solução nutritiva.

O acumulado de Fe encontrado na parte aérea do milho está de acordo com Andrade et al. (1975), que encontraram 1610 gramas por hectare de Fe em plantas com 100 dias após a emergência, o que dá aproximadamente 27000 μg por planta na parte aérea, visto que se tem em média 60000 plantas por hectare.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 14000 e 18000 μg de Fe na parte aérea por planta aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, resultados semelhantes aos encontrados nesse presente estudo, na respectiva época.

O acúmulo de ferro nas raízes do milho respondeu significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de Fe na solução nutritiva para as épocas V7 e R1. Ambas ajustando-se ao modelo linear (Figura 25).

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 18000 a 24000 μg de Fe por planta nas raízes aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, valores semelhantes aos encontrados nesse presente trabalho, na respectiva época.

O acumulado de Fe encontrado nas raízes do milho está de acordo com o encontrado na parte aérea da planta até a o tratamento T3 (23,5 mg.L^{-1} de Fe) na época R1, o que evidencia que a partir dessa dose ocorreu acúmulo muito alto, o que pode ter prejudicado o desenvolvimento da planta, como visto nas Figura 19 e 20.

Figura 24. Acúmulo de ferro na parte aérea das plantas de milho submetido a doses de ferro na solução nutritiva.

O acúmulo de Mn na parte aérea do milho respondeu significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de Fe na solução nutritiva para as épocas V7 e R1. Ambas ajustando-se ao modelo quadrático (Figura 26).

O máximo acumulado de Mn na parte aérea do milho na época V7 foi de 5456,42 μg e ocorreu com 42,67 mg.L^{-1} de Fe e no estágio R1 com 40,09 mg.L^{-1} de Fe na solução nutritiva foi de 22921,66 μg .

O acumulado de Mn encontrado na parte aérea do milho não está de acordo com Andrade et al. (1975), que encontraram 656 gramas por hectare de Mn em plantas com 80 dias após a emergência, o que dá, aproximadamente, 11000 μg por planta na parte aérea, visto que se tem, em média, 60000 plantas por hectare, nesse presente trabalho encontrou-se quase o dobro de Mn acumulado na parte aérea das plantas.

Figura 25. Acúmulo de ferro nas raízes das plantas de milho submetido a doses de ferro na solução nutritiva.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 1000 a 1600 µg de Mn por planta na parte aérea aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, o que é menos da metade do encontrado nesse estudo, na respectiva época.

O acúmulo de aproximadamente 20000 µg por planta na parte aérea de Mn, nos tratamentos T3 e T4, na época R1, demonstra maior acúmulo em função de um maior crescimento da planta em função da dose mais adequada de Fe para a nutrição da planta.

Esses resultados demonstram que houve prejuízo no acúmulo de Mn na parte aérea da planta em função da maior dose de Fe utilizada.

O acúmulo de Mn nas raízes do milho respondeu significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de Fe na solução nutritiva para as épocas V7 e R1, ambas ajustando-se ao modelo quadrático (Figura 27), exatamente como na parte aérea, só que com menos da metade da quantidade de Mn no tecido radicular em relação à parte aérea, demonstrando assim que esse se acumula em maior quantidade nos tecidos da parte aérea, possivelmente por fazer parte de reações importantes do processo fotossintético.

Na época V7 o máximo acumulado de Mn nas raízes foi de 2154,26 µg com 40,26 mg.L⁻¹ de Fe na solução nutritiva e na época R1 foi 6719,34 µg com 37,43 mg.L⁻¹ de Fe.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 210 a 600 µg de Mn por planta nas raízes aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, valores muito abaixo dos encontrados nesse trabalho.

Figura 26. Acúmulo de manganês na parte aérea das plantas de milho submetido a doses de ferro na solução nutritiva.

Figura 27. Acúmulo de manganês nas raízes das plantas de milho submetido a doses de ferro na solução nutritiva.

O acúmulo de Zn na parte aérea do milho respondeu significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de Fe na solução nutritiva para as épocas V7 e R1, ambas ajustando-se ao modelo quadrático (Figura 28).

O máximo acumulado de Zn na parte aérea do milho na época V7 foi de 2574,98 μg e ocorreu com 40,56 mg.L^{-1} de Fe e no estágio R1 com 38,84 mg.L^{-1} de Fe na solução nutritiva foi de 11844,75 μg .

O acumulado de Zn encontrado na parte aérea do milho está de acordo com Andrade et al. (1975), que encontraram 332 gramas por hectare de Zn em plantas com 80 dias após a emergência, o que dá, aproximadamente, 5500 μg por planta na parte aérea, visto que se tem, em média, 60000 plantas por hectare.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 350 a 600 μg de Zn por planta (P.A.) aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, valores abaixo dos encontrados nesse presente trabalho, na respectiva época.

O acúmulo de aproximadamente 10000 μg por planta na parte aérea de Zn, nos tratamentos T3 e T4, na época R1, demonstra um maior acúmulo em função de um maior crescimento da planta em função da dose mais adequada de Fe para a nutrição da planta.

Esses resultados demonstram que houve prejuízo no acúmulo de Zn em função da maior dose de Fe utilizada.

O acúmulo de Zn nas raízes do milho respondeu significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de Fe na solução nutritiva para as épocas V4, V7 e R1. Todas ajustando-se ao modelo quadrático (Figura 29), assim como na parte aérea, só que com, aproximadamente, 80% a menos de Zn nas raízes do que nos tecidos vegetativos, possivelmente por este estar ligado a enzimas que são utilizadas frequentemente nas células foliares, como a biossíntese de clorofila (TAIZ; ZEIGER, 2009).

Nas épocas V4, V7 e R1 os valores máximos acumulado de Zn nas raízes foram de 242,16, 485,62 e 1567,32 μg com doses de Fe na solução nutritiva de 39,42, 43,10 e 38,10 mg.L^{-1} , respectivamente.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 250 a 440 μg de Zn por planta nas raízes aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, valores semelhantes aos encontrados nesse trabalho, na respectiva época.

Segundo Malavolta (2006), dependendo da planta pode ocorrer correlação positiva, negativa ou nenhuma posição entre Fe x Mn e Zn, ao que parece nesse presente trabalho, que no milho cultivado em hidroponia essa relação realmente não trás efeito antagônico ou sinérgico entre os três elementos, a não ser na dose máxima de Fe testada.

Figura 28. Acúmulo de zinco na parte aérea das plantas de milho submetido a doses de ferro na solução nutritiva.

Figura 29. Acúmulo de zinco nas raízes das plantas de milho submetido a doses de ferro na solução nutritiva.

4.1.4 Sistema de visão artificial (SVA) na identificação nutricional do milho em relação ao ferro

Segundo a equipe do IFSC-USP de São Carlos, a técnica que mostrou ser de melhor precisão para diferenciar as classes de imagens, ou seja, as imagens de cada tratamento em diferentes partes da folha, do experimento do ferro, nas três épocas de amostragem, foi

Wavelets de Gabor Multiespectral e fractais para análise de textura colorida, que 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 é que faz essa imagem diferenciar das demais. Assim, os filtros de Gabor geram uma imagem representativa a partir de uma imagem original. Uma das características mais importantes do Gabor é que permite analisar as imagens em distintas escalas e orientações gerando uma representação para cada uma delas (BACKES; BRUNO, 2006). Concordando com Gómez Zúñiga (2012), do mesmo IFSC-USP, que concluiu que esse método superou outros testados em mais de 10% na taxa de acerto global de classificação.

No estágio V4 de desenvolvimento do milho, foram feitas análises pelo SVA das classes: base das folhas novas (Quadro 1), contendo apenas dois tratamentos; meio das folhas novas (Quadro 2), contendo os quatro tratamentos; ponta das folhas novas (Quadro 3); meio das folhas indicativas do estágio de desenvolvimento V4 (Quadro 4) e ponta das folhas indicativas de estágio de desenvolvimento V4 (Quadro 5).

Esses resultados mostram a melhor probabilidade de acerto global (P.A.G.) de 98,3%, com um índice Kappa “quase perfeito” para o reconhecimento da deficiência de ferro em plantas de milho no estágio V4 na base das folhas novas, quando utilizado apenas dois tratamentos, T1 e T2. Com todos os tratamentos o melhor resultado foi na ponta das folhas indicativas do estágio de desenvolvimento com PAG de 66,5% e índice Kappa “moderado” (Tabela 2).

Esses resultados demonstram que o sistema confundiu os tratamentos T2, T3 e T4, o que é compreensível, visto que esses apresentaram poucas diferenças visuais, químicas e biométricas. Já quando comparado T1 com apenas outro tratamento, no caso T2, o sistema apresentou excelente identificação.

No estágio V7 de desenvolvimento do milho, foram feitas análises pelo SVA das classes: base das folhas novas (Quadro 6); ponta das folhas novas (Quadro 7) e meio das folhas indicativas do estágio de desenvolvimento V7 (Quadro 8).

Esses resultados mostram que o sistema continua identificando o tratamento T1 muito bem, independente da classe analisada, mas igual à época V4 ele continua confundindo muito os outros tratamentos, o que parece normal, como explicado na época anterior. O melhor resultado foi na classe de imagens pontas das folhas novas com PAG de 67,5% e índice Kappa “moderado” (Tabela 3).

T1	T2	
97,4	2,6	T1
0,8	99,2	T2

Quadro 1. Matriz de confusão da base das folhas novas na primeira coleta dos tratamentos de ferro.

T1	T2	T3	T4	
98,2	0,6	0,4	0,8	T1
2,0	42,8	31,0	24,2	T2
1,8	36,8	35,0	26,4	T3
0,4	32,2	32,8	34,6	T4

Quadro 2. Matriz de confusão do meio das folhas novas na primeira coleta dos tratamentos de ferro.

T1	T2	T3	T4	
94,8	1,8	1,4	2,0	T1
2,0	40,6	36,8	20,6	T2
1,8	33,4	42,4	22,4	T3
1,0	34,2	30,2	34,6	T4

Quadro3. Matriz de confusão da ponta das folhas novas na primeira coleta dos tratamentos de ferro.

T1	T2	T3	T4	
98,0	1,0	1,0	0,0	T1
0,0	44,4	34,0	21,6	T2
0,6	39,4	40,8	19,2	T3
0,0	25,0	23,6	51,4	T4

Quadro 4. Matriz de confusão do meio das folhas indicativas do estágio V4 de desenvolvimento do milho dos tratamentos de ferro.

T1	T2	T3	T4	
99,6	0,0	0,4	0,0	T1
0,0	54,6	19,8	25,6	T2
0,2	27,6	53,8	18,4	T3
0,0	29,6	11,8	58,6	T4

Quadro 5. Matriz de confusão da ponta das folhas indicativas do estágio V4 de desenvolvimento do milho dos tratamentos de ferro.

Tabela 2 - Resultados da visão artificial na identificação dos tratamentos com doses de ferro nas folhas novas e indicativas do estágio V4 de desenvolvimento.

Wavelets Gabor Multiespectral e fractais Colorido	Probabilidade de acerto global (PAG)	Índice Kappa
BaseFN	98,300	0,960
MeioFN	52,650	0,369
PontaFN	53,100	0,375
MeioFI	58,650	0,449
PontaFI	66,650	0,555

T1	T2	T3	T4	
97,8	1,4	0,4	0,4	T1
1,4	47,0	35,4	16,2	T2
0,0	37,8	40,2	22,0	T3
0,4	17,0	19,8	62,8	T4

Quadro 6. Matriz de confusão do meio das folhas novas na segunda coleta dos tratamentos de ferro.

T1	T2	T3	T4	
95,0	0,4	2,6	2,0	T1
2,0	53,0	24,2	20,8	T2
1,0	21,8	48,0	29,2	T3
0,2	11,6	14,2	74,0	T4

Quadro 7. Matriz de confusão da ponta das folhas novas na segunda coleta dos tratamentos de ferro.

T1	T2	T3	T4	
98,6	0,8	0,4	0,2	T1
0,0	44,4	26,2	29,4	T2
0,0	31,2	31,2	37,6	T3
0,0	29,4	25,6	45,0	T4

Quadro 8. Matriz de confusão do meio das folhas indicativas do estágio V7 de desenvolvimento do milho dos tratamentos de ferro.

No estágio R1 de desenvolvimento do milho, foram feitas análises pelo SVA das classes: base das folhas novas (Quadro 9); ponta das folhas novas (Quadro 10) e meio das folhas indicativas do estágio de desenvolvimento R1 (Quadro 11).

Tabela 3 - Resultados da visão artificial na identificação dos tratamentos com doses de ferro nas folhas novas e indicativas do estágio V7 de desenvolvimento.

Wavelets Gabor Multiespectral e fractais Colorido	Probabilidade de acerto global (PAG)	Índice Kappa
MeioFN	61,950	0,493
PontaFN	67,500	0,567
MeioFI	54,800	0,397

T1	T2	T3	T4	
97,2	2,8	0,0	0,0	T1
3,0	94,6	2,0	0,4	T2
0,0	0,4	43,6	56,0	T3
0,0	0,0	25,4	74,6	T4

Quadro 9. Matriz de confusão do meio das folhas novas na terceira coleta dos tratamentos de ferro.

T1	T2	T3	T4	
94,8	5,2	0,0	0,0	T1
3,6	93,0	0,8	2,6	T2
0,0	0,0	47,8	52,2	T3
0,0	0,0	38,2	61,8	T4

Quadro 10. Matriz de confusão da ponta das folhas novas na terceira coleta dos tratamentos de ferro.

T1	T2	T3	T4	
99,0	0,6	0,2	0,2	T1
0,0	39,4	26,0	34,6	T2
0,0	29,2	40,0	30,8	T3
0,0	35,2	23,6	41,2	T4

Quadro 11. Matriz de confusão do meio das folhas indicativas do estágio R1 de desenvolvimento do milho dos tratamentos de ferro.

O melhor resultado foi o da classe meio das folhas novas com PAG de 77,505 e índice Kappa “confiável”. Esses resultados mostram que o sistema continua identificando o tratamento T1 muito bem, independente da classe analisada, mas igual à época V4 e V7 ele continua confundindo muito os outros tratamentos, nesse caso principalmente T3 e T4, o que parece normal, como explicado nas épocas anteriores (Tabela 4).

Tabela 4 – Resultados da visão artificial na identificação dos tratamentos com doses de ferro nas folhas novas e indicativas do estágio R1 de desenvolvimento.

Wavelets Gabor Multiespectral e fractais Colorido	Probabilidade de acerto global (PAG)	Índice Kappa
MeioFN	77,500	0,700
PontaFN	74,350	0,658
MeioFI	54,900	0,399

Os resultados das três épocas de coleta são praticamente idênticos, o que parece ser perfeita mente normal, como já discutido, e principalmente, pelas imagens do T1 serem sempre as mesmas, já que as plantas desse tratamento morreram antes da segunda coleta e por isso as imagens foram sendo repetidas, como padrão de deficiência para o sistema.

Os tratamentos que o sistema mais confundiu foram o T3 e o T4, isso não parece ser confusão, pois realmente esses tratamentos não apresentaram diferenças significativas do ponto de vista nutricional. Se esses dois tratamentos fossem tratados como uma única classe para o sistema, com certeza a probabilidade de acerto melhoraria consideravelmente.

É interessante o sistema ter tido sempre as melhores classificações nas imagens das folhas novas, pelo fato do ferro ser um nutriente de baixa mobilidade dentro das plantas e por isso seus sintomas de deficiência aparecem primeiramente nas folhas novas, isso indica que pelo menos o sistema está distinguindo corretamente a folha mais sintomática.

Notou-se também que com a evolução do estado fenológico das plantas o índice de acerto também aumentou sendo o melhor de todos os resultados observado na época R1 na classe meio das folhas novas com probabilidade de acerto de 97,2%, 94,6%, 43,6% e 74,6%, respectivamente nos tratamentos T1, T2, T3 e T4 e com índice Kappa “confiável”.

4.2 Boro

4.2.1 Sintomas visuais de deficiência

Nesse experimento os sintomas visuais de deficiência de B apareceram no tratamento T1, com clorose internerval primeiramente nas folhas novas e depois de forma generalizada, posteriormente evoluíram para necroses foliares a partir da ponta das folhas novas, vincos entre as nervuras paralelas, perda da dominância apical, emissão de perfilhos laterais causado

pela perda da dominância apical e morte do sistema caulinar (Figura 30 a, b, c, d e e), esses sintomas começaram a ficar aparentes a partir do estágio V4 e foram se agravando até o colapso total da planta aos 66 dias após o início do tratamento, ou seja, com 86 dias após a semeadura. Os sintomas também apareceram nas plantas do tratamento T2, mas de formas não tão evidentes, caracterizando-se, somente pelos sintomas foliares.

Figura 30. Plantas com sintomas de deficiência de boro. (a) Sintoma de deficiência de B nas folhas das plantas do tratamento T1 no estágio V5, (b) vincos internervais causados pela falta de boro, (c) perda da dominância apical a partir do estágio V5, (d) emissão de perfilhos laterais e (e) morte do sistema caulinar em plantas do T1 aos 86 dias após o início do tratamento.

Dependendo da espécie e da idade da planta a deficiência de boro pode apresentar uma variedade de sintomas (SHELP, 1993).

Um sintoma característico da deficiência de B é a necrose de folhas jovens e gemas terminais. A necrose das folhas jovens ocorre principalmente na base da lamina foliar. A dominância apical pode ser perdida, tornando a planta altamente ramificada; entretanto, os ápices terminais dos ramos logo se tornam necróticos devido à inibição da divisão celular. O

boro é considerado imóvel dentro das plantas, por isso os sintomas de deficiência aparecem nas vegetações novas (TAIZ; ZEIGER, 2009).

Para Raven et al. (2007) o boro ainda influencia a utilização do cálcio e o primeiro sintoma de deficiência é a falha no alongamento das raízes; folhas jovens verdes claras na base; as folhas tornam-se enroladas e o sistema caulinar morre, começando da gema terminal.

Segundo Lima Filho e Malavolta (1998) a falta de boro leva a má germinação do grão de pólen no florescimento e na frutificação, no milho causa a esterilidade.

Sintomas de deficiência de B no milho são folhas avermelhadas no final do ciclo; espigas pequenas e falhas na granação; grãos nas extremidades das espigas com aspecto de cortiça (FANCELLI; 2000), ainda segundo Fancelli (2009) podem aparecer vincos salientes no limbo foliar acompanhando as nervuras.

Ainda segundo vários autores o B é componente da estrutura e funcionamento da membrana plasmática; síntese e transporte de carboidratos; controle hormonal, crescimento e reprodução (AWAD; CASTRO, 1983; MALAVOLTA, 2006; RAIJ, 1991; RAVEN; EVERT E EICHHORN, 2007; TAIZ; ZEIGER 2009).

4.2.2 Parâmetros de crescimento da planta

Os resultados de produção de massa seca da parte aérea variaram significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de B na solução nutritiva dentro das épocas de coleta dois e três, respectivamente, nos estádios de desenvolvimento V7 e R1, e ambos se ajustaram a equação quadrática (Figura 31).

Na época V7 a máxima produção de MS da parte aérea foi de 25,08 g, observada com dose de B na solução nutritiva de 0,39 mg.L^{-1} e na época R1 foi de 134,46 g com 0,350, 39 mg.L^{-1} de B.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 44 e 45 g de MS na parte aérea por planta aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, resultados próximos dos obtidos nesse presente estudo na época V7.

Os resultados de produção de massa seca das raízes variaram significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de B na solução nutritiva somente para a época de coleta três, no estádio de desenvolvimento R1, e se ajustou a equação quadrática (Figura 32).

A máxima produção de MS das raízes foi 39,29 g, observada na época R1 com dose de B na solução nutritiva de 0,35 mg.L^{-1} , muito semelhante ao encontrado na parte aérea..

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 12 a 16 g de MS de raiz por planta aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, valores similares aos encontrados nesse trabalho.

Figura 31. Produção de massa seca da parte aérea das plantas de milho submetidas a doses de boro na solução nutritiva em três épocas.

Em solos brasileiros, principalmente no cerrado, são muito frequentes as condições que favorecem a diminuição da quantidade de boro disponível para as plantas (MAGALHÃES; MONNERAT, 1978).

A deficiência de B pode ocorrer em plantas cultivadas em solos com pH (H₂O) entre 4,0 e 8,0, pois esse se encontra na solução do solo na forma de ácido bórico (H₃BO₃), o que explica a facilidade com que lixívia, em pH acima de 8,0 o ácido bórico por hidrólise passa para a forma de borato (B(OH)₄). Ele pode ser adsorvido pelos óxidos e hidróxidos de Fe e Al, minerais de argila, hidróxidos de Mg dos minerais ferromagnesianos (LOUÉ, 1993).

Segundo Fancelli (2009), o B é um dos micronutrientes que tem merecido especial atenção na cultura do milho. Por esse apresentar baixa mobilidade na planta deve ser aplicado no solo na semeadura entre 0,2 a 0,8 kg.ha⁻¹ como adubação corretiva, objetivando altas produtividades, utilizando fontes de média a baixa solubilidade, como ulexita e seus derivados, para diminuir as perdas por lixiviação.

Fancelli (2008) obteve resultado satisfatório no aumento da massa do grão do milho com a aplicação de boro via foliar por ocasião do florescimento (no início da emissão do pendão).

Figura 32. Produção de massa seca das raízes das plantas de milho submetidas a doses de boro na solução nutritiva em três épocas.

4.2.3 Relação entre boro, cálcio e zinco

4.2.3.1 Teores na folha indicativa de desenvolvimento do milho

Os teores de boro no tecido vegetal das folhas indicativas do desenvolvimento do milho responderam significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de B na solução nutritiva para as épocas V7 e R1, ambas se ajustando ao modelo quadrático (Figura 33).

Na época V7 o menor teor de boro no tecido foliar foi de 4,81 mg.kg⁻¹, com a dose de 0,03 mg.L⁻¹ de B na solução nutritiva, ao passo que o incremento de 0,12 mg.L⁻¹ de B aumenta o teor de B no tecido foliar em 5,04 mg.kg⁻¹. Na época R1 o menor teor de boro no tecido foliar foi de 3,18 mg.kg⁻¹, com a dose de 0,08 mg.L⁻¹ de B na solução nutritiva, ao passo que o incremento de 0,12 mg.L⁻¹ de B aumenta o teor de B no tecido foliar em 5,30 mg.kg⁻¹.

Os teores de B encontrados no tecido foliar estão de acordo com os parâmetros normais de B para o milho que podem variar, segundo vários autores, de 4 a 30 mg.kg⁻¹, para uma nutrição adequada (BÜLL, 1993; RAIJ et al., 1997; MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; MARTINEZ et al., 1999; FANCELLI, 2000).

Segundo Goldberg (1997), a faixa de concentração entre a deficiência e a toxicidade de B é a menor, se comparada a dos outros nutrientes. Para Gupta e Gupta (1998) a faixa de

teor tóxico de boro está entre 10 a 50 mg.kg⁻¹ e para plantas tolerantes a boro pode ser acima de 200 mg.kg⁻¹.

Figura 33. Teor de B nas folhas indicativas do desenvolvimento do milho submetido a doses de boro na solução nutritiva.

A tolerância relativa das plantas à toxidez de B parece depender da velocidade de transporte das raízes para a parte aérea, os sintomas de excesso iniciam-se com clorose malhada e depois manchas necróticas, coincidindo com as regiões das folhas em que há maior transpiração. Nas regiões que aparecem anormalidades visíveis pelo excesso, o teor de boro é de 100 a 1500 mg.kg⁻¹ e nas áreas necrosadas esses teores passam de 1500 mg.kg⁻¹ (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

Trabalhos desenvolvidos por Mozafar (1987) demonstraram a ação do boro na formação de espigas na cultura do milho, através da relação entre o teor foliar de boro e a produção de matéria seca total e de espigas. A produção máxima foi alcançada com o teor foliar de boro em torno de 18 mg.kg⁻¹.

De forma geral as respostas à aplicação de boro na cultura do milho não são consistentes (BÜLL, 1993), mas Fancelli (2009) ressalta que o boro, assim como outros micronutrientes, tem merecido atenção especial na cultura do milho, visando altas produtividades. O que parece concordar com Fuchring (1966 apud WOODRUFF et al., 1987) que mostrou que doses elevadas de B reduziram a produção de grãos em cultivos com populações de 40000 a 50000 plantas.ha⁻¹, mas aumentaram as produções em culturas com

populações de 80000 a 90000 plantas.ha⁻¹, ainda segundo Woodruff et al. (1987), isso ilustra o estreito limite entre os níveis de toxidez e de deficiência de boro para a cultura do milho.

O boro é reconhecidamente o micronutriente cuja deficiência é mais comum no Brasil, assim como o zinco (MALAVOLTA, 2006).

Os teores de cálcio (Ca) no tecido vegetal das folhas indicativas do desenvolvimento do milho responderam significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de B na solução nutritiva para a época V7 e R1, dentro das duas épocas se ajustado ao modelo quadrático, tendo os teores de Ca diminuídos conforme aumentava a dose de B (Figura 34).

Na época V7 o teor mais adequado de Ca no tecido foliar foi de 9,33 g.kg⁻¹, observado na dose de 0,38 mg.L⁻¹ de B na solução nutritiva e na época R1 foi de 14,83 g.kg⁻¹ com a mesma dose de B que no estágio V7.

Esses resultados confirmam a interação do boro com o cálcio, mas não evidenciando a inibição não competitiva do segundo causada pela elevação da dose do primeiro, visto que a falta de B propiciou forte aumento no teor de Ca na folha do milho, já as doses dos tratamentos T2, T3 e T4 pouco influenciaram nos teores do cálcio no tecido foliar.

Em condições de campo, Malavolta (2006) citou a elevação do pH do solo, através da aplicação de calcário, como fator de indisponibilização de boro para as plantas.

Figura 34. Teor de Ca nas folhas indicativas do desenvolvimento do milho submetido a doses de boro na solução nutritiva.

Os teores de Ca, encontrados no tecido foliar, estão acima dos parâmetros para o milho que podem variar segundo vários autores, de 2,3 a 10 g.kg⁻¹, para uma nutrição adequada

(BÜLL, 1993; RAIJ et al., 1997; MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; MARTINEZ et al., 1999; FANCELLI, 2000).

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 0,9 a 7,4 g.kg^{-1} de cálcio no tecido foliar aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, valores próximos aos encontrados nesse trabalho.

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 B na solução nutritiva para a época V7 e R1, tendo os teores de Zn dentro das duas épocas se ajustado ao modelo quadrático (Figura 35). Os teores de Zn diminuíram conforme aumentava a dose de B, assim como ocorreu com o cálcio.

Na época V7 o teor mais baixo de Zn no tecido foliar e mais próximo dos encontrados na literatura foi de 113,51 mg.kg^{-1} , observado na dose de 0,37 mg.L^{-1} de B na solução nutritiva e na época R1 foi de 111,97 mg.kg^{-1} com a dose de 0,38 mg.L^{-1} de B. Não houve diferença significativa entre os teores de Zn nas épocas V7 e R1, o que também se averigua no trabalho de Silva (2011).

Os teores de Zn, encontrados no tecido foliar, estão acima dos parâmetros de Zn para o milho que podem variar, segundo vários autores, de 15 a 100 mg.kg^{-1} , para uma nutrição adequada (BÜLL, 1993; RAIJ et al., 1997; MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; MARTINEZ et al., 1999; FANCELLI, 2000). Para Gupta e Gupta (1998) a faixa de teor tóxico de zinco esta entre 95 a 340 mg.kg^{-1} , já em plantas tolerantes pode-se encontrar até 8000 mg.kg^{-1} de Zn, sendo para a maioria das culturas encontrado em uma faixa de 200 a 500 mg.kg^{-1} (RÖMHELD; MARSCHNER, 1991).

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 8 a 12,5 mg.kg^{-1} de Zn no tecido foliar aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, valores abaixo dos encontrados nesse estudo.

Esses resultados confirmam a interação do boro com o zinco, o que está de acordo com Malavolta, Vitti e Oliveira (1997), mas não evidenciando a inibição não competitiva do segundo causada pela elevação da dose do primeiro, assim como no caso do cálcio, visto que a falta de B propiciou forte aumento no teor de Zn na folia do milho, já as doses dos tratamentos T2, T3 e T4 pouco influenciaram nos teores do Zn no tecido foliar.

Figura 35. Teor de Zn nas folhas indicativas do desenvolvimento do milho submetido a doses de boro na solução nutritiva.

4.2.3.2 Acúmulo de boro, cálcio e zinco na parte aérea e nas raízes

O acúmulo de boro na parte aérea do milho respondeu significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de B na solução nutritiva apenas na época R1, ajustando-se ao modelo quadrático (Figura 36).

O máximo acúmulo de B na parte aérea do milho na época R1 foi de 757,26 μg por planta, observado na dose de 0,40 mg.L^{-1} de B na solução nutritiva.

O acumulado de B encontrado na parte aérea do milho não está de acordo com Phillips e Lessman (1972 apud GAMBOA, 1980), que encontraram 170 gramas de B por hectare na parte aérea do milho de alta produtividade de grão (9,1 t.ha^{-1}), o que dá aproximadamente 2700 μg por planta na parte aérea, visto que se tem em média 60000 plantas por hectare. Nesse presente trabalho o máximo acumulado na parte aérea foi de aproximadamente 750 μg por planta e a partir daí com a elevação das doses de B na solução nutritiva o acúmulo diminuiu, demonstrando ser esse o ponto de máximo no estágio R1 com uma produção de massa seca de 135 g por planta. Esses fatos se explicam pelo trabalho de Mozafar (1987) que alcançou produção de massa seca total de aproximadamente 250 g por planta próximo ao momento da colheita dos grãos, com teor de boro na folha na média de 18 mg.kg^{-1} , assim como neste trabalho. A diferença está na época amostral, ao que parece que quanto mais a planta crescer mais ela acumulara de boro na parte aérea.

Figura 36. Acúmulo de boro na parte aérea das plantas de milho submetido a doses de boro na solução nutritiva.

O acúmulo de boro nas raízes do milho respondeu significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de B na solução nutritiva para as épocas V7 e R1, ambas ajustando-se ao modelo quadrático (Figura 37).

O máximo acumulado de B nas raízes do milho nas épocas V7 e R1 foram 119,90 e 503,72 mg.kg^{-1} , respectivamente, com as doses na época V7 de 0,47 e na época R1 de 0,45 mg.L^{-1} de B na solução nutritiva.

Os acumulados de B encontrados nas raízes do milho são muito semelhantes ao encontrados na parte aérea do milho, tal fato demonstra a importância desse nutriente em ambas as partes do vegetal.

Esses resultados demonstram que a elevação da dose de boro acima de 0,38 mg.L^{-1} , pode prejudicar o desenvolvimento da parte aérea do milho. As Figuras 31 e 32, respectivamente, produção de massa seca da parte aérea e das raízes, parecem concordar com essa afirmação, já que a partir dessa dose de B na solução nutritiva, ambas apresentam uma inflexão da curva de produção de massa para baixo, já a figura 33, teor foliar de boro, não revela esse dado, já que a partir da mesma dose a curva continua ascendente, mostrando acúmulo no teor foliar de boro. O que foi explicado por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997), eles apontam que, os sintomas de excesso de boro aparecem nas regiões das folhas que há maior transpiração, o que leva ao acúmulo desse nutriente nesses tecidos.

Figura 37. Acúmulo de boro nas raízes das plantas de milho submetido a doses de boro na solução nutritiva.

O acúmulo de Ca na parte aérea do milho respondeu significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de B na solução nutritiva para a época R1, ajustando-se ao modelo quadrático (Figura 38).

O máximo acúmulo de Ca na parte aérea foi de 1228,09 mg por planta, observado na época R1 com a dose de $0,37 \text{ mg.L}^{-1}$ de B na solução nutritiva.

O acumulado de Ca encontrado na parte aérea do milho foi o dobro do encontrado por Gamboa (1980), 40 kg por hectare de Ca na parte aérea de plantas de milho de alta, o que dá, aproximadamente, 666 mg por planta na parte aérea, visto que se tem, em média, 60000 plantas por hectare.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 135 a 250 mg por planta na parte aérea aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, valores semelhantes aos encontrados nesse presente estudo, na respectiva época.

As doses crescentes de boro na solução nutritiva parecem não ter influenciado o acúmulo de Ca, em R1, na parte aérea nos tratamentos T2, T3 e T4, e a diferença no T1 se justifica pelo fato da planta ter crescido muito menos do que nos demais tratamentos, pela falta de boro, por isso um menor acúmulo de Ca no T1, parece ser obvio.

O acúmulo de Ca nas raízes do milho respondeu significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de B na solução nutritiva para as épocas V7 e R1, ambas ajustando-se ao modelo quadrático (Figura 39).

Na época V7 o máximo acumulado de Ca nas raízes do milho foi de 195 e no estágio R1 foi 460,06 mg por planta, com doses de 0,37 e 0,45 mg.L⁻¹ de B na solução nutritiva, respectivamente.

Figura 38. Acúmulo de cálcio na parte aérea das plantas de milho submetido a doses de boro na solução nutritiva.

Figura 39. Acúmulo de cálcio nas raízes das plantas de milho submetido a doses de boro na solução nutritiva.

Até o estágio V7 os valores acumulados de Ca no sistema radicular são muito semelhantes ao encontrado na parte aérea da planta, já na época R1 a parte aérea acumulou

mais que o dobro de Ca do que a raiz, o que é plenamente justificável, pois o Ca é necessário para a formação das paredes celulares e como a planta está em fase de rápido crescimento vegetativo, a parte aérea passa ser o principal dreno de cálcio, após o estágio V7.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 32 a 140 mg de Ca por planta nas raízes aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, resultados semelhantes aos encontrados nesse trabalho.

O acúmulo de Zn na parte aérea do milho respondeu significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de boro na solução nutritiva para a época R1, ajustando-se ao modelo quadrático (Figura 40).

O máximo acumulado de Zn na parte aérea no estágio R1 foi de 6036,80 μg por planta com a dose de 0,44 mg.L^{-1} de B na solução nutritiva.

O acumulado de Zn encontrado na parte aérea do milho está de acordo com Andrade et al. (1975), 332 gramas por hectare de Zn em plantas com 80 dias após a emergência, o que dá, aproximadamente, 5500 μg por planta na parte aérea, visto que se tem, em média, 60000 plantas por hectare.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 350 a 600 μg de Zn por planta aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, valores inferiores aos encontrados nesse estudo.

Esses resultados demonstram que houve prejuízo no acúmulo de Zn em função da maior dose de boro utilizada (T4).

O acúmulo de Zn nas raízes do milho respondeu significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de B na solução nutritiva para a época R1, ajustando-se ao modelo quadrático (Figura 41), assim como na parte aérea, só que com, aproximadamente, a metade de Zn nas raízes do que nos tecidos vegetativos, possivelmente por estar ligado a enzimas que são utilizadas frequentemente nas células foliares, como a biossíntese de clorofila (TAIZ; ZEIGER, 2009).

O máximo acúmulo de Zn nas raízes no estágio R1 foi de 2891,50 μg por planta com a dose de 0,34 mg.L^{-1} de B na solução nutritiva.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 250 a 440 μg Zn por planta nas raízes aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, valores inferiores aos encontrados nesse presente trabalho.

Figura 40. Acúmulo de zinco na parte aérea das plantas de milho submetido a doses de boro na solução nutritiva.

Figura 41. Acúmulo de zinco nas raízes das plantas de milho submetido a doses de boro na solução nutritiva.

Nesse presente trabalho não fica evidente a inibição não competitiva entre o boro e o zinco, como relataram Malavolta, Vitti e Oliveira (1997), a não ser no caso do teor foliar de zinco, que realmente diminuiu do T1 para o T2 e se manteve em T3 e T4, isso pode estar relacionado mais ao efeito de concentração do que a algum tipo de inibição, já que as plantas do T1 cresceram menos do que as dos demais tratamentos.

4.2.4 Sistema de visão artificial (sva) na identificação nutricional do milho em relação ao boro

Segundo a equipe do IFSC-USP de São Carlos, a técnica que mostrou ser de melhor precisão para diferenciar as classes de imagens do experimento do boro, nas três épocas de amostragem, foi Wavelets de Gabor Multiespectral e fractais para análise de textura colorida, assim como no caso do ferro.

No estágio V4 de desenvolvimento do milho, foram feitas análises pelo SVA das classes: meio das folhas novas (Quadro 12); ponta das folhas novas (Quadro 13); meio das folhas indicativas do estágio de desenvolvimento V4 (Quadro 14) e ponta das folhas indicativas do estágio V4 (Quadro 15).

Esses resultados mostram a melhor probabilidade de acerto global (P.A.G.) de 69,90%, com um índice Kappa “moderado” para o reconhecimento da deficiência de boro em plantas de milho no estágio V4 na ponta das folhas novas (Tabela 5).

T1	T2	T3	T4	
52,2	26,8	0,0	21,0	T1
29,4	54,8	0,0	15,8	T2
0,4	0,0	99,6	0,0	T3
18,4	12,2	0,0	69,4	T4

Quadro 12. Matriz de confusão do meio das folhas novas na primeira coleta dos tratamentos de boro.

T1	T2	T3	T4	
60,2	22,4	0,0	17,4	T1
28,6	57,4	0,0	14,0	T2
0,0	0,0	100,0	0,0	T3
25,0	13,0	0,0	62,0	T4

Quadro 13. Matriz de confusão da ponta das folhas novas na primeira coleta dos tratamentos de boro.

T1	T2	T3	T4	
50,2	20,2	29,6	0,0	T1
34,0	46,2	17,6	2,2	T2
41,8	20,4	37,2	0,6	T3
0,0	0,2	0,0	99,8	T4

Quadro 14. Matriz de confusão do meio das folhas indicativas do estágio V4 de desenvolvimento do milho dos tratamentos de boro.

T1	T2	T3	T4	
53,4	17,6	28,0	1,0	T1
29,0	47,4	23,2	0,4	T2
36,0	21,0	41,6	1,4	T3
0,2	0,0	0,2	99,6	T4

Quadro 15. Matriz de confusão da ponta das folhas indicativas do estágio V4 de desenvolvimento do milho dos tratamentos de boro.

Tabela 5 - Resultados da visão artificial na identificação dos tratamentos com doses de boro nas folhas novas e indicativa do estágio V4 de desenvolvimento.

Wavelets Gabor Multiespectral e fractais Colorido	Probabilidade de acerto global (PAG)	Índice Kappa
MeioFN	69,00	0,587
PontaFN	69,90	0,599
MeioFI	58,35	0,445
PontaFI	60,50	0,473

Dentro dessa classe de imagens o sistema acertou 100% das imagens do tratamento T3, o que é espantoso, ou um erro, visto que isso não ocorre normalmente, pelo fato do T3 ser muito parecido com T4 em todos os aspectos. Parece ter ocorrido o mesmo nas classes meio das folhas novas no T3, no meio das folhas indicativas no T4 e na ponta das folhas novas, também no T4. O fato dos índices Kappa terem permanecidos baixos demonstram que nesse estágio de desenvolvimento, não foi possível distinguir sintomas de deficiência de B no milho através do sistema de visão artificial.

No estágio V7 de desenvolvimento do milho, foram feitas análises pelo SVA das classes: meio das folhas novas (Quadro 16); ponta das folhas novas (Quadro 17) e meio das folhas indicativas do estágio de desenvolvimento V7 (Quadro 18).

Na segunda coleta, ou seja, no estágio V7 de desenvolvimento do milho, a melhor classe de imagens para identificação da nutrição de boro no milho foi “o meio das folhas novas” com PAG de 81,7% e índice Kappa “confiável” (Tabela 6). Novamente, os tratamentos que o sistema tem maior dificuldade de classificar são T3 e T4.

No estágio R1 de desenvolvimento do milho, foram feitas análises pelo SVA das classes: base das folhas novas (Quadro 19); meio das folhas novas (Quadro 20), ponta das folhas novas (Quadro 21) e meio das folhas indicativas do estágio de desenvolvimento R1 (Quadro 22).

T1	T2	T3	T4	
91,2	1,4	3,6	3,8	T1
2,0	93,8	0,0	4,2	T2
3,4	1,2	71,6	23,8	T3
5,0	3,6	21,2	70,2	T4

Quadro 16. Matriz de confusão do meio das folhas novas na segunda coleta dos tratamentos de boro.

T1	T2	T3	T4	
84,2	2,0	10,8	3,0	T1
3,6	92,2	0,4	3,8	T2
10,8	0,0	60,4	28,8	T3
5,8	3,4	26,0	64,8	T4

Quadro 17. Matriz de confusão da ponta das folhas novas na segunda coleta dos tratamentos de boro.

T1	T2	T3	T4	
63,4	13,4	14,6	8,6	T1
12,2	35,0	26,6	26,2	T2
17,4	29,2	29,4	24,0	T3
14,0	26,2	25,0	34,8	T4

Quadro 18. Matriz de confusão do meio das folhas indicativas do estágio V7 de desenvolvimento do milho dos tratamentos de boro.

Tabela 6 - Resultados da visão artificial na identificação dos tratamentos com doses de boro nas folhas novas e indicativa do estágio V7 de desenvolvimento.

Wavelets Gabor Multiespectral e fractais Colorido	Probabilidade de acerto global (PAG)	Índice Kappa
MeioFN	81,70	0,756
PontaFN	75,40	0,672
MeioFI	40,65	0,209

A melhor classe de imagens para a classificação foi à base das folhas novas com PAG de 65,6% e índice Kappa “moderado” (Tabela 7), mas as classes meio das folhas novas e ponta das folhas novas tiveram resultados muito próximos o que poderia ser considerado como empate entre essas três classes, visto que as probabilidades de acerto estão muito próximas e os índices de classificação são iguais.

Esses resultados mostram que o sistema continua identificando o tratamento T1 muito bem, independente da classe analisada, mas igual à época V7 ele continua confundindo muito os outros tratamentos.

T1	T2	T3	T4	
97,2	0,4	0,8	1,6	T1
0,8	55,6	14,2	29,4	T2
1,0	18,2	66,0	14,8	T3
4,4	37,6	14,4	43,6	T4

Quadro 19. Matriz de confusão da base das folhas novas na terceira coleta dos tratamentos de boro.

T1	T2	T3	T4	
95,8	0,0	2,6	1,6	T1
0,2	56,4	12,4	31,0	T2
3,6	19,6	59,6	17,2	T3
1,2	39,0	15,4	44,4	T4

Quadro 20. Matriz de confusão do meio das folhas novas na terceira coleta dos tratamentos de boro.

T1	T2	T3	T4	
96,8	0,2	2,8	0,2	T1
0,0	60,2	12,2	27,6	T2
2,0	14,6	58,8	24,6	T3
2,2	32,2	21,4	44,2	T4

Quadro 21. Matriz de confusão ponta da folha nova na terceira coleta dos tratamentos de boro.

T1	T2	T3	T4	
96,0	1,0	0,4	2,6	T1
2,0	49,2	22,6	26,2	T2
5,0	29,0	38,8	27,2	T3
6,0	33,6	27,6	32,8	T4

Quadro 22. Matriz de confusão do meio das folhas indicativas do estágio R1 de desenvolvimento do milho dos tratamentos de boro.

Os tratamentos que o sistema mais confundiu foram o T3 e o T4, isso não parece ser confusão, pois realmente esses tratamentos apresentaram diferenças mínimas do ponto de vista nutricional. Se esses dois tratamentos fossem tratados como uma única classe para o

sistema, com certeza a probabilidade de acerto melhoraria muito, assim como no experimento do ferro.

É interessante o sistema ter tido sempre as melhores classificações nas imagens das folhas novas, pelo fato do boro ser um nutriente imóvel dentro das plantas e por isso seus sintomas de deficiência aparecem primeiramente nas folhas novas, assim como ocorreu no experimento do ferro. Isso indica que pelo menos o sistema está distinguindo corretamente a folha mais sintomática.

Tabela 7 - Resultados da visão artificial na identificação dos tratamentos com doses de boro nas folhas novas e indicativa do estágio R1 de desenvolvimento.

Wavelets Gabor Multiespectral e fractais Colorido	Probabilidade de acerto global (PAG)	Índice Kappa
BaseFN	65,60	0,541
MeioFN	64,05	0,521
PontaFN	65,00	0,533
MeioFI	54,20	0,389

O melhor de todos os resultados do sistema de visão artificial do experimento de boro foi observado na época V7 na classe meio das folhas novas com probabilidade de acerto de 91,2%, 93,8%, 71,6% e 70,2%, respectivamente nos tratamentos T1, T2, T3 e T4 e com índice Kappa “confiável”.

4.3 Zinco

4.3.1 Sintomas visuais de deficiência

Nesse experimento, os sintomas visuais de deficiência de Zn apareceram em todos os tratamentos que não receberam a dose completa desse nutriente como mostra a figura 42. Os sintomas iniciaram precocemente no T1, com clorose internerval acentuada próxima da região do cartucho (Figura 43a), evoluíram para um arrocheamento por volta do estágio V7 (Figura 43b) e aos 82 dias do início do tratamento estavam necrosadas (Figura 43c e d). Houve perda da dominância apical e encurtamento dos entre nós (Figura 43e). A falta de zinco atrasou o estágio reprodutivo no T3 e impossibilitou o mesmo para T2 e T1 (Figura 42 e 43d), a clorose internerval próxima do cartucho também apareceu no T3, mas de forma mais discreta.

Figura 42. Da esquerda para a direita, T4, T3, T2 e T1.

Figura 43. Sintomas de deficiência de zinco nas plantas de milho. (a) clorose internerval típica de deficiência de Zn em folha indicativa do estágio de desenvolvimento V4 no T1; (b) arroxamento da base e do colo da folha em V7 no T1; (c) necrose das regiões deficientes aos 82 dias após início do tratamento no T1; (d) colapso da planta aos 82 dias após o início do tratamento sem atingir o estágio reprodutivo no T1 e (e) detalhe do encurtamento do entre nó e aparente morte do pendão no T1.

O sintoma típico de deficiência de zinco é a clorose internerval em folhas novas devido a distúrbios na formação do cloroplasto e degradação da clorofila (CAKMAK; MARSCHNER, 1988). Além da clorose, a deformação nas folhas, ou seja, diminuição do limbo foliar, o que pode ajudar na distinção entre sintomas de deficiência causados pela falta de outros nutrientes, a exemplo da clorose induzida pela falta de ferro. A redução do crescimento foliar está associada ao envolvimento do zinco na síntese de proteínas e do ácido indol acético, uma auxina envolvida no crescimento das plantas (CAKMAK; MARSCHNER; BANGERTH, 1989). Taiz e Zeiger (2009) também relatam a importância do zinco na produção do AIA e consequentemente para o crescimento dos vegetais.

Grunes et al. (1961) observaram em áreas reconhecidamente deficientes em zinco, plantas de milho com enraizamento extremamente superficial e ausência de espigas.

Segundo Fancelli (2009), no milho o zinco participa do crescimento das plantas, é ativador de inúmeras enzimas e participa da formação dos grãos e os sintomas de deficiências são folhas com coloração esbranquiçada próxima à região do “cartucho”, crescimento reduzido da planta e encurtamento dos internódios.

O zinco é o micronutriente que apresenta as maiores respostas na produção de milho no Brasil, provavelmente decorrente da falta generalizada desse micronutriente em solos brasileiros (BÜLL, 1993).

Depois do ferro, o micronutriente mais exigido pelo milho é o zinco, isso fica evidente em áreas de cerrado, solos arenosos, pobres em matéria orgânica ou que receberam quantidades elevadas de calcário (FANCELLI, 2009), o que corrobora com Malavolta (2006), que afirma que o zinco, assim como o boro, é o micronutriente que mais causa deficiência mineral nas culturas agrícolas no Brasil. Segundo Fageria et al. (2002), a falta de zinco é um limitante para o aumento da produtividade e da qualidade dos produtos agrícolas no mundo inteiro.

4.3.2 Parâmetros de crescimento da planta

Os resultados de produção de massa seca da parte aérea variaram significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de zinco na solução nutritiva na época de coleta três no estágio de desenvolvimento R1, ajustando-se a equação quadrática. (Figura 44).

A máxima produção de massa seca da parte aérea na época R1 foi de 124,32 g com dose de Zn na solução nutritiva de $0,14 \text{ mg.L}^{-1}$.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 44 e 45 g de MS na parte aérea por planta aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, valores semelhantes aos encontrados nesse presente estudo, na respectiva época.

Os resultados de produção de massa seca das raízes variaram significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de Zn na solução nutritiva somente para a época de coleta três, no estágio de desenvolvimento R1 e se ajustou a equação quadrática. (Figura 45).

A máxima produção de MS das raízes na época R1 foi 38,17 g, com dose de Zn na solução nutritiva em torno de $0,13 \text{ mg.L}^{-1}$, muito próximo do obtido na parte aérea.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 12 a 16 g de MS das raízes por planta aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, valores semelhantes aos obtidos nesse trabalho, na respectiva época.

O zinco, juntamente com o boro aparece como o micronutriente cuja deficiência é mais comum no Brasil, tanto nas culturas perenes quanto nas anuais, como é o caso do milho (MALAVOLTA, 2006).

O pH do solo influencia fortemente a sua disponibilidade para as plantas, visto que o aumento deste diminui a concentração de Zn na solução do solo, mas em determinados solos o aumento do pH pode melhorar a sua disponibilidade devido à dissolução da matéria orgânica (MALAVOLTA, 2006).

A matéria orgânica pode afetar a disponibilidade de Zn aumentando a sua solubilidade, através da complexação com ácidos orgânicos e aminoácidos; diminuí-la devido à formação de complexos insolúveis; os exsudatos das raízes também podem formar complexos com o zinco na rizosfera e os microrganismos podem imobilizá-lo na biomassa e depois liberá-lo na através da mineralização (FAGERIA et al., 2002).

Segundo Malavolta (2006), as baixas temperaturas influenciam negativamente a disponibilidade e a absorção do Zn.

Desde que se constatarem as primeiras deficiências de zinco na cultura do milho na década de 1950, no estado de São Paulo, diversos trabalhos de pesquisa têm mostrado respostas positivas da cultura à aplicação deste micronutriente (IGUE; BLANCO; ANDRADE SOBRINHO, 1962; BRITTO et al., 1971; PEREIRA et al., 1973; SOUZA et al., 1976; GALRÃO; MESQUITA FILHO, 1981a; DECARO et al., 1983; GALRÃO, 1984; RITCHEY et al., 1986; ABREU; LOPES; ANDRADE, 1987; BÜLL, 1993; FANCELLI, 2009).

Figura 44. Produção de massa seca da parte aérea das plantas de milho submetidas a doses de zinco na solução nutritiva em três épocas.

Figura 45: Produção de massa seca das raízes das plantas de milho submetidas a doses de zinco na solução nutritiva em três épocas.

4.3.3 Relação entre zinco, fósforo e manganês

4.3.3.1 Teores na folha indicativa de desenvolvimento do milho

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 ao modelo quadrático (Figura 46).

Figura 46: Teor de zinco nas folhas indicativas do desenvolvimento do milho submetido a doses de Zn na solução nutritiva.

Sendo o teor máximo de zinco no tecido foliar na época V4 de 65,51 mg.kg⁻¹, na dose de zinco na solução nutritiva de 0,092 mg.L⁻¹.

Os teores de Zn encontrados no tecido foliar estão de acordo com os parâmetros normais de Zn para o milho, que podem variar, segundo vários autores, de 15 a 100 mg.kg⁻¹, para uma nutrição adequada (BÜLL, 1993; RAIJ et al., 1997; MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; MARTINEZ et al., 1999; FANCELLI, 2000). Para Gupta e Gupta (1998) a faixa de teor tóxico de zinco está entre 95 a 340 mg.kg⁻¹, já em plantas tolerantes pode-se encontrar até 8000 mg.kg⁻¹ de Zn, sendo para a maioria das culturas encontrado em uma faixa de 200 a 500 mg.kg⁻¹ (RÖMHELD; MARSCHNER, 1991).

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 8 a 12,5 mg.kg⁻¹ de zinco nas folhas do milho aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, resultados semelhantes aos encontrados nesse estudo, na respectiva época.

Ritchey et al. (1986), mostraram a relação na cultura do milho entre o teor foliar de zinco, na folha abaixo e oposta à primeira no estágio R1, com a produção de grãos, esses autores relataram produção de grãos de 2 t.ha⁻¹ com teor de zinco na folha de 12 mg.kg⁻¹, ao passo que com teor por volta de 26 mg.kg⁻¹, a produção triplicou, chegando a 6,5 t.ha⁻¹. Isso

demonstra a fundamental importância do conhecimento do teor adequado de zinco na folha do milho para se recomendar a utilização desse, visando o máximo de produtividade possível.

Os teores de fósforo (P) no tecido vegetal das folhas indicativas do desenvolvimento do milho responderam significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de zinco na solução nutritiva para a época V4 e R1, dentro das duas épocas se ajustado ao modelo quadrático (Figura 47). Tendo os teores de P diminuídos conforme aumentada a dose de zinco nas duas épocas. O que confirma a interação do zinco com o fósforo, evidenciando a inibição não competitiva do segundo causada pela elevação da dose do primeiro. Esse fato é relatado 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 nas raízes 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). Outros autores também relataram a redução na absorção de zinco pelo elevado teor de fósforo no substrato (MALAVOLTA, 2006; FANCELLI, 2009).

Esse estudo demonstrou que o inverso também é verdadeiro, já que a elevação da concentração de zinco na solução nutritiva reduziu significativamente o teor de fósforo no tecido foliar nas épocas V4 e R1, sendo R1 a folha considerada diagnóstica para a cultura do milho.

Figura 47: Teor de fósforo nas folhas indicativas do desenvolvimento do milho submetido a doses de Zn na solução nutritiva.

Na época V4 o maior teor de P na folha foi de $4,30 \text{ g.kg}^{-1}$, com a dose de $0,041 \text{ mg.L}^{-1}$ de Zn na solução nutritiva, a partir dessa dose o teor de P diminui em $4,29 \text{ g.kg}^{-1}$ a cada vez que se acrescenta $0,034 \text{ mg.L}^{-1}$ de Zn na solução nutritiva. Na terceira coleta, no estágio R1, o menor teor de P foi de $0,52 \text{ g.kg}^{-1}$, com a dose de $0,136 \text{ mg.L}^{-1}$ de Zn na solução nutritiva e a diminuição da dose de Zn a cada $0,034 \text{ mg.L}^{-1}$ ocasiona em um aumento no teor foliar de P de $3,04 \text{ g.kg}^{-1}$.

Os teores de P encontrados no tecido foliar, estão de acordo com os parâmetros normais de P para o milho que podem variar, segundo vários autores, de $1,9$ a $4,0 \text{ g.kg}^{-1}$, para uma nutrição adequada (BÜLL, 1993; RAIJ et al., 1997; MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; MARTINEZ et al., 1999; FANCELLI, 2000).

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre $2,3$ a $3,5 \text{ g.kg}^{-1}$ de P na folha do milho aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, resultados parecidos com os obtidos nesse estudo, na respectiva época.

Os teores de Mn no tecido vegetal das folhas indicativas do desenvolvimento do milho responderam significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de zinco na solução nutritiva para as três épocas estudadas (V4, V7 e R1) tendo os teores de Mn dentro das épocas, ajustando-se ao modelo quadrático (Figura 48). Os teores de Mn diminuíram conforme aumentada a dose de Zn, assim como ocorreu com o fósforo nas épocas V4 e R1.

Na época V4 o maior teor de Mn no tecido foliar foi de $211,56 \text{ mg.kg}^{-1}$ com a dose de $0,050 \text{ mg.L}^{-1}$ de Zn na solução nutritiva e a cada acréscimo na dose de Zn de $0,034 \text{ mg.L}^{-1}$ o teor de Mn diminuiu $210,16 \text{ mg.kg}^{-1}$. Na época V7 o menor teor de Mn no tecido foliar foi de $48,67 \text{ mg.kg}^{-1}$ com a dose de $0,148 \text{ mg.L}^{-1}$ de Zn na solução nutritiva e a cada diminuição na dose de Zn de $0,034 \text{ mg.L}^{-1}$ o teor de Mn aumentou $87,13 \text{ mg.kg}^{-1}$. No estágio R1 o menor teor de Mn no tecido foliar foi de $28,47 \text{ mg.kg}^{-1}$ com a dose de $0,157 \text{ mg.L}^{-1}$ de Zn na solução nutritiva e a cada diminuição na dose de Zn de $0,034 \text{ mg.L}^{-1}$ o teor de Mn aumentou $122,14 \text{ mg.kg}^{-1}$.

Os teores de Mn encontrados no tecido foliar estão de acordo com os parâmetros normais de Mn para o milho que podem variar, segundo vários autores, de 20 a 200 mg.kg^{-1} , para uma nutrição adequada (BÜLL, 1993; RAIJ et al., 1997; MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; MARTINEZ et al., 1999; FANCELLI, 2000). Não foi relatado o teor de toxidez de Mn para o milho, mas no caso da cana de açúcar e do arroz é acima de 600 mg.kg^{-1} (BORKERT; PAVAN; BATAGLIA, 2001). Para Gupta e Gupta (1998) a faixa de teor tóxico de manganês esta entre 400 a 7000 mg.kg^{-1} .

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 19 a 23 mg.kg^{-1} de Mn no tecido foliar aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, valores abaixo dos encontrados nesse presente estudo.

Esses resultados confirmam a interação do zinco com o manganês, evidenciando a inibição competitiva do segundo causada pela elevação da dose do primeiro em solução, o que está de acordo com Malavolta (2006).

Figura 48. Teor de manganês nas folhas indicativas do desenvolvimento do milho submetido a doses de Zn na solução nutritiva.

4.3.3.2 Acúmulo de zinco, fósforo e manganês na parte aérea e nas raízes

O acúmulo de zinco na parte aérea do milho respondeu significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de Zn na solução nutritiva apenas na época R1, ajustando-se ao modelo quadrático (Figura 49).

O máximo acúmulo de Zn na parte aérea do milho no estágio R1 foi de 2945,56 mg.kg^{-1} com a dose de 0,123 mg.L^{-1} de Zn na solução nutritiva.

O acumulado de Zn encontrado na parte aérea do milho está de acordo com Andrade et al. (1975), que encontraram 332 gramas por hectare de Zn em plantas com 80 dias após a emergência, o que dá, aproximadamente, 5500 μg por planta na parte aérea, visto que se tem, em média, 60000 plantas por hectare.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 350 a 600 µg de Zn na parte aérea por planta aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, valores próximos aos encontrados nessa pesquisa, na respectiva época.

O máximo acumulado de Zn na parte aérea foi na época R1, quando esse estava na solução nutritiva por volta de 0,123 mg.L⁻¹ (Figura 49), já para o teor máximo no tecido foliar foi com a dose de 0,092 mg.L⁻¹, só que na época V4 (Figura 46), mas a maior produção de massa seca, da parte aérea e das raízes (Figuras 44 e 45, respectivamente), se obteve na dose entre 0,137 e 0,140 mg.L⁻¹ zinco na solução, ou seja, essa é a dose máxima para se obter a máxima produção de MS do milho em hidroponia. Esse fato evidencia que os parâmetros de diagnose foliar e de acúmulo de zinco para a cultura do milho, estão defasados, provavelmente, pela maior demanda da planta por esse micronutriente em virtude do maior potencial produtivo dessa cultura atualmente, devido principalmente ao melhoramento genético, que vêm propiciando ganhos de produtividade na cultura a décadas (FRALEY et al., 1986; ZAMBRYNSKI; TEMPE; SCHELL, 1989; PATERNIANI, 1993).

Assim como o ferro, há sugestões de existir na planta uma fração ativa e outra inativa de zinco (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997), isso dificultaria a formulação adequada de uma faixa de suficiência única para a cultura do milho, já que a utilização dele pela planta pode variar de acordo com as condições edafoclimáticas (MALAVOLTA, 2006).

Figura 49. Acúmulo de zinco na parte aérea das plantas de milho submetido a doses de zinco na solução nutritiva.

O acúmulo de zinco nas raízes do milho respondeu significativamente ($P<0,01$) com o incremento da dose de zinco na solução nutritiva para a época R1 e ($P<0,05$) para a época V7, ambas ajustando-se ao modelo linear (Figura 50).

A planta acumulou mais Zn nas raízes ao longo do tempo, mas com o aumento da dose de Zn na solução nutritiva, esse diminuiu no tecido radicular, provavelmente por esse nutriente ser exigido em maiores quantidades na parte aérea, que constitui o seu maior dreno (MALAVOLTA, 2006), já que a planta desenvolveu-se mais com o incremento de zinco na solução nutritiva.

Figura 50. Acúmulo de zinco nas raízes das plantas de milho submetido a doses de zinco na solução nutritiva.

Não houve resposta significativa no acúmulo de fósforo na parte aérea das plantas nas épocas estudadas, somente entre as épocas, o que é de se esperar, já que o acúmulo está relacionado com a produção de biomassa (Figura 51).

O acumulado de fósforo encontrado na parte aérea do milho não está de acordo com Andrade et al. (1975), que encontraram 28 kg por hectare de P na parte aérea de plantas de milho de alta, o que dá, aproximadamente, 466 mg por planta na parte aérea, visto que se tem, em média, 60000 plantas por hectare.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 130 a 140 mg de P na parte aérea por planta aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, resultados similares aos encontrados nesse presente trabalho na ocorrência do mesmo estágio fenológico analisado.

Figura 51. Acúmulo de fósforo na parte aérea das plantas de milho submetido a doses de zinco na solução nutritiva.

O acúmulo de fósforo nas raízes do milho respondeu significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de zinco na solução nutritiva na época R1, ajustando-se ao modelo quadrático (Figura 52).

Na época R1 o menor quantidade de P acumulado nas raízes do milho foi de 23,89 mg/pl com a dose de 0,060 mg.L⁻¹ de Zn na solução nutritiva, a partir dessa dose o incremento de 0,034 mg.L⁻¹ de Zn na solução aumentou a quantidade de P nas raízes em 24,56 mg/pl, o que parece confirmar o fato de que o fósforo mais o zinco se precipitam, nas raízes e ou nos vasos condutores (STUKENHOLTZ et al., 1966; BOAWN; BROWN, 1968; EDWARDS; KAMPRATH, 1974), o que aumentaria a quantidade acumulada de fósforo nas raízes, diferentemente do que ocorreu na parte aérea, onde o acúmulo de P não se alterou em função das doses de Zn.

No estágio V4 os teores de fósforo nas raízes e na parte aérea são praticamente idênticos, o que demonstra a essencialidade desse mineral para o desenvolvimento inicial do sistema radicular, ao passo que na época V7 a planta acumula quatro vezes mais P na parte aérea do que nas raízes e quase 10 vezes mais quando atinge o estágio R1, o que mostra que esse passa ser requerido em maior quantidade pela parte aérea a partir do momento que a planta aumenta sua velocidade de crescimento e consequentemente seu processos metabólicos, já que o principal papel do P nos seres vivos é de armazenar e transferir energia (ARNON, 1953).

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 26 a 52 mg por planta nas raízes aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, valores semelhantes aos encontrados nesse presente trabalho, na respectiva época.

Figura 52. Acúmulo de fósforo nas raízes das plantas de milho submetido a doses de zinco na solução nutritiva.

Não houve resposta significativa no acúmulo de manganês na parte aérea das plantas nas épocas estudadas, somente entre as épocas, o que é de se esperar, já que o acúmulo está relacionado com a produção de biomassa (Figura 53).

O acumulado de Mn encontrado na parte aérea do milho está de acordo com Andrade et al. (1975), que encontraram 656 gramas por hectare de Mn em plantas com 80 dias após a emergência, o que dá, aproximadamente, 11000 µg por planta na parte aérea, visto que se tem, em média, 60000 plantas por hectare.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 1000 a 1600 µg de Mn por planta na parte aérea aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, resultados parecidos com os do presente estudo na ocorrência do mesmo estágio de desenvolvimento.

O acúmulo de Mn nas raízes do milho respondeu significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de zinco na solução nutritiva para as épocas V7 e R1, sendo que para época V7 o modelo que melhor se ajustou foi o linear e para R1 foi o modelo quadrático (Figura 54).

Na época R1 a maior quantidade de Mn acumulada nas raízes do milho foi de 4993,75 $\mu\text{g/pl}$ com a dose de 0,047 mg.L^{-1} de Zn na solução nutritiva, a partir dessa dose o incremento na de 0,034 mg.L^{-1} de Zn diminuiu o acumulado de Mn em 4938,11 $\mu\text{g/pl}$.

Em ambas as épocas o aumento da concentração de zinco na solução nutritiva reduziu o acumulado de manganês nas raízes, assim como no experimento do ferro, só que dessa vez muito mais pronunciado, talvez esse fato se deva a importância do manganês na parte aérea, processos fotossintéticos (AWAD; CASTRO, 1983; MALAVOLTA, 2006; RAIJ, 1991; RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2007; TAIZ; ZEIGER, 2009) e pela planta ter continuado a aumentar o seu crescimento vegetativo em função das doses de zinco o manganês deve ter sido exigido pela parte aérea e a planta precisou retirá-lo das reservas do sistema radicular. Provavelmente houve inibição competitiva do zinco com o manganês no processo de absorção radicular ou na solução o que concordaria com Malavolta (2006).

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 210 a 600 μg de manganês por planta nas raízes aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, valores levemente abaixo dos encontrados nesse estudo.

Nesse presente trabalho fica evidente a inibição não competitiva entre o zinco e o fósforo e competitiva como o manganês como relataram Malavolta, Vitti e Oliveira (1997), somente nas análises químicas do tecido foliar, já que nos acumulados isso não fica claro.

De qualquer forma, o aumento da dose de zinco, tendo ou não diminuído a disponibilidade do fósforo e ou do manganês, propiciou aumento na produção de massa seca da planta inteira, parte aérea e raízes até a dose de 0,14 mg.L^{-1} de Zn na solução nutritiva.

Figura 53. Acúmulo de manganês na parte aérea das plantas de milho submetido a doses de zinco na solução nutritiva.

Figura 54. Acúmulo de manganês nas raízes das plantas de milho submetido a doses de zinco na solução nutritiva.

4.3.4 Sistema de visão artificial (SVA) na identificação nutricional do milho em relação ao zinco

Segundo a equipe do IFSC-USP de São Carlos, a técnica que mostrou ser de melhor precisão para diferenciar as classes de imagens do experimento do zinco, nas três épocas de amostragem, foi Wavelets de Gabor Multiespectral e fractais para análise de textura colorida, assim como nos experimentos do ferro e do boro.

No estágio V4 de desenvolvimento do milho, foram feitas análises pelo SVA das classes: base das folhas novas (Quadro 23); meio das folhas novas (Quadro 24); ponta das folhas novas (Quadro 25), meio das folhas indicativas do estágio V4 (Quadro 26) e ponta das folhas indicativas do estágio V4 (Quadro 27).

T1	T2	T3	T4	
100,0	0,0	0,0	0,0	T1
0,0	47,8	21,8	30,4	T2
0,2	25,6	48,6	25,6	T3
1,0	35,2	22,8	41,0	T4

Quadro 23. Matriz de confusão da base das folhas novas na primeira coleta dos tratamentos de zinco.

T1	T2	T3	T4	
98,8	0,0	0,0	1,2	T1
0,0	59,8	16,6	23,6	T2
0,0	26,6	42,2	31,2	T3
4,0	33,2	27,6	35,2	T4

Quadro 24. Matriz de confusão do meio das folhas novas na primeira coleta dos tratamentos de zinco.

T1	T2	T3	T4	
100,0	0,0	0,0	0,0	T1
0,0	58,4	19,6	22,0	T2
0,2	24,8	43,0	32,0	T3
0,2	27,8	30,4	41,6	T4

Quadro 25. Matriz de confusão da ponta das folhas novas na primeira coleta dos tratamentos de zinco.

T1	T2	T3	T4	
66,8	32,4	0,8	0,0	T1
30,8	69,2	0,0	0,0	T2
1,0	0,6	73,0	25,4	T3
0,6	0,2	26,8	72,4	T4

Quadro 26. Matriz de confusão do meio das folhas indicativas do estágio V4 de desenvolvimento do milho dos tratamentos de zinco.

T1	T2	T3	T4	
83,2	16,8	0,0	0,0	T1
10,4	89,6	0,0	0,0	T2
0,2	0,0	77,4	22,4	T3
0,0	0,0	26,2	73,8	T4

Quadro 27. Matriz de confusão da ponta das folhas indicativas do estágio V4 de desenvolvimento do milho dos tratamentos de zinco.

Esses resultados mostram a melhor probabilidade de acerto global (P.A.G.) de 81,00%, com índice Kappa “confiável” para o reconhecimento da deficiência de zinco em plantas de milho no estágio V4 na ponta das folhas indicativas de desenvolvimento V4 (Tabela 8).

No estágio V7 de desenvolvimento do milho, foram feitas análises pelo SVA das classes: base das folhas novas (Quadro 28) e meio das folhas indicativas do estágio de desenvolvimento V7 (Quadro 29).

Tabela 8 - Resultados da visão artificial na identificação dos tratamentos com doses de zinco nas folhas novas e indicativa do estágio V4 de desenvolvimento.

Wavelets Gabor Multiespectral e fractais Colorido	Probabilidade de acerto global (PAG)	Índice Kappa
BaseFN	59,350	0,458
MeioFN	59,000	0,453
PontaFN	60,750	0,477
MeioFI	70,350	0,605
PontaFI	81,000	0,747

Na segunda coleta, ou seja, no estágio V7 de desenvolvimento do milho, a melhor classe de imagens para identificação da nutrição de zinco no milho foi o meio das folhas indicativas com PAG de 60,30%, mas com índice Kappa “moderado”, o que não trás confiança na classificação (Tabela 9). Novamente, os tratamentos que o sistema tem maior dificuldade de classificar foram T3 e T4.

T1	T2	T3	T4	
82,4	5,8	4,6	7,2	T1
8,4	45,2	35,0	11,4	T2
5,4	39,6	43,6	11,4	T3
18,6	18,2	9,6	53,6	T4

Quadro 28. Matriz de confusão da base das folhas novas na segunda coleta dos tratamentos de zinco.

T1	T2	T3	T4	
68,2	30,8	0,6	0,4	T1
26,6	72,2	0,4	0,8	T2
2,6	1,8	49,8	45,8	T3
1,4	1,0	46,6	51,0	T4

Quadro 29. Matriz de confusão do meio das folhas indicativas do estágio V7 de desenvolvimento do milho dos tratamentos de zinco.

No estágio R1 de desenvolvimento do milho foram feitas análises pelo SVA das classes: meio das folhas novas (Quadro 30) e meio das folhas indicativas do estágio de desenvolvimento R1 (Quadro 31).

A melhor classe de imagens para a classificação foi o meio das folhas novas com PAG de 59,15% e índice Kappa “moderado”, o que não traz confiança (Tabela 10).

Tabela 9 - Resultados da visão artificial na identificação dos tratamentos com doses de zinco nas folhas novas e indicativa do estágio V7 de desenvolvimento.

Wavelets Gabor Multiespectral e fractais Colorido	Probabilidade de acerto global (PAG)	Índice Kappa
BaseFN	56,200	0,416
MeioFI	60,300	0,471

Esses resultados mostram que o sistema continua identificando o tratamento T1 muito bem, independente da classe analisada, mas igual à época V4 e V7 ele continua confundindo muito os outros tratamentos, só que agora o sistema esta confundindo mais o T2 e o T3.

Os tratamentos que o sistema mais confundiu foram o T3 e o T4 nos estádios V4 e V7 e no R1 mais o T2 e o T3.

T1	T2	T3	T4	
78,0	11,0	3,8	7,2	T1
6,2	42,2	38,2	13,4	T2
2,6	35,2	41,6	20,6	T3
2,2	10,8	12,2	74,8	T4

Quadro 30. Matriz de confusão do meio das folhas novas na terceira coleta dos tratamentos de zinco.

T1	T2	T3	T4	
81,6	12,4	4,4	1,6	T1
11,0	35,2	30,8	23,0	T2
1,8	31,8	38,6	27,8	T3
3,0	28,6	28,4	40,0	T4

Quadro 31. Matriz de confusão do meio das folhas indicativas do estágio R1 de desenvolvimento do milho dos tratamentos de zinco.

Nesse experimento para as três épocas analisadas pelo sistema o melhor resultado foi na primeira época, ou seja, no V4 na classe de imagem ponta das folhas indicativas com probabilidade de acerto de 83,2%, 89,6%, 77,4% e 73,8%, respectivamente para T1, T2, T3 e T4, com índice Kappa “confiável”.

É interessante que o melhor resultado do SVA tenha sido no estágio V4, pois quanto mais precoce for a identificação da falta do nutriente para a planta, maiores são as chances de corrigir essa carência minimizando possíveis danos econômicos.

Tabela 10 - Resultados da visão artificial na identificação dos tratamentos com doses de zinco nas folhas novas e indicativa do estágio R1 de desenvolvimento.

Wavelets Gabor Multispectral e fractais Colorido	Probabilidade de acerto global (PAG)	Índice Kappa
MeioFN	59,150	0,495
MeioFI	48,850	0,318

4.4 Cobre

4.4.1 Sintomas visuais de deficiência

Nesse experimento os sintomas visuais de deficiência de cobre apareceram severamente no T1 a partir do estágio V5 de desenvolvimento. Os sintomas iniciaram com clorose entre as nervuras a partir da base das folhas novas (Figura 55a) e necrose nas bordas das folhas novas (Figura 55b), as últimas folhas a se desenvolverem se encurvaram e entrelaçaram as pontas, o ápice do pendão necrosou (Figura 55c). Os sintomas de falta de cobre, também se manifestaram no T2, mas de formas não tão evidentes.

Esses sintomas também foram percebidos por Malavolta e Dantas (1987); Malavolta, Vitti e Oliveira (1997) e Fancelli (2009).

O Cu está associado a enzimas envolvidas em reações redox (TAIZ; ZEIGER, 2009), cerca de 70% do cobre das folhas está nos cloroplastos como proteínas complexas unindo os dois processos fotoquímicos, nos cereais auxilia a manter a fecundidade masculina (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997), atua no sistema enzimático, na produção de fenóis e quinonas, no processo de assimilação do nitrogênio e na síntese de proteína (FANCELLI, 2009).

Os sintomas de deficiência mais comuns no milho, segundo Malavolta; Dantas (1987); Malavolta et al. (1989) e Fancelli (2009), são o amarelecimento das folhas logo após o seu desdobramento, o encurvamento das extremidades das folhas e margens necrosadas e colmos frágeis, ainda para Fancelli (2009 p.89) “A carência de cobre tem contribuído para o aumento da predisposição do milho à cercosporiose e ao complexo da mancha branca”.

Figura 55. (a) clorose internerval na base da folha indicativa do estágio de desenvolvimento R1, típica de deficiência de Cu no T1; (b) necrose da borda de folha nova no estágio V7 no T1; (c) folhas entrelaçadas e necrose do ápice do pendão.

4.4.2 Parâmetros de crescimento da planta

Os resultados de produção de massa seca da parte aérea variaram significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de cobre na solução nutritiva na segunda e terceira época de coleta, respectivamente, estágio de desenvolvimento V7 e R1, ambas ajustando-se a equação quadrática. (Figura 56).

Na época V7 a maior produção de MS da parte aérea foi de 27,62 g e no estágio R1 foi 184,78 g, respectivamente com as doses de Cu na solução nutritiva de 0,030 e 0,034 mg.L^{-1} .

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 44 e 45 g de MS por planta aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, valores semelhantes aos encontrados nesse estudo na ocorrência da mesma época.

Figura 56. Produção de massa seca da parte aérea das plantas de milho submetidas a doses de cobre na solução nutritiva em três épocas.

Figura 57. Produção de massa seca das raízes das plantas de milho submetidas a doses de cobre na solução nutritiva em três épocas.

Os resultados de produção de massa seca das raízes variaram significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de Cu na solução nutritiva somente para a época de coleta três, no estágio de desenvolvimento R1, ajustando-se a equação quadrática. (Figura 57).

A máxima produção de massa seca das raízes foi de 48,50 g de MS de raiz observada na época R1 com dose de Cu na solução nutritiva de $0,033 \text{ mg.L}^{-1}$.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 12 a 16 g de MS das raízes por planta aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, resultados semelhantes aos encontrados nesse trabalho, na respectiva época.

Segundo Abreu, Ferreira e Borkert (2001), a deficiência de cobre é frequente em plantas cultivadas em solos com baixo teor de cobre total e em solos com alto teor de matéria orgânica, nos quais esse elemento é complexado em formas orgânicas insolúveis, indisponíveis para as plantas. A principal ligação do cobre com a matéria orgânica está nos ácidos húmicos e fúlvicos, os quais formam complexos insolúveis com o cobre. A força de ligação do cobre com os ácidos húmicos diminui com o aumento da quantidade de aplicada de cobre (GOODMAN; CHESHIRE, 1976); aumentam com aumento do grau de humificação (STEVENSON; FITCH, 1981) e com o aumento do pH do solo (YONEBAYASHI et al., 1994).

Segundo Malavolta (2006) o aumento do pH indisponibilidade o Cu, assim como o Fe, o Mn e o Zn pelo efeito indireto, que favorece a formação de hidróxidos e carbonatos menos disponíveis, conseqüentemente cai a concentração desses elementos na solução do solo.

Em vários ensaios conduzidos em solos brasileiros não se encontrou resposta de milho à aplicação de cobre (GALRÃO, 1984; ABREU; LOPES; ANDRADE, 1987). Entretanto Fancelli (2009) ressalta que em sistema de plantio direto (S.P.D.) o cobre sofre acentuada suscetibilidade a complexação por parte da matéria orgânica, o que poderá resultar em sérios distúrbios de carência, sobretudo na condição de “fome oculta”.

4.4.3 Relação entre cobre, cálcio e zinco

4.4.3.1 Teores na folha indicativa de desenvolvimento do milho

Os teores de cobre no tecido vegetal das folhas indicativas do desenvolvimento do milho responderam significativamente ($P < 0,01$) ao incremento da dose de Cu na solução nutritiva para a época R1, ajustando-se ao modelo quadrático (Figura 58).

O maior teor de Cu no tecido foliar no estágio R1 foi de $14,75 \text{ mg.kg}^{-1}$ com a dose de $0,032 \text{ mg.L}^{-1}$ de Cu na solução nutritiva.

Os teores de Cu encontrados no tecido foliar estão de acordo com os parâmetros normais de Cu para o milho que podem variar, segundo vários autores, de $6 \text{ a } 25 \text{ mg.kg}^{-1}$, para uma nutrição adequada (BÜLL, 1993; RAIJ et al., 1997; MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; MARTINEZ et al., 1999; FANCELLI, 2000). A toxicidade de cobre não é

comum. Mesmo quando o elemento é aplicado em grandes quantidades, mas no caso em que ocorra a toxidez, é evidente a redução no crescimento de plantas em estágios iniciais de desenvolvimento (REUTHER; LABANAUSKAS, 1966). Gupta e Gupta (1998) estimaram a faixa de teor tóxico de cobre entre 10 a 70 mg.kg⁻¹.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 4,08 a 10,85 mg.kg⁻¹ de Cu no tecido foliar aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, resultados próximos dos encontrados nesse estudo na ocorrência da mesma época.

Figura 58. Teor de cobre nas folhas indicativas do desenvolvimento do milho submetido a doses de Cu na solução nutritiva.

Os teores de cálcio no tecido das folhas indicativas do desenvolvimento do milho responderam significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de Cu na solução nutritiva para todas as épocas, V4, V7 e R1, dentro da primeira época se ajustou ao modelo linear e para as outras duas, ao modelo quadrático. Tendo os teores foliares de Ca aumentado conforme se aumentava a dose de Cu na solução nutritiva (Figura 59).

Na época V7 o menor teor de Ca na folha foi de 2,10 g.kg⁻¹ com a dose de 0,006 mg.L⁻¹ de Cu e aumentava 2,12 g.kg⁻¹ de Ca para cada vez que se aumentava a dose de Cu em 0,01 mg.L⁻¹, já na época R1 o menor teor de Ca na folha foi de 3,22 g.kg⁻¹ com a dose de Cu de 0,015 mg.L⁻¹ e aumentava 3,31 g.kg⁻¹ de Ca com o incremento na dose de Cu de 0,01 mg.L⁻¹.

Os teores de Ca encontrados no tecido foliar estão de acordo com os parâmetros normais de Ca para o milho que podem variar segundo vários autores, de 2,3 a 10 g.kg⁻¹, para

uma nutrição adequada (BÜLL, 1993; RAIJ et al., 1997; MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; MARTINEZ et al., 1999; FANCELLI, 2000).

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 0,9 a 7,4 g.kg⁻¹ de Ca nas folhas do milho aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, valores semelhantes aos encontrados nesse estudo, na respectiva época. Nesse mesmo trabalho Silva (2011), constatou efeito antagônico do cálcio com o cobre assim como citado na literatura (MALAVOLTA, 2006). Parece que o inverso não se aplica nesse caso, já que as variações da dose máxima do cobre na solução são infinitamente inferiores as de cálcio (Ca na solução nutritiva 200 mg.L⁻¹; dose máxima de cobre na solução 0,05 mg.L⁻¹), o que não possibilitaria uma possível influência na absorção do outro.

Figura 59. Teor de cálcio nas folhas indicativas do desenvolvimento do milho submetido a doses de Cu na solução nutritiva.

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 Cu na solução nutritiva para todas as épocas, V4, V7 e R1, dentro das três épocas se ajustaram ao modelo quadrático (Figura 60). Tendo os teores foliares de Zn diminuído, até certo ponto, conforme aumentada a dose de Cu na solução nutritiva.

Nas épocas V4, V7 e R1 os menores teores de Zn no tecido foliar, foram de 1,32 mg.kg⁻¹, 12,55 mg.kg⁻¹ e 4,38 mg.kg⁻¹, respectivamente com as seguintes doses de Cu na solução nutritiva, 0,032 mg.L⁻¹, 0,038 mg.L⁻¹ e 0,032 mg.L⁻¹ e a diminuição de 0,01 mg.L⁻¹ de

Cu na solução aumentou o teor de Zn na folha em $33,21 \text{ mg.kg}^{-1}$, $27,88 \text{ mg.kg}^{-1}$ e $20,78 \text{ mg.kg}^{-1}$, respectivamente para as mesmas épocas. Essa diminuição no teor de Zn no tecido foliar não prejudicou o desenvolvimento da planta, pois como foi visto anteriormente, as maiores produções de MS, tanto da parte aérea como das raízes, foram obtidas com as doses de Cu na solução entre $0,030$ e $0,034 \text{ mg.L}^{-1}$. Esse fato deve estar associado ao efeito de diluição já que as plantas cresceram mais com essas doses de Cu, outro fato que corrobora com essa afirmação é que a partir dessa dose as plantas sofreram efeito quadrático no crescimento, ou seja, a produção de MS diminuiu e o teor de Zn voltou a aumentar, indicando efeito na concentração novamente.

Os teores de Zn encontrados no tecido foliar estão de acordo com os parâmetros normais de Zn para o milho que podem variar, segundo vários autores, de 15 a 100 mg.kg^{-1} , para uma nutrição adequada (BÜLL, 1993; RAIJ et al., 1997; MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; MARTINEZ et al., 1999; FANCELLI, 2000). Para Gupta e Gupta (1998) a faixa de teor tóxico de zinco esta entre 95 a 340 mg.kg^{-1} , já em plantas tolerantes pode-se encontrar até 8000 mg.kg^{-1} de Zn, sendo para a maioria das culturas encontrado em uma faixa de 200 a 500 mg.kg^{-1} (RÖMHELD; MARSCHNER, 1991).

Figura 60. Teor de zinco nas folhas indicativas do desenvolvimento do milho submetido a doses de Cu na solução nutritiva.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 8 a $12,5 \text{ mg.kg}^{-1}$ de Zn nas folhas do milho aos 60 dias após a emergência, quando a planta estava em V8, resultados semelhantes aos encontrados nesse estudo, na respectiva época em questão.

Esses resultados demonstram a inibição competitiva na absorção do zinco por parte do cobre, mas somente do T1 para o T2, ou seja, quando não havia Cu na solução e quando se acrescentou 0,01 mg.L⁻¹ de Cu na solução, entre T2, T3 e T4, não se nota grande variação no teor de Zn na folha, o que faz parecer que os elementos entraram em equilíbrio na planta, ou seja, o real desequilíbrio de Zn na planta foi causado pela falta de Cu, que a fez acumular muito Zn, já as doses de Cu na solução pouco influenciaram o acúmulo de Zn no tecido foliar.

4.4.3.2 Acúmulo de cobre, cálcio e zinco na parte aérea e nas raízes

O acúmulo de cobre na parte aérea do milho respondeu significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de Cu na solução nutritiva apenas na época R1, ajustando-se ao modelo quadrático (Figura 61).

O maior acúmulo de Cu na parte aérea se deu no estágio R1 com 4901,73 µg por planta com a dose de 0,035 mg.L⁻¹ de Cu na solução nutritiva.

O acumulado de Cu encontrado na parte aérea do milho não está de acordo com Andrade et al. (1975), que encontraram 110 gramas por hectare de Zn em plantas com 80 dias após a emergência, o que dá, aproximadamente, 1833 µg por planta na parte aérea, visto que se tem, em média, 60000 plantas por hectare.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 100 a 500 µg de Cu na parte aérea por planta aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, resultados muito próximos dos encontrados na mesma época nesse presente estudo.

O acúmulo de cobre nas raízes do milho respondeu significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de cobre na solução nutritiva para as épocas V7 e R1, o melhor modelo para explicar esse fenômeno no estágio V7 foi o linear e para R1 foi o modelo quadrático (Figura 62).

O menor acúmulo de Cu nas raízes na época R1 foi de 777,50 µg com a dose de 0,0073 mg.L⁻¹ de Cu na solução nutritiva, para cada acréscimo de 0,01 mg.L⁻¹ de Cu na solução o acúmulo de Cu nas raízes aumentava 785,58 µg por planta.

O maior acúmulo de Cu nas raízes não foi determinado, já que a curva, tanto para V7 (linear) quanto para R1, estavam ascendentes na maior dose de Cu na solução nutritiva, ou seja, no T4. Nos tratamentos T1, T2 e T3, o acúmulo de Cu pouco mudou, mas no T4 o acúmulo triplicou em relação aos outros três tratamentos. Segundo Malavolta (2006), a toxidez de Cu começa a manifestar os sintomas nas raízes. Isso pode explicar o fato do Cu ter triplicado nas raízes do T4 em comparação aos outros tratamentos, o que evidencia toxidez de

Cu, já que a produção de massa seca, tanto na parte aérea quanto nas raízes, fora afetada a partir da dose de $0,03 \text{ mg.L}^{-1}$ de Cu na solução nutritiva (Figura 56 e 57).

Figura 61. Acúmulo de cobre na parte aérea das plantas de milho submetido a doses de cobre na solução nutritiva.

Figura 62. Acúmulo de cobre nas raízes das plantas de milho submetido a doses de cobre na solução nutritiva.

O acúmulo de Ca na parte aérea do milho respondeu significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de Cu na solução nutritiva para as épocas V7 e R1. Ambos ajustando-se ao modelo quadrático (Figura 63).

Nas épocas V7 e R1 os maiores acúmulos de Ca na parte aérea foram de 426,63 mg e 2994,34 mg por planta com doses de Cu na solução nutritiva de 0,029 e 0,032 mg.L⁻¹, respectivamente.

O acumulado de Ca encontrado na parte aérea do milho não está de acordo com Gamboa (1980), que encontrou 40 kg por hectare de Ca na parte aérea de plantas de milho de alta, o que dá, aproximadamente, 666 mg por planta na parte aérea, visto que se tem, em média, 60000 plantas por hectare.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia encontrou valores entre 135 a 250 mg de Ca por planta na parte aérea aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, valores abaixo dos encontrados nesse presente estudo, na respectiva época.

Mesmo o modelo tendo sido quadrático, a falta de Cu diminuiu mais o acúmulo de Ca na parte aérea do que a dose máxima utilizada nesse estudo (0,05 mg.L⁻¹ de Cu), possivelmente pelo fato das plantas do tratamento T1 não terem crescido como as dos demais tratamentos.

O acúmulo de Ca nas raízes do milho respondeu significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de Cu na solução nutritiva apenas na época R1, ajustando-se ao modelo quadrático (Figura 64).

Na época R1 o maior acúmulo de Ca nas raízes do milho foi de 833,24 mg com a dose de 0,032 mg.L⁻¹ de Cu na solução nutritiva.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 32 a 140 mg de Ca por planta nas raízes aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, resultados semelhantes aos encontrados nesse estudo, na respectiva época.

No sistema radicular a curva que descreve o acúmulo de cálcio foi semelhante a da parte aérea, só que com valores três vezes menores.

O acúmulo de zinco na parte aérea do milho respondeu significativamente ($P < 0,01$) com o incremento da dose de Cu na solução nutritiva para as épocas V7 e R1, ambas ajustando-se ao modelo quadrático (Figura 65).

Nas épocas V7 e R1 os maiores acúmulos de Zn na parte aérea foram de 539,56 µg e 2694,02 µg por planta com doses de Cu na solução nutritiva de 0,025 e 0,030 mg.L⁻¹, respectivamente.

Figura 63. Acúmulo de cálcio na parte aérea das plantas de milho submetido a doses de cobre na solução nutritiva.

Figura 64. Acúmulo de cálcio nas raízes das plantas de milho submetido a doses de cobre na solução nutritiva.

O acúmulo de Zn encontrado na parte aérea do milho está de acordo com Andrade et al. (1975), que encontraram 332 gramas por hectare de Zn em plantas com 80 dias após a emergência, o que dá, aproximadamente, 5500 µg por planta na parte aérea, visto que se tem, em média, 60000 plantas por hectare.

Figura 65. Acúmulo de zinco na parte aérea das plantas de milho submetido a doses de cobre na solução nutritiva.

Figura 66. Acúmulo de zinco nas raízes das plantas de milho submetido a doses de cobre na solução nutritiva.

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 350 a 600 µg de Zn na parte aérea por planta aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, na respectiva época.

O acúmulo de Zn nas raízes do milho respondeu significativamente ($P<0,01$) com o incremento da dose de Cu na solução nutritiva para a época R1, ajustando-se ao modelo linear (Figura 66).

Silva (2011), trabalhando com milho em hidroponia, encontrou valores entre 250 a 440 μg de Zn por planta nas raízes aos 60 dias após a emergência, quando o milho estava em V8, resultados próximos aos encontrados nesse estudo na ocorrência da mesma época.

Nesse presente estudo fica evidente que o aumento das doses de Cu na solução nutritiva até $0,03 \text{ mg.L}^{-1}$ proporcionaram maior produção de MS, tanto na parte aérea como nas raízes das plantas.

4.4.4 Sistema de visão artificial (SVA) na identificação nutricional do milho em relação ao cobre

Segundo a equipe do IFSC-USP de São Carlos, a técnica que mostrou ser de melhor precisão para diferenciar as classes de imagens do experimento do cobre, nas três épocas de amostragem, foi Wavelets de Gabor Multiespectral e fractais para análise de textura colorida, assim como nos três experimentos anteriores.

No estágio V4 de desenvolvimento do milho, foram feitas análises pelo SVA das classes: meio das folhas novas (Quadro 32) e meio das folhas indicativas do estágio V4 (Quadro 33).

T1	T2	T3	T4	
48,2	20,0	17,8	14,0	T1
28,4	33,0	19,0	19,6	T2
25,6	21,2	39,2	14,0	T3
22,8	25,0	18,2	34,0	T4

Quadro 32. Matriz de confusão do meio das folhas novas na primeira coleta dos tratamentos de cobre.

T1	T2	T3	T4	
56,4	1,4	17,2	25,0	T1
1,8	98,0	0,2	0,0	T2
20,0	0,0	46,8	33,2	T3
23,8	0,0	27,8	48,4	T4

Quadro 33. Matriz de confusão do meio das folhas indicativas do estágio V4 de desenvolvimento do milho dos tratamentos de cobre.

Esses resultados mostram a melhor probabilidade de acerto global (P.A.G.) de 62,40%, com um índice Kappa “moderado” para o reconhecimento da deficiência de cobre em plantas de milho no estágio V4 no meio das folhas indicativas de desenvolvimento V4 (Tabela 11), o que parece normal, visto que as plantas nesse estágio, não apresentavam diferenças significativas.

Tabela 11 - Resultados da visão artificial na identificação dos tratamentos com doses de cobre nas folhas novas e indicativa do estágio V4 de desenvolvimento.

Wavelets Gabor Multiespectral e fractais Colorido	Probabilidade de acerto global (PAG)	Índice Kappa
MeioFN	38,600	0,181
MeioFI	62,400	0,499

No estágio V7 de desenvolvimento do milho, foram feitas análises pelo SVA das classes: meio das folhas novas (Quadro 34) e meio das folhas indicativas do estágio de desenvolvimento V7 (Quadro 35).

T1	T2	T3	T4	
53,2	16,4	20,6	9,8	T1
22,6	31,2	23,4	22,8	T2
24,2	27,0	25,2	23,6	T3
18,8	30,6	22,0	28,6	T4

Quadro 34. Matriz de confusão do meio das folhas novas na segunda coleta dos tratamentos de cobre.

T1	T2	T3	T4	
44,4	22,0	19,2	14,4	T1
23,0	27,6	23,6	25,8	T2
18,8	28,4	23,0	29,8	T3
15,4	25,6	30,0	29,0	T4

Quadro 35. Matriz de confusão do meio das folhas indicativas do estágio V7 de desenvolvimento do milho dos tratamentos de cobre.

Na segunda coleta, ou seja, no estágio V7 de desenvolvimento do milho, a melhor classe de imagens para identificação da nutrição de zinco no milho foi o meio das folhas novas com PAG de 34,55% e índice Kappa “não confiável” (Tabela 12). O sistema confundiu muito os Tratamentos 2, 3, e 4, o que ocasionou nesses índices tão baixos, ressaltando, que

nesse estágio o T1 já manifestava claramente anomalias nutricionais decorrentes da deficiência de cobre, mesmo assim o índice de classificação desse tratamento também ficou baixo, mesmo estando acima dos outros três tratamentos.

Tabela 12 - Resultados da visão artificial na identificação dos tratamentos com doses de cobre nas folhas novas e indicativa do estágio V7 de desenvolvimento.

Wavelets Gabor Multiespectral e fractais Colorido	Probabilidade de acerto global (PAG)	Índice Kappa
MeioFN	34,550	0,127
MeioFI	31,000	0,080

No estágio R1 de desenvolvimento do milho, foram feitas análises pelo SVA das classes: meio das folhas novas (Quadro 36) e meio das folhas indicativas do estágio de desenvolvimento R1 (Quadro 37).

T1	T2	T3	T4	
66,8	13,6	6,2	13,4	T1
11,2	88,0	0,0	0,8	T2
9,8	1,0	49,2	40,0	T3
13,8	2,2	36,0	48,0	T4

Quadro 36. Matriz de confusão do meio das folhas novas na terceira coleta dos tratamentos de cobre.

T1	T2	T3	T4	
83,0	15,4	0,2	1,4	T1
24,4	46,8	16,0	12,8	T2
1,0	17,4	50,2	31,4	T3
1,8	24,8	24,6	48,8	T4

Quadro 37. Matriz de confusão do meio das folhas indicativas do estágio R1 de desenvolvimento do milho dos tratamentos de cobre.

A melhor classe de imagens para a classificação foi o meio das folhas novas com PAG de 63,00% e índice Kappa “moderado” (Tabela 13).

Esse resultado, possivelmente não expressa a realidade, pois o que aconteceu, na verdade, foi uma excelente classificação do T1 na classe de imagens meio das folhas indicativas do estágio R1 de desenvolvimento. O que ocorreu é que pelo sistema confundir muito os demais tratamentos os índices ficaram muito baixos, novamente, se os tratamentos

que não apresentaram anomalias causadas pela deficiência induzida do elemento estudado fossem considerados como uma mesma classe de imagens, a acuidade do sistema melhoraria consideravelmente.

Tabela 13 - Resultados da visão artificial na identificação dos tratamentos com doses de cobre nas folhas novas e indicativa do estágio R1 de desenvolvimento.

Wavelets Gabor Multiespectral e fractais Colorido	Probabilidade de acerto global (PAG)	Índice Kappa
MeioFN	63,000	0,507
MeioFI	57,200	0,429

Os tratamentos que o sistema mais confundiu foram o T2, o T3 e o T4 nos estádios em todos os estádios de desenvolvimento, mas nos estágio V4 e V7 o T1 também não foi bem classificado, diferentemente do estágio R1 onde o T1 foi classificado muito bem.

Seguindo as considerações, supracitadas, o melhor resultado do experimento de cobre foi no estágio de desenvolvimento R1 na classe meio das folhas indicativas com probabilidade de acerto de 83,0%, 46,8%, 50,2% e 48,8%, respectivamente para os tratamentos T1, T2, T3 e T4, com índice Kappa “moderado”.

5 CONCLUSÕES

5.1 Ferro

- As doses de Fe na solução nutritiva que propiciaram as maiores produções de MS na parte aérea das plantas foram de $42,71 \text{ mg.L}^{-1}$ e $37,66 \text{ mg.L}^{-1}$, respectivamente para os estádios V7 e R1 e para a produção das raízes nas mesmas épocas foram de $42,61 \text{ mg.L}^{-1}$ e $37,09 \text{ mg.L}^{-1}$.
- O sistema de visão artificial obteve o melhor resultado no estádio R1, na classe de imagem “meio das folhas novas” com classificação confiável e PAG de 77,5%, com acertos individuais de 97,2%, 94,6%, 43,6% e 74,6%, respectivamente para T1, T2, T3 e T4.

5.2 Boro

- As doses de B na solução nutritiva que propiciaram as maiores produções de MS na parte aérea das plantas foram de $0,392 \text{ mg.L}^{-1}$ e $0,387 \text{ mg.L}^{-1}$, respectivamente para os estádios V7 e R1 e para a produção das raízes na época R1 foi de $0,353 \text{ mg.L}^{-1}$.
- O sistema de visão artificial obteve o melhor resultado no estádio V7, na classe de imagem “meio das folhas novas” com classificação confiável e PAG de 81,7%, com acertos individuais de 91,2%, 93,8%, 71,6% e 70,2%, respectivamente para T1, T2, T3 e T4.

5.3 Zinco

- A dose de Zn na solução nutritiva que propiciou a maior produção de MS na parte aérea das plantas foi de $0,14 \text{ mg.L}^{-1}$ para o estádio R1 e para a produção das raízes na mesma época foi de $0,137 \text{ mg.L}^{-1}$.
- O sistema de visão artificial obteve o melhor resultado no estádio V4, na classe de imagem “ponta das folhas indicativas” com classificação confiável e PAG de 81,0%, com acertos individuais de 83,2%, 89,6%, 77,4% e 73,8%, respectivamente para T1, T2, T3 e T4.

5.4 Cobre

- As doses de Cu na solução nutritiva que propiciaram as maiores produções de MS na parte aérea das plantas foram de $0,030 \text{ mg.L}^{-1}$ e $0,034 \text{ mg.L}^{-1}$, respectivamente para os estádios V7 e R1 e para a produção das raízes na época R1 foi de $0,033 \text{ mg.L}^{-1}$.

- O sistema de visão artificial obteve o melhor resultado no estágio R1, na classe de imagem “meio das folhas indicativas” com classificação moderada e PAG de 57,2%, com acertos individuais de 83,0%, 46,8%, 50,2% e 48,8%, respectivamente para T1, T2, T3 e T4.

REFERÊNCIAS

- ABREU, C.A.; FERREIRA, M.E.; BORKERT, C.M.; Disponibilidade e Avaliação de Elementos Catiônicos: Zinco e Cobre. In: (eds.) FERREIRA, M. E.; CRUZ, M.C.P.; RAIJ, B. van.; ABREU, C.A. **Micronutrientes e elementos tóxicos na Agricultura**. Jaboticabal, CNPq/FAPESP/POTAFOS, p.125-150, 2001.
- AGRIANUAL. **Anuário da agricultura brasileira**. FNP/M&S. São Paulo, 2011. 419p.
- ABREU, C.A.; LOPES, A.S.; ANDRADE, D.S. Identificação de deficiências de micronutrientes em cinco solos de várzeas da região de cerrados de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, 22 (8): 833-41, 1987.
- ANDRADE, A.G.; HAAG, H.P.; OLIVEIRA, G.D.; SARRUGE, J.R. acumulação diferencial de nutrientes por cinco cultivares de milho (*Zea mays L.*). Diagnose foliar. **Anais da Escola superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"**. Piracicaba, 32: 173-83, 1975.
- APPLETON, Sir EDWARD. Apud MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição de plantas**. São Paulo, ed. Agronômica Ceres, 2006, p.70.
- ARAÚJO, F. F.; TIRITAN, C. S.; PEREIRA, H. M.; CAETANO JÚNIOR, O. Desenvolvimento do milho e fertilidade do solo após aplicação de lodo de curtume e fosforita. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.12, n.5, p.507-511, 2008.
- ASSAD, E. D.; SANO, E. E.; CUNHA, S. A. R.; CORREA, T. B. S.; RODRIGUES, H. R. Identificação de impurezas e misturas em pó de café por meio de comportamento espectral e análise de imagens digitais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.37, n.2, p.211-216, 2002.
- AWAD, M; CASTRO, P.R.C. **Introdução a fisiologia vegetal**. São Paulo, Nobel, 1983. 177p.
- BACKES, A.R.; BRUNO, O.M. Plant leaf identification based on volumetric fractal dimension. **Internacional Jornal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence**, v.23 p.1145-1160, 2009.
- BACKES, A.R.; BRUNO, O.M. Segmentação de texturas por análise de complexidade. **INFOCOMP**, v.5, n.1, p.87-95, 2006.
- BAESSO, M. M.; PINTO, F. A. C.; QUEIROZ, D. M.; VIEIRA, L. B.; ALVES, E. A. Determinação do "status" nutricional de nitrogênio no feijoeiro utilizando imagens digitais coloridas. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v.27, n.2, p.520-528, 2007.
- BARBOSA, Z.; SOARES, I.; CRISÓSTOMO, L. A. Crescimento e absorção de nutrientes por mudas de gravioleira. **Revista Brasileira de Fruticultura**. Jaboticabal, v.25, n.3, p.519-522, 2003.
- BATAGLIA, O.C. Análise química de plantas. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P., (eds.) **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba, POTAFOS/CNPq, p.289-308, 1991.

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).

BATISTA, L.F.; BATISTA, R.A.B. Efeito do cálcio e do pH do solo na absorção de manganês, ferro e fósforo e na produção do Milho (*Zea mays*, L.) **Agropecuária Técnica**. Areia, 2 (1):31-9, 1981.

BEAUFILS, E.R.; SUMNER, M.E. Application of DRIS approach for calibrating soil, plant yield and plant quality factor of sugar cane. **Proceedings of the South African Sugar Technologists Association**. Pietermaritzburg, v.6, p.1-7, 1976.

BERGER, K. C.; PRATT, P. F. **Advances in secondary and micronutrient fertilization**. Em: Fertilizer technology and usage. P. 287-340. M. H. Mcvickar, G. L. Bridger & L. B. Nelson, eds. Soil Sci. Soc. Amer. Madison, 1963. 464p.

BLEVINS, D. G.; LUKASZEWSKI, K. M. **Boron in plant structure and function**. Ann. rev. Plant physiol. And plant. Mol. Biol. 49:481-500.1998.

BORKERT, C.M.; PAVAN, M.A.; BATAGLIA, O.C. Disponibilidade e Avaliação de Elementos Catiônicos: Ferro e Manganês. In: (eds.) FERREIRA, M. E.; CRUZ, M.C.P; RAIJ, B. van.; ABREU, C.A. **Micronutrientes e elementos tóxicos na Agricultura**. Jaboticabal, CNPq/FAPESP/POTAFOS, p.151-186, 2001.

BRANDALIZZE, V. Mercado de milho: realidade e perspectivas. In: FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Milho. Manejo e produtividade**. Piracicaba: USP/ESALQ/LPV, 2009. p.1-12.

BRIEGER, K. S.; BLUMENSCHN, A. Botânica e origem do milho. In: Instituto brasileiro de potassa, ed. **Cultura e adubação do milho**. São Paulo, 1966. p.81-108.

BRITTO, D.P.P.S.; CASTRO, A.F.; MENDES, W.; JACCOUD, A.; RAMOS, D.P.; COSTA, F.A. Estudo das relações a micronutrientes em Latossolo Vermelho-Escuro sob vegetação de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, 6: 17-22, 1971. (Série Agronomia)

BÜLL, L.T. **Influência da relação K/(Ca+Mg) do solo na produção de matéria seca e na absorção de potássio por gramínea e leguminosa forrageiras**. 1986. 107p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1986.

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

CAKMAK, I.; MARSCHNER, H.; BANGERTH, F. Effect of zinc nutritional status on growth, protein metabolism and levels of indole-3-acetic acid and other phytohormones in bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **J. Exp. Bot.**, 40: 405-412, 1989.

CAKMAK, I.; MARSCHNER, H. Enhanced superoxide radical production in roots of zinc-deficient plants. **J. Exp. Bot.**, 39: 1449-1460, 1988.

CASANOVA, D. **Identificação de espécies vegetais por meio da análise de textura foliar**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/55/55134/tde-04032009-101456/>>. Acesso em: 2012-09-03.

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**. Pelotas, v.25, n.1, p.29-36, 2003.

CLEMENTS, H.F. Crop logging of sugar cane in Hawaii. In: **Plant an alysis and ferilizer problem**. Washington. W. Reuther, ed. Amer. Inst. Biol. Sci. Publ. 8. 1961. 454p.

COELHO, A. M.; ALVES, V. M. C. **Adubação fosfatada na cultura do milho**. In: Simpósio Sobre Fósforo na Agricultura Brasileira, Piracicaba, 2003. Anais. Piracicaba, Potafos/Anda, 2003. 31p. CD-ROM.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra3graos>. Acesso em 23 de agosto de 2012.

CONCEIÇÃO, H. E. O.; PINTO, J. E. B. P.; SANTIAGO, E. J. A.; GONÇALVES, A. A. S. Crescimento e desenvolvimento de *Derris urucu* (Kellipet Smith) Macdride na ausência de macronutrientes em solução nutritiva. **Ciência e agrotecnologia**, Lavras, v.26, n.3, p.472-479, 2002.

COTRIN, G. **História para ensino médio – Brasil e geral**. 1 ed. São Paulo: Editora Saraiva, p.13-14, 2002.

DECARO, ST.; VITTI, G.C.; FORNASIERI FILHO, D.; MELLO, W.J. Efeito de doses e fontes de zinco na cultura do milho (*Zea mayz* L.). **Revista de Agricultura**. Piracicaba, 58(1-2):25-36, 1983.

EPISTEIN, 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.

EPISTEIN, 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.

EPISTEIN, E. Silicon. Annu. **Rev. Plant Physiol. Mol. Biol.** v.50, p.641-664, 1999.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; CLARK, R. B. **Micronutrients in crop production**. Adv. Agron. 77: 185-268p. 2002.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba, Ed. Agropecuária, 2000. 360p.

FANCELLI, A.L. **Milho: nutrição e adubação**. Piracicaba. FEALQ. 2008. 212p.

FANCELLI, A. L. Nutrição e adubação de milho. In: FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Milho. Manejo e produtividade**. Piracicaba: USP/ESALQ/LPV, 2009. p.60-97.

FANCELLI, A.L. **Plantas alimentícias: guia para aulas, estudo e discussão**. Piracicaba: Centro Acadêmico “Luiz de Queiroz”, ESALQ/USP, 1986. 131p.

FISHER, K. S.; PALMER, A. F. E. Tropical maize. In: GOLDSWORTHY, P. R.; FISCHER, N. M. **The physiology of tropical field crops**. New York, John Wiley & Sons, 1984. Cap. 6. 213-248p.

FONTES, P. C. R. **Diagnóstico do estado nutricional das plantas**. Viçosa: Editora UFV (Universidade Federal de Viçosa), 2004. 122p.

FONTES, P. C. R.; DIAS, E. N.; GRAÇA, R. N. Acúmulo de nutrientes e método para estimar doses de nitrogênio e de potássio na fertirrigação do pimentão. **Horticultura Brasileira**. Brasília, v.23, n.2, p.275-280, 2005.

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

FRALEY, R.T.; ROGERS, S.G; HORSCH, R.B.; SANDERS, P.R.; FLYCK, J.S. Genetic transformation in higher plants. **CRC Critical reviews in plant sciences**. Boca Raton, v: 1-46, 1989.

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

GALLO, J.R.; HIROCE, R.; BATAGLIA, O.C.; MORAES, F.R.P. Levantamento de cafezais do estado de São Paulo pela análise química foliar. I. solos Podzolizados de Lins e Marília, Latossolo Roxo e Podzólico Vermelho amarelo-orto. **Bragantia**, 29:237-247, 1970.

GALLO, J.R.; IGUE, T.; BATAGLIA, O.C.; FURLANI, A.M.C.; MIRANDA, L.E.C. Influência do uso contínuo de fertilizantes na nutrição mineral do milho híbrido IAC Hmd/6999B. In: **Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 15. Campinas, p.245-254, 1976.

GALRÃO, E.Z. Efeito de micronutrientes e do cobalto na produção e composição química do arroz, milho e soja em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas, 8(1):111-6, 1984.

GALRÃO, E.Z.; MESQUITA FILHO, M.V. Efeito de fontes de zinco na produção de matéria seca do milho em um solo sob cerrado. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. Campinas, 5(3):167-70, 1981a.

GALRÃO, E.Z.; MESQUITA FILHO, M.V. Efeito de micronutrientes na produção e composição química do arroz (*Oryza sativa* L.) e do milho (*Zea mays* L.) em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. Campinas, 5 (1): 72-5, 1981b.

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

GOLDBERG, S. Reactions of boron with soils. **Plant Soil**, 193: 35-48, 1997.

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

GOODMAN, B.A.; CHESHIRE, M.V. The occurrence of copper-porphyrin complexes in soil humic acids. **J. Soil Sci.**, 27: 337-347, 1976.

GRANGEIRO, L. C.; CECÍLIO FILHO, A. B. Acúmulo e exportação de macronutrientes pelo híbrido de melancia Tide. **Horticultura Brasileira**. Brasília, v.22, n.1, p.93-97, 2004.

GRUNES, D.L.; BOAWN, L.C.; CARLSON, C.W.; VIETS Jr., F.G. Zinc deficiency of corn and potatoes as related to soil and plant analysis. **Agronomy Journal**. Madison, 53: 68-71, 1961.

GUPTA, U.C.; GUPTA, S.C. Trace element toxicity relationship to crop production and livestock and human health: implications for management. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, 29: 1491-1522, 1998.

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

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo demográfico 2010**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default.shtm>. Acesso em: 23 de agosto de 2012.

IGUE, K.; BLANCO, H.G.; ANDRADE SOBRINHO, J. Influência do zinco na produção do milho. **Bragantia**. Campinas, 21: 261-9, 1962.

KENWORTHY, A.L. Interpreting the balance of nutrient elements in leaves of fruit trees. In: **Plant Analysis and Fertilizer Problem**. W. Reuther, ed. Amer. Inst. Biol. Sci. Publ. Washington. 1961. 454p.

KHOURY JUNIOR, J. K.; PINTO, F. A. C.; SANTOS, N. T.; LÚCIA, R. M. D.; MAEDA, E. E. Análise discriminante paramétrica para reconhecimento de defeitos em tábuas de eucalipto utilizando imagens digitais. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n.2, p.299-309, 2005.

KRAUSKOPF, K. B. Geochemistry of micronutrients. In: (eds.) MORTVEDT, J.J.; GIORDANO, P.M.; LINDSAY, W. L. **Micronutrients in agriculture**. p. 7-40.. Soil sci. soc. amer., Inc. Madison, 1972. 666p.

LAGATO, H.; MAUME. L. Recherches sur le diagnostic foliaire. **Ann. Ecole Natl. Agr.** Montpellier, v.22, p.257-806, 1934.

LIMA FILHO, O.F. **Calibração de boro e zinco para cafeeiro (*Coffea arabica* L. cv. Catuai Amarelo)**. 1991. 100p. Dissertação (Mestrado) - Centro de energia nuclear na agricultura, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1991.

LIMA FILHO, O.F.; MALAVOLTA, E. **Evolution of extraction procedures on determination of critical soil and foliar levels of boron and zinc in coffee plants**. **Commun. Soil sci. plant anal.** Athens 29(7 e 8): 825-834. 1998.

LINDSAY, W. L. Inorganic phase equilibria of micronutrients in soil. In: (eds.) MORTVEDT, J.J.; GIORDANO P.M.; LINDSAY, W. L. **Micronutrients in agriculture**. p. 41-57..Soil sci. soc. amer., Inc. Madson, 1972. 666p.

LOUÉ, A. **Oligoelements em agriculture**. SCPA, Nathan. Paris, 1993. 577p.

MAGALHÃES, J.R.; MONNERAT, P.H. Aplicação foliar de boro na prevenção de deficiência e na composição mineral do tomateiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, 13: 81-89, 1978.

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.; 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.

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.

MOGES, S.M.; RAUN, W.R.; MULLEN, R.W.; FREEMAN, K.W.; JOHNSON, G.V; SOLIE, J.B. Avaluation of green, red and near infrared bands for predicting winter wheat biomass, nitrogen up take, and final grain yield. **J. Plant Nutrition** 27 (8): 1431-1441p. 2004.

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.

MOZAFAR, A. Effect of boron on ear formation yield componentes of two maize (*Zea mayz* L.) hybrids. **Jornal of Plant Nutrition**. New York, 10 (1): 319-32, 1987.

MUNSON, R.D.; NELSON, W.L. Principles and pratices in plant analysis. In: WALSH, L.M.; BEATON, J.D. (Eds). **Soil testing and plant analysis**. p.223-248, 1973.

OLIVEIRA, A.M.; CALDAS, R.C. Produção do mamoeiro em função de adubação com nitrogênio, fósforo e potássio. **Revista Brasileira de Fruticultura**. Jaboticabal, v.26, n.1, p.160-163, 2004.

ONU - Organização das Nações Unidas. **A ONU e a população mundial**: Disponível em: <http://www.onu.org.br/a-onu-em-acao/a-onu-em-acao/a-onu-e-a-populacao-mundial/>. Acesso em: 23 de agosto de 2012.

PARRY, M. M.; KATO, M. S. A.; CARVALHO, J. G. Macronutrientes em caupi cultivado sob duas doses de fósforo em diferentes épocas de plantio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.12, n.3, p.236-242, 2008.

PATERNIANI, E. Evolução do milho e implicação no melhoramento. In: Colóqui sobre citogenética e evolução de plantas, 1ª, Piracicaba, 1984, **Anais...** Piracicaba, ESALQ, 1984. p.235-239.

PATERNIANI, E. Métodos tradicionais de melhoramento do milho. In: BÜLL, L. T.; CANTARELLA, H. **Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: POTAFOS, 1993. p.23-42.

PEREIRA, J.; VIEIRA, I.F.; MORAIS, E.A.; REGO, A.S. Níveis de sulfato de zinco em milho (*Zea mays L.*) em solos de campo cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, 8: 187-91, 1973. (Série Agronomia)

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.

PRADO, R.M.; ROZANE, D.E.; DO VALE, D.W.; CORREIA, M.A.R.; DE SOUZA, H.A. (eds). **Nutrição de plantas diagnose foliar em grandes culturas**. Jaboticabal. FCAV, Capes/Fundunesp, p.56, 2008. 391p.

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. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres, 1991. 343 p.

RAMBO, L.; SILVA, P. R. F.; ARGENTA, G.; SANGOI, L. Parâmetros de planta para aprimorar o manejo da adubação nitrogenada de cobertura em milho. **Ciência Rural**. Santa Maria, v.34, n.5, p.1637-1645, 2004.

RAVEN, P.H.; EVERT, R.F.; EICHHORN, S.E. **Biologia Vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 7ª edição, 2007. 830p.

REUTHER, W.; LABANAUSKAS, C.K. Copper. In: (ed.) CHAPMAN, H.D. **Diagnostic criteria for plant and soil**. Riverside, University of California, p.157-159, 1966.

RITCHEY, K.D.; COX, F.R.; GALRÃO, E.Z.; YOST, R.S. Disponibilidade de zinco para a cultura do milho, sorgo e soja em Latossolo Vermelho-Escuro Argiloso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, 21 (3): 215-25, 1986.

RÖMHELD, V.; MARSCHNER, H. Function of micronutrientes in plants. In: MORTVEDT, J.J.; COX, F.R.; SHUMAN, L.M.; WELCH, R.M., (eds.) **Micronutrients in agriculture**. 2. Ed. Madison, Soil Science Society of America, p.297-328, 1991.

SARCINELLI, T. S.; RIBEIRO JR., E. S.; DIAS, L. E.; LYNCH, L. S. Sintomas de deficiência nutricional em mudas de *Acaciaholo sericea* em resposta à omissão de macronutrientes. **Revista Árvore**. Viçosa, v.28, n.2, p.173-181, 2004.

SHELP, B. J. Physiology and biochemistry of boron in plants. In: (ed.) GUPTA, U. C. **Boron and its role in crop production**. p. 53-85. CRC Press. Boca Raton. 1993.

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

SOUZA, E.A.; MASSOLI, F.; SARTORI, J.L.; FERREIRA, M.E. Respostas da cultura de milho à aplicação de micronutrientes em forma de óxidos silicatados. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 15., Campinas, 1975. **Anais...** Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.271-5, 1976.

STEVENSON, F.J.; FITCH, A. Reaction with organic matter. In: (eds.) LONERAGAN, J.F. ROBSON, A.D.; GRAHAM, R.D. **Copper in soils and plants**. Sydney, Academic Press, p.69-96, 1981.

SUMNER, M.E.; FARINA, M.P.W. Phosphorus interaction with other nutrientes and lime in field cropping systems. **Advances in Soil Science**. New York, 5: 201-36, 1986.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 4º edição, 2009. 848p.

TEIXEIRA, E. F.; CICERO, S. M.; DOURADO NETO, D. Análise de imagens digitais de plântulas para avaliação do vigor de sementes de milho. **Revista Brasileira de Sementes**. Pelotas, p.56-61, v.28, n.2, 2006.

ULRICH, A.; HILL, F.J. Principles and practices of anaysis. In: HARDY, G.W. (ed) Soil testin gand plant analysis. Madison, **Soil Sci. Soc. Am.**, p.11-24, 1967.

ULRICH, A. Plantanalysis – methods and interpretation of results. In: KITCHEN, H.B. (ed). **Diagnostic Teschniques for Soil and Crops**. Washington. American Potash Institute, p.157-198, 1948.

URANO, E. O. M.; KURIHARA, C. H.; MAEDA, S.; VITORINO, A. C. T.; GONÇALVES, M. C.; MARCHETTI, M. E. Avaliação do estado nutricional da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.41, n.9, p.1421-1428, 2006.

VIDIGAL, S. M.; PACHECO, D. D.; FACION, C. E. Crescimento e acúmulo de nutrientes pela abóbora híbrida tipo Tetsukabuto. **Horticultura Brasileira**. Brasília, v.25, n.3, p.375-380, 2007.

VITTI, G. C.; FAVARIN, J. L. In: FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. **Tecnologia da produção de milho**. Piracicaba: Publique, p.104-120, 1997.

WASKOM, R.M.; WESTFALL, D.G.; SPELLMAN, D.E.; SOLTANPOUR, P.N. Monitoring nitrogen status of corn with a portable chlorophyll meter. Commun. **Soil Sci. Plant Ana.**, v.27, p.545-560, 1996.

WITT, C.; PASUQUIN, J.M.C.A.; MATTERS, R. BURESCH, R.J. New leaf color chart for effective nitrogen management in rice. **Better Crops** 89 (1): p.36-39. 2005.

WOODRUFF, J.R.; MOORE, F.W.; MUSEN, H.L. Potassium, boron, nitrogen, and lime effects on corn yield and nutrient concentrations. **Agronomy Journal**. Madison, 79 (3): 520: 4, 1987.

YONEBAYASHI, K.; OKAZAKI, M.; PECHAYAPISIT, J.; VIJARNSORN, P.; ZAHARI, A.B.; KYUMA, K. Distribution of heavy-metals among different bonding forms in tropical peat soil. **Soil Sci. Plant Nutrition**, 40: 425-434, 1994.

ZAMBRYNSKY, P.; TEMPE, J.; SCHELL, J. Transfer and function of T-DNA genes from *Agrobacterium* Ti and Ri plasmids into plants. **Cell**. Cambridge, 56: 193-201, 1989.