UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS

FERNANDA DE FÁTIMA DA SILVA

**Sistema de visão artificial para a identificação da nutrição de
milho submetido a níveis de cálcio, magnésio e enxofre.**

Pirassununga/SP

2011

FERNANDA DE FÁTIMA DA SILVA

Sistema de visão artificial para a identificação da nutrição de milho submetido a níveis de cálcio, magnésio e enxofre.

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

2011

Dedicatória

A meus pais, Norberto e Joana,

sempre me incentivando e apoiando, foram fundamentais para que eu conquistasse mais essa vitória.

Ao meu noivo, Marcio,

sempre presente e paciente, foi um instrumento fundamental para me apoiar e para superar as dificuldades

A minha amiga e companheira, Liliane,

que me ajudou, e muito, na execução deste trabalho.

Agradecimentos

A Deus,

que esteve ao meu lado em todo momento, me fortalecendo e animando diante das situações difíceis que passei durante esta etapa.

Ao professor Dr. Pedro Henrique de Cerqueira Luz,

por sua orientação e compreensão, me auxiliando a desenvolver meu trabalho.

Ao professor Dr. Valdo Rodrigues Herling,

por toda alegria e força que me proporcionou diante das adversidades encontradas.

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

professor Dr. Odemir Martinez Bruno e Alvaro Gómez Zúñiga,

pela oportunidade de trabalharmos em conjunto e pela dedicação a mim destinada.

Aos meus grandes amigos, Glaziela, Liliane, Nancy e Mário,

pela amizade e dedicação de cada um.

Aos funcionários da Casa das Agrárias,

pela ajuda no desenvolvimento das análises do experimento.

*Tu que habitas sob a proteção do Altíssimo, que moras à sombra do Onipotente,
dize ao Senhor: Sois meu refúgio e minha cidadela, meu Deus, em que eu confio.*

É ele quem te livrará do laço do caçador, e da peste perniciosa.

Ele te cobrirá com suas plumas, sob suas asas encontrarás refúgio.

Sua fidelidade te será um escudo de proteção.

Tu não temerás os terrores noturnos, nem a flecha que voa à luz do dia,

nem a peste que se propaga nas trevas, nem o mal que grassa ao meio-dia.

Caíam mil homens à tua esquerda e dez mil à tua direita, tu não serás atingido.

*Porém verás com teus próprios olhos, contemplarás o castigo dos pecadores,
porque o Senhor é teu refúgio.*

Escolheste, por asilo, o Altíssimo.

Nenhum mal te atingirá, nenhum flagelo chegará à tua tenda,

porque aos seus anjos ele mandou que te guardem em todos os teus caminhos.

Eles te sustentarão em suas mãos, para que não tropeces em alguma pedra.

Sobre serpente e víbora andarás, calcarás aos pés o leão e o dragão.

Pois que se uniu a mim, eu o livrarei; e o protegerei, pois conhece o meu nome.

Quando me invocar, eu o atenderei; na tribulação estarei com ele.

Hei de livrá-lo e o cobrirei de glória.

Será favorecido de longos dias, e mostrar-lhe-ei a minha salvação.

RESUMO

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

A pesquisa visou a avaliar o processamento de imagens digitais pelo Sistema TreeVis (SVA) para identificar o estado nutricional de plantas de milho com níveis induzidos de Ca; Mg e S em plantas de milho (*Zea mays* L.). Foram utilizados tratamentos constituídos pela omissão completa e individual dos nutrientes Ca, Mg e S e para cada nutriente foram avaliadas doses crescentes (1/3, 2/3 e completa) do elemento e 4 repetições. Esse experimento foi realizado em casa de vegetação sob cultivo hidropônico, conduzido em vasos com solução nutritiva. Foram determinados os parâmetros de crescimento da cultura do milho (altura da planta, número de folhas e diâmetro do colmo) e massa seca das plantas. Foram feitas amostragens de plantas em V4, V6 e V8, visando determinar os teores de macro e micronutrientes das raízes e parte aérea e observados a sintomatologia de deficiência das plantas. Nesses estádios, através de um sistema de visão artificial, também foram obtidas as imagens das folhas. A omissão de Ca, Mg e S na solução nutritiva promoveu sintomas típicos de deficiência de cada nutriente em plantas de milho. O sistema de visão artificial conseguiu identificar os sintomas de deficiência de Ca, Mg e S com 80%, 75,5% e 78% de acertos, respectivamente.

Palavras-chave: nutrição de plantas; Sistema TreeVis; *Zea mays* L.; solução nutritiva; parâmetros de crescimento.

ABSTRACT

SILVA, F.F. **Artificial vision system to identify the nutrition of maize subjected to levels of calcium, magnesium and sulfur.** 2011. 143f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2011.

The research aimed to evaluate the processing of digital images by TreeVis System (AVS) to identify the nutritional status of corn plants with induced levels of Ca, Mg and S in corn (*Zea mays* L.). Treatments used were made by the individual and complete omission of Ca, Mg and S and for each nutrient were evaluated escalating doses (1/3, 2/3 and complete) element and four replications. This experiment was conducted in a greenhouse under hydroponic cultivation in pots with nutrient solution. It was determined the growth of corn (plant height, leaf number and stem diameter) and plant dry. Samples were collected from plants in V4, V6 and V8 engines, to determine the levels of macro and micronutrients from the roots and shoots and observed symptoms of deficiency of plants. In these stages, through an artificial vision system, images were also obtained from the leaves. The omission of Ca, Mg and S in the nutrient solution caused symptoms typical of each nutrient deficiency in maize plants. The artificial vision system could identify the symptoms of deficiency of Ca, Mg and S with 80%, 75.5% and 78% accuracy, respectively.

Keywords: plant nutrition; TreeVis System; *Zea mays* L.; nutrient solution, growth parameters.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. REVISÃO DE LITERATURA	9
2.1. Importância nacional da cultura do milho	9
2.2. Nutrição mineral do milho.....	10
2.3. Nutrientes estudados.....	12
2.3.1. Cálcio	12
2.3.2. Magnésio	14
2.3.3. Enxofre	15
2.4. Avaliação nutricional da cultura do milho	17
2.5. Método computacional do sistema de visão artificial (SVA).....	19
2.6. Objetivos.....	20
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1. Local do experimento	21
3.2. Cultura estudada e caracterização do híbrido	21
3.3. Instalação e condução do experimento	21
3.4. Delineamento experimental.....	23
3.5. Experimentos realizados.....	24
3.5.1. Cálcio	24
3.5.2. Magnésio	26
3.5.3. Enxofre	27
3.6. Coleta de imagens.....	28
3.7. Composição das soluções nutritivas	28
3.8. Avaliações no material vegetal.....	29
3.8.1. Produção de massa seca e parâmetros de planta	29
3.8.2. Análises químicas	30
3.8.3. Acúmulo de nutriente	30
3.9. Estudo do sistema de visão artificial	31
3.10. Forma de análise dos resultados	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1. Cálcio.....	35
4.1.1. Sintomas visuais	35
4.1.2. Parâmetros de crescimento da planta	37
4.1.3. Acúmulo de nutrientes	41
4.1.4. Relação entre nutrientes	56
4.1.5. Sistema de Visão Artificial	58
4.2. Magnésio	69
4.2.1. Sintomas visuais	69
4.2.2. Parâmetros de crescimento da planta	71
4.2.3. Acúmulo de nutrientes	74
4.2.4. Relação entre nutrientes	90
4.2.5. Sistema de Visão Artificial	92
4.3. Enxofre	103
4.3.1. Sintomas visuais	103
4.3.2. Parâmetros de crescimento da planta	104
4.3.3. Acúmulo de nutrientes	107
4.3.4. Relação entre nutrientes	121
4.3.5. Sistema de Visão Artificial	123
5. CONCLUSÕES.....	133
REFERÊNCIAS.....	136

1. INTRODUÇÃO

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

De acordo com a CONAB (2010), o cultivo de milho está bastante tecnificado, fazendo com que a produtividade tenha aumentos crescentes nas últimas safras. 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 do milho, desta forma, deve-se manter a planta sempre bem nutrida (RAMBO et al., 2004).

Segundo Alvarez et al. (2006), a demanda por proteína de origem animal cresceu significativamente na última década, o que consequentemente aumentou a procura por este cereal. A dificuldade de atender esta crescente demanda, a competição com outras culturas pela ocupação da atual fronteira agrícola e a forte perspectiva de expansão de mercados externos para este cereal e seus derivados, alertam a pesquisa para a necessidade de trabalhos que objetivem obter maior eficiência na atividade e maior competitividade no mercado.

O aprimoramento dos métodos de identificação do estado nutricional das plantas, aliado à necessidade de melhorias na eficiência do uso dos nutrientes presentes no solo ou aplicados via adubação, para obtenção de altas produtividades pelas culturas, tem levado a busca por tecnologias, seja do ponto de vista agrônomo, econômico ou ambiental.

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

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Importância nacional da cultura do milho

O milho é muito utilizado como volumoso para alimentação de animais, devido a seu grande potencial produtivo de matéria seca aliado à capacidade de produção de grãos, que enriquecem o volumoso produzido (ALVAREZ et al., 2006).

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

Segundo a EMBRAPA (2006), o desenvolvimento da produção e do mercado do milho deve ser analisado, preferencialmente, sob a ótica das cadeias produtivas ou dos sistemas agro-industriais. O milho é insumo para produção de uma centena de produtos, porém na cadeia produtiva de suínos e aves são consumidos aproximadamente 70% do milho produzido no mundo e entre 70 e 80% do milho produzido no Brasil.

De acordo com previsão feita pela CONAB (2010), referente à safra 2009/2010, o Brasil terá uma produção de cerca de 50 milhões de toneladas, em uma área cultivada de aproximadamente 13 milhões de hectares. A produtividade média prevista para esta safra será de 3.906 kg/hectare, 7,6% maior que a alcançada na safra 2008/2009. O aumento se deve a maior produtividade estimada para a região Centro-Sul do país, que teve frustração da safra anterior devido a condições climáticas adversas, principalmente pela má distribuição das chuvas e ocorrência de períodos de estiagem na fase crítica do desenvolvimento da cultura.

Para Fancelli (2010), a cultura do milho, comparativamente a outras espécies cultivadas, tem apresentado avanços significativos nas mais diversas áreas do conhecimento agrônomo, principalmente no que se refere à ecologia, fisiologia e nutrição, proporcionando melhor compreensão de suas relações com o ambiente de produção.

Para que possa expressar todo seu potencial produtivo, a cultura do milho requer que suas exigências nutricionais sejam plenamente atendidas, em virtude da grande extração de nutrientes do solo (AMARAL FILHO et al., 2005), desta forma, deve-se manter a planta

sempre bem nutrida. Independente da tecnologia empregada, o ambiente de produção constitui o principal condicionador de desempenho e produtividade da planta de milho (FANCELLI, 2010). A utilização de cultivares mais produtivos e adaptados às condições regionais consiste em uma tecnologia essencial para melhorar a produtividade da cultura, principalmente por não implicar em aumento substancial de capital investido (FORNASIERI FILHO, 1992).

2.2. Nutrição mineral do milho

A obtenção de boa produtividade está diretamente ligada a uma nutrição balanceada. Da mesma forma, sabe-se que uma planta nutrida adequadamente apresenta maior resistência às doenças e pode atingir seu potencial de produtividade (OLIVEIRA; CALDAS, 2004). Uma alta produtividade é, em grande parte, resultado de adequado suprimento, distribuição e acúmulo de nutrientes pela planta (FONTES et al., 2004). O uso racional de corretivos e fertilizantes é uma das premissas necessárias para o sucesso na produção (HEINRICHS et al. 2008).

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).

O monitoramento das exigências da cultura e do seu estado nutricional constitui fator de relevante importância no processo produtivo; por outro lado, os custos financeiros com fertilizantes são elevados fazendo-se necessário maximizar cada vez mais o seu uso (DIAS et al., 2004).

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. Em geral, a absorção de nutrientes é diferenciada ao longo do ciclo (PORTO et al., 2006). Por isso, além

da quantidade absorvida de nutrientes, deve-se considerar também, a sua concentração nos diferentes estádios de desenvolvimento (MALAVOLTA et al., 1997).

A marcha de absorção expressa, na forma de curvas de resposta em função da idade das plantas, as épocas em que as plantas 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 et al. 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 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).

A determinação da quantidade de nutrientes acumulados nas plantas é importante para se avaliar a remoção dos nutrientes da área de cultivo e tornou-se um dos componentes necessários para as recomendações econômicas de adubação (PÔRTO et al., 2006). De acordo com Grangeiro et al. (2006), o conhecimento da quantidade de nutrientes acumulados na planta, em cada estágio de desenvolvimento, fornece informações importantes que podem auxiliar no programa de adubação das culturas.

Entre a emissão da quarta e sexta folhas, a região de crescimento da planta de milho (tecido meristemático) atinge a superfície do solo, iniciando o processo de diferenciação floral, o qual origina os primórdios da panícula e da espiga, bem como principia a definição do potencial produtivo da espécie (FANCELLI, 2010).

A utilização de curvas de acúmulo de nutrientes como um parâmetro para a recomendação de adubação, é uma boa indicação da necessidade de nutrientes em cada etapa do desenvolvimento da planta. Entretanto, as mesmas não devem ser utilizadas isoladamente, pois outros fatores estão envolvidos e devem ser levados em consideração como: tipo de solo, condições climáticas, cultivares, manejo cultural e fertilizantes utilizados (GRANGEIRO et al., 2006). O suprimento de nutrientes constitui-se importante fator na nutrição da planta, tendo em vista que a disponibilidade de nutrientes exerce grande influência na nutrição, que se reflete no desenvolvimento vegetal (BONFIM-SILVA; MONTEIRO, 2010).

2.3. Nutrientes estudados

Os nutrientes minerais têm funções essenciais e específicas no metabolismo das plantas (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 (EPSTEIN, 1975). Esses distúrbios geralmente revelam-se por meio de sintomas visíveis de deficiência, desde clorose e/ou necrose de folhas, crescimento reduzido ou outras anomalias. O sintoma característico para cada nutriente depende também da severidade da deficiência, da espécie, variedade ou cultivar e de fatores ambientais (MALAVOLTA, 2006).

Os sintomas de deficiência são manifestações exteriores de eventos bioquímicos que ocorrem em nível molecular e celular nos tecidos vegetais. Isso faz com que os sintomas de deficiências sejam reproduzíveis em plantas de espécies diferentes, uma vez que os processos bioquímicos exercem funções específicas, que variam pouco entre espécies (SILVA et al., 2009).

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

2.3.1. Cálcio

Há duas formas pelas quais o cálcio (Ca) pode ser absorvido pelas raízes: o íon Ca^{2+} na solução do solo (ou nutritiva) e o cálcio quelatizado da solução do solo (KIRKBY, 1984).

Segundo Maltavolta (2006), o movimento do Ca^{2+} no xilema é unidirecional na direção das raízes para a parte aérea. O cálcio é muito pouco transportado no floema e normalmente é imóvel. Desta forma, os sintomas de deficiência deste nutriente manifestam-se inicialmente nas folhas mais novas e análise das mesmas mostra teores mais baixos que os encontrados nas folhas mais velhas.

Ressalta-se ainda que a translocação de cálcio na planta se dá juntamente com a água, sendo afetada pela taxa de transpiração da planta. Portanto, os órgãos com maior taxa de transpiração recebem maior quantidade de cálcio. Nos órgãos que transpiram pouco, como as folhas novas, o transporte de cálcio é dependente das condições ambientais que favoreçam a pressão radicular (BRADFIELD; GUTTRIDGE, 1984).

A principal função do cálcio na planta é manter a integridade da parede celular e o seu fornecimento inadequado é caracterizado pelo surgimento de necrose, principalmente nas extremidades das folhas em desenvolvimento (GRANGEIRO et al., 2006).

De acordo com Malavolta et al. (1997), o cálcio é essencial para manter a integridade estrutural das membranas e das paredes celulares: quando há deficiência, as membranas começam a vazar, a compartimentação é rompida e a ligação do Ca com a pectina da parede celular é afetada; o pectato de Ca da lamela média atua como um cimento entre uma célula e outra; o cálcio tem grande importância na estrutura e funcionamento de membranas das plantas, na absorção iônica, nas reações com hormônios vegetais e na ativação enzimática e divisão celular. O cálcio é indispensável para a germinação do grão de pólen e para o crescimento do tubo polínico (MALAVOLTA, 1980a).

Para as plantas, a falta de cálcio, o aumento da acidez e o excesso de alumínio resultam em baixo crescimento do sistema radicular, com conseqüente exploração de pequenos volumes de solo, levando a baixa captação de nutrientes e água, tornando as culturas sujeitas a deficiências minerais e susceptíveis a déficits hídricos (MARIA et al., 1993).

A deficiência do cálcio nas plantas de milho também provoca a gelatinização das pontas das folhas mais novas em desenvolvimento e, quando secas, grudam umas às outras; à medida que a planta cresce, as pontas podem estar presas. Nas folhas superiores aparecem clorose internerval e necrose, dilaceração das margens e morte da região de crescimento e uma redução drástica do crescimento da planta (MALAVOLTA; VIOLANTE NETTO, 1989). Os pontos de crescimento são danificados ou morrem; o crescimento das raízes é afetado severamente e as raízes danificadas se tornam susceptíveis à infecção por bactérias e fungos (EPSTEIN, 1975).

Os solos ácidos apresentam baixas concentrações de bases, especialmente cálcio (Ca) e magnésio (Mg), apesar da ocorrência generalizada destes elementos em diversos materiais de origem do solo. O principal processo de retirada destes elementos do perfil do solo é a lixiviação, através da água de percolação, que substitui as bases por hidrogênio e alumínio, intensificando a acidificação (MARIA et al., 1993).

Normalmente, o suprimento de cálcio às plantas se dá pela calagem. Em condições onde a calagem não pode ser muito intensa, uma fonte barata de cálcio é o gesso agrícola (DEON, 2007). Fancelli (2010) também afirma que o fornecimento de cálcio e magnésio como nutriente na maioria das plantas graníferas normalmente é assegurado pela prática da

calagem. A cultura do milho depende da correção da acidez do solo e de quantidades significativas de cálcio e magnésio para a manifestação de seu potencial produtivo.

2.3.2. Magnésio

As raízes ou folhas absorvem o magnésio como íon Mg^{2+} . O transporte a longa distância ocorre da mesma forma em que é absorvido, juntamente com o K^+ e com o Ca^{2+} na corrente transpiratória (MALAVOLTA, 2006).

Como visto no item anterior, o fornecimento de cálcio e magnésio como nutriente na maioria das plantas graníferas normalmente é assegurado pela prática da calagem. Entretanto, quando mal empregada, a calagem pode contribuir para o desequilíbrio das bases no solo (FANCELLI, 2010).

De acordo com Boaro et al. (1996), os estudos que focalizam a influência do magnésio no desenvolvimento das plantas se revestem de importância pelas funções desse mineral, que pode interferir no desenvolvimento do vegetal quando houver alteração de sua concentração no meio de cultivo.

Uma das principais funções do magnésio na planta é como constituinte da molécula de clorofila, como consequência participa ativamente da fotossíntese. O magnésio entra também na composição da fitina, que se acumula nas sementes; quando estas germinam, o fósforo e o magnésio migram para as diversas partes da planta em vias de desenvolvimento, contribuindo para a formação de novos tecidos (NEPTUNE, 1984).

Segundo Epstein e Bloom (2006), o magnésio ativa mais enzimas que qualquer outro nutriente mineral. Entre essas ativações de enzimas, as mais importantes são aquelas envolvidas na transferência de energia via adenosina trifosfato (ATP). Desta forma, o magnésio mostra-se fundamental no processo efetivo da fotossíntese e, consequentemente, da atividade celular e encontra-se associado à velocidade de crescimento vegetal. Assim, sua disponibilidade ao longo do ciclo é imprescindível para garantir o desempenho satisfatório da planta de milho (FANCELLI, 2010).

O magnésio é mais abundante nos tecidos novos, alimentados pelo floema principalmente em vias de crescimento, existindo, portanto, uma diferença com o cálcio que tende a se acumular nos órgãos mais velhos, devido à pouca mobilidade no floema. Durante o ciclo de vida, a curva de acumulação do magnésio em função do tempo é comumente uma sigmóide que acompanha a produção de matéria seca (MALAVOLTA, 2006).

Plantas deficientes em magnésio apresentam coloração verde mais clara do que o normal nas partes internervurais das folhas mais velhas, com as margens verdes e, em seguida, poderão surgir áreas amareladas e necrosadas de coloração marrom. A persistência das margens verdes neste estágio é uma característica típica dessa deficiência. A clorose internerval em algumas espécies é seguida pelo desenvolvimento de cor alaranjada, vermelha (algodoeiro) ou roxa; o padrão de clorose reflete a distribuição de magnésio no tecido (MALAVOLTA, 2006).

As folhas tornam-se geralmente mais grossas, quebradiças e enroladas para cima (FONTES, 2005). Utumi et al. (1999), estudando deficiência de macronutrientes em estévia verificaram que na deficiência de magnésio, as folhas ficaram cloróticas, com as nervuras verdes e as bordas e o ápice do limbo voltados para baixo. A clorose em "V" invertido progrediu para o ápice do limbo, e tornou-se bronzeada e necrosada. Os ramos ficaram mais finos, e algumas folhas do terço mediano apresentaram-se retorcidas.

2.3.3. Enxofre

A forma predominante de absorção de enxofre (S) pelas plantas é o SO_4^{2-} , que entra em contato com a raiz quase exclusivamente por fluxo de massa, ou seja, graças ao caminhamento da solução do solo a favor do gradiente de umidade (BARBER, 1984). O enxofre predomina na planta em forma orgânica, principalmente na de proteínas, já que todas as proteínas vegetais possuem esse elemento (MALAVOLTA, 2006).

A importância do enxofre na cultura do milho tem aumentado devido ao melhoramento genético para altas produtividades, emprego de fertilizantes mais concentrados em programas de adubação, uso indiscriminado de fosfato monoamônico e diamônico, redução do uso de sulfato de amônio em cobertura e redução de matéria orgânica nos solos (FANCELLI, 2010).

O enxofre caminha da raiz para a parte aérea no xilema, na corrente transpiratória, sendo classificado como um elemento pouco móvel no floema (MALAVOLTA; MORAES, 2007). Assim, em caso de carência de enxofre na planta, os sintomas aparecem em primeiro lugar nos órgãos mais novos, como as folhas superiores (MALAVOLTA, 2006).

O enxofre (S) na planta desempenha funções que determinam aumentos na produção e na qualidade do produto obtido. Este nutriente é componente dos aminoácidos cistina, metionina e cisteína, os quais são componentes de proteínas. O enxofre está ligado também às

vitaminas biotina e tiamina, influenciando todo metabolismo de gorduras e carboidratos (VITTI, 1984).

O enxofre está entre os elementos mais versáteis na biologia. De acordo com Hell (1997), ele tem um papel fundamental na estrutura e regulação de proteínas, pois os grupos sulfurosos no aminoácido cisteína frequentemente formam pontes de bissulfeto que determinam a conformação da proteína. O enxofre participa também no transporte fotossintético e respiratório de elétrons, por meio de agrupamentos ferro-enxofre. Além disso, os sítios catalíticos de várias enzimas e coenzimas como urease e coenzima A contem enxofre.

Os sintomas de deficiência de enxofre nas plantas geralmente relembram os de deficiência de nitrogênio (EPSTEIN; BLOOM, 2006). A deficiência de enxofre provoca uma coloração amarelo-pálida ou verde suave nas folhas novas; ao contrário da deficiência em nitrogênio, os sintomas ocorrem na folhas velhas, indicando que os tecidos mais velhos não podem suprir o enxofre para os tecidos novos (MALAVOLTA; VIOLANTE NETTO, 1989). A clorose provocada pela falta de nitrogênio é semelhante à causada pela falta de enxofre, o principal fator que as diferencia é a posição em que ocorrem na planta. Devido à pouca mobilidade do enxofre no floema, os sintomas de deficiência de enxofre ocorrerão inicialmente nas folhas mais novas (MALAVOLTA; MORAES, 2007). Essa similaridade não é surpreendente, uma vez que tanto o enxofre como o nitrogênio são constituintes de proteínas (EPSTEIN; BLOOM, 2006). Entretanto, segundo estudos de Marschner (1995), a relação entre a concentração de nitrogênio e enxofre é que definirá a posição na planta onde os sintomas de deficiência de enxofre ocorrerão primeiramente. Assim, os sintomas podem ocorrer tanto nas folhas mais jovens (alto suprimento de nitrogênio) como em folhas mais velhas (baixo suprimento de nitrogênio), indicando que a taxa de redistribuição de enxofre na planta depende do teor de nitrogênio na planta.

Além das plantas serem cloróticas, elas podem ser raquíticas e crescerem pouco (EPSTEIN, 1975), apresentarem folhas pequenas, enrolamento das margens das plantas; necrose e desfolhamento e internódios curtos (MALAVOLTA; MORAES, 2007).

Os sintomas de deficiência de enxofre descritos na literatura são menos específicos e mais difíceis de serem identificados em relação aos sintomas de deficiência de outros nutrientes. A diagnose visual de enxofre requer muita experiência do avaliador e sempre dever estar associada com análises de tecido e de solo. A simples comparação dos sintomas das plantas com fotos de deficiência pode trazer interpretações totalmente equivocadas (SCHNUG et al., 1998).

De acordo com Monteiro et al. (2004), os sintomas de deficiência de enxofre em diversas espécies de capins desenvolvidos em solos de diversas regiões do Brasil tem sido bem documentados. No entanto, os sintomas visuais de deficiência de enxofre são mais nítidos quando se relaciona este nutriente ao suprimento de outro macronutriente, como o nitrogênio por exemplo.

2.4. Avaliação nutricional da cultura do milho

A avaliação do estado nutricional de espécies vegetais tem sido amplamente utilizada e discutida, no intuito de possibilitar intervenções mais precisas em sistemas de produção vegetal, por meio de práticas de manejo e adubação (URANO et al., 2006). Para Argenta et al. (2002), o monitoramento do nível adequado de nutriente na planta de milho tem como objetivo diagnosticar a necessidade ou não de sua aplicação, visto que o emprego de altas doses de nutriente pode contaminar as águas superficiais e subterrâneas.

A determinação dos teores foliares de nutrientes apresenta-se como possibilidade de detecção de deficiência (REIS et al., 2006). Um dos principais fundamentos da diagnose foliar parte da premissa de que é nas folhas que ocorre a maioria dos processos fisiológicos e metabólicos, devendo seu conteúdo mineral estar sempre relacionado com o desenvolvimento e aumento da produção (MALAVOLTA et al., 1997). No entanto, na prática é complexo efetuar uma série de amostragens e análises para determinação das necessidades do elemento com resposta em curto prazo (REIS et al., 2006).

Além disso, para tal, determinam-se, geralmente, as concentrações do nutriente na matéria seca de folhas, em condições de laboratório, empregando-se métodos analíticos demorados e de alto custo (GUIMARÃES et al., 1999). Outro fator fundamental é o estágio de desenvolvimento da cultura, pois se a identificação da deficiência ocorrer em estágio muito avançado, a informação pode não ser útil para a correção da deficiência naquele ciclo de produção (WU et al., 2007). Deste modo, os testes que determinam o teor de nutriente no tecido vegetal possuem a desvantagem de não possibilitar a correção da deficiência deste nutriente no mesmo ciclo da cultura, sendo apenas úteis para identificar se houve falta ou excesso desse nutriente em um determinado estágio de desenvolvimento (ARGENTA et al., 2002).

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 (BAESSO et al., 2007). 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 et al., 1997).

A diagnose visual fundamenta-se no conhecimento dos sintomas exibidos pelas plantas quando um determinado nutriente se encontra em quantidade insuficiente ou em excesso. Neste caso, compara-se o aspecto da folha (ou outros órgãos) da planta, com um padrão pré-definido. A amostra pode ser uma planta ou um conjunto de plantas; já o padrão significa uma planta ou um conjunto de plantas “normais” do ponto de vista da sua nutrição cultivadas em condições controladas, com os teores de nutrientes adequados para o seu desenvolvimento. Assim, a diagnose visual é um método de avaliação em que se analisam, em períodos definidos da vida da planta, determinados órgãos – suas folhas, pois são elas que melhor refletem como regra geral, o estado nutricional da cultura, isto é, respondem mais à variação no suprimento dos elementos, seja pelo solo ou pelo adubo (BÜLL, 1993).

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).

A identificação dos sintomas visuais de deficiências e excessos se baseia no princípio de que um dado elemento exerce a mesma função em todas as plantas, cultivadas ou não (MALAVOLTA, 2006). De acordo com Ramos et al. (2009), quando um nutriente está em deficiência, a planta expressa esse desequilíbrio por sintomas visuais que se manifestam, principalmente, por meio de alterações foliares, como na coloração, no tamanho e outras.

Além disto, os sintomas aparecem preferencialmente nas folhas velhas ou novas, dependendo de o nutriente em questão ser realmente translocado na planta (mobilidade). No caso de elementos móveis que sofrem redistribuição, a sintomatologia deve ter severidade decrescente das folhas mais velhas (ou órgãos mais velhos) para os mais novos. No caso de elementos pouco móveis ou imóveis, os sintomas são mais acentuados nas folhas novas (MALAVOLTA, 2006).

2.5. Método computacional do sistema de visão artificial (SVA)

Como as análises químicas ou diagnose visual estão sujeitas a interpretação do avaliador, e conseqüentemente a erros de interpretação, uma vez que os sintomas podem vir a confundir, devido principalmente à similaridade entre alguns sintomas, surgiu a proposta do projeto TreeVis, iniciado no Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (ICMC - USP), que tem como objetivo o estudo e desenvolvimento de métodos de sistemas de visão.

O trabalho foi desenvolvido em colaboração com o Grupo de Computação Interdisciplinar do IFSC- USP, para desenvolver métodos matemáticos e um arcabouço computacional de visão artificial para detecção de deficiências nutricionais nas plantas de milho, por meio da análise da superfície das folhas.

O projeto TreeVis propõe o desenvolvimento de herbários digitais inteligentes, sistemas biotecnológicos para gerenciamento de nutrientes e laboratórios de análise morfofisiológica, que poderão ser utilizados como ferramentas de pesquisa em botânica, fisiologia e evolução.

A análise de imagens digitais consiste no reconhecimento da cena para a geração de características dimensionais, como áreas ou comprimentos de objetos, ou atributos, como padrões de cores e texturas, e a sua mensuração através de métodos de contagem ou frequência dos elementos formadores da imagem denominados "pixels" (TEIXEIRA et al., 2006). Um sistema de visão computacional ou artificial pode ser definido como um conjunto de métodos e técnicas, por meio de sistemas de computador, que são capazes de interpretar imagens (PUNAM; UDUPA, 2001). E são tipicamente constituídos pelas etapas: aquisição, segmentação de imagens, extração de características e classificação/identificação (BRUNO, 2000; GONZALEZ; WOODS, 1993). Cada deficiência nas folhas produz efeitos característicos, tais como: perda de pigmentação, necrosidade, menor crescimento, alteração a textura da superfície, etc. O sistema desenvolvido poderá identificar estas características e associá-las a uma, ou mais, carências de nutrientes na planta.

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. O Sistemas de Visão Artificial também foi proposto para discriminar os defeitos da madeira de eucalipto em imagens digitais (KHOURY JUNIOR et al., 2005).

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. Teixeira et al. (2006) utilizaram a técnica de análise de imagens, para a determinação do vigor de sementes associada ao teste de crescimento de plântulas, possibilitando a análise dimensional de imagens com rapidez e precisão. Por se tratar de método não destrutivo, as sementes em análise podem ser submetidas a testes fisiológicos e, desta forma, permitir o estabelecimento de relações entre os danos mecânicos e os prejuízos causados à qualidade (CÍCERO; BANZATTO JUNIOR, 2003).

O uso de medidas biométricas realizadas nas folhas, em geral relacionadas à forma, área, textura e nervuras, dentre outras, fornecem informações quantitativas, objetivas e precisas. Desse modo, o uso de métodos de visão computacional e modelos matemáticos permite o desenvolvimento de técnicas de aferição e extração de informações, contribuindo para uma análise mais criteriosa da morfologia, anatomia e até mesmo da fisiologia do vegetal.

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). Nesse sentido, acredita-se que o sistema de visão artificial auxilie a avaliação do estado nutricional de plantas de milho em diferentes níveis de concentração de nutrientes, podendo contribuir para aumentar a eficiência da adubação na cultura do milho, fornecendo informações fundamentadas utilizando uma ferramenta nunca antes explorada no campo da nutrição de plantas.

2.6. Objetivos

O objetivo deste projeto foi avaliar o módulo de processamento de imagens digitais pelo Sistema TreeVis (SVA) para identificação foliar de níveis induzidos dos nutrientes Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S) em plantas de milho (*Zea mays* L.) em casa de vegetação, bem como correlacionar com a análise química foliar para níveis de deficiência testados, visando validar o diagnóstico de deficiência nutricional pela visão artificial.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Local do experimento

O trabalho experimental consistiu em três experimentos independentes, o primeiro sendo para o enxofre, o segundo sendo para o magnésio e o terceiro sendo para o cálcio, todos conduzidos em casa de vegetação localizada na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA) – USP, em Pirassununga/SP, no Setor de Ciências Agrárias.

3.2. Cultura estudada e caracterização do híbrido

A cultura estudada foi o milho (*Zea mays* L.) cultivado em casa de vegetação sob cultivo hidropônico, conduzido em vasos com solução nutritiva. O híbrido utilizado foi o DKB 499, de ciclo precoce, utilizado para grãos e adaptado para as regiões do Oeste do Paraná, Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste do país, sendo recomendado população de 60.000 plantas.ha⁻¹.

3.3. Instalação e condução do experimento

A semeadura do milho foi feita em bandejas plásticas com areia lavada, onde as plantas foram mantidas durante duas semanas após a emergência, irrigadas com água deionizada. A unidade experimental foi constituída por 2 plantas homogêneas em cada vaso. As plantas foram fixadas na tampa do vaso por uma espuma, na altura do colo da planta, permitindo às raízes ficarem imersas na solução nutritiva de dentro do vaso. A solução nutritiva utilizada no experimento foi baseada na solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) a 50%, por cinco dias em todos os tratamentos. Após esse período, completou-se a solução dos vasos com os 50% de solução nutritiva restantes.

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

Figura 1. Detalhe da planta sendo retirada da bandeja de areia no momento do transplantio (a); fixação da planta na espuma (b, c) e fixação da espuma na tampa do vaso (d, e) e planta logo após o transplantio (f).

Cada vaso de polietileno comportava 3,6 litros de solução nutritiva e foram pintados externamente na cor preta. Cada vaso recebia ar comprimido filtrado e borbulhado durante 10 segundos a cada 1 minuto.

Figura 2. Sistema de aeração para os vasos dos experimentos.

As plantas de milho foram cultivadas até o estágio de desenvolvimento com oito folhas completamente desenvolvidas (V8) e, quando houve necessidade, foram tutoradas com auxílio de arames para não caírem.

3.4. Delineamento experimental

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com decomposição dos graus de liberdade dos tratamentos em esquema fatorial 4X3 (quatro níveis de nutriente e três épocas de coleta de dados - estádios de desenvolvimento da cultura do milho) com quatro repetições, o que resultou em 48 vasos em cada experimento. Como a realização de análise química de planta requer a destruição do material vegetal (amostras destrutivas), a cada época de coleta estudada, eram retirados 16 vasos (4 doses de nutriente e 4 repetições) referentes a respectiva época de coleta.

3.5. Experimentos realizados

3.5.1. Cálcio

Foram utilizadas quatro doses de cálcio (Ca) correspondentes a 0 (dose zero – T1); 66 (dose 1/3 – T2); 133 (dose 2/3 – T3) e 200 mg. L⁻¹ (dose completa – T4). As soluções nutritivas foram preparadas a partir da solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950), com as modificações para as doses desejadas de cálcio. As soluções foram preparadas como demonstrado na Tabela 1.

Neste experimento, cultivou-se o milho nos vasos no período de 29 de junho de 2010 a 25 de agosto de 2010.

Aos 29 dias após a emergência das plantas (Figura 3a), quando estavam no estágio V4 de desenvolvimento do milho (com quatro folhas totalmente desenvolvidas), realizou-se a primeira coleta de resultados; é neste estágio de desenvolvimento da cultura que, segundo Fancelli (1986), ocorre o início da definição do potencial produtivo. Foram separados os 16 vasos correspondentes à primeira coleta, sendo avaliados os parâmetros de planta (diâmetro do colmo, altura de planta, número de folhas desenvolvidas e número total de folhas), separação do material em: a) parte aérea; b) raízes; c) folha diagnóstica: folha 4 e folha nova para coleta de imagens e para posterior determinação de peso seco e de macro e micro nutrientes.

Aos 20 dias após a primeira coleta (Figura 3b), quando as plantas estavam no estágio V6 de desenvolvimento do milho (com seis folhas totalmente desenvolvidas), realizou-se a segunda coleta de resultados, é neste estágio de desenvolvimento da cultura que, segundo Fancelli (1986), ocorre o início da definição do número de fileiras da espiga. Foram separados os 16 vasos correspondentes à segunda coleta, sendo avaliados os parâmetros de planta e separando-se o material vegetal das amostras pelo mesmo critério adotado na primeira coleta, sendo que a folha diagnóstica nesta coleta foi a folha 6.

Aos 10 dias após a segunda coleta (Figura 3c), quando as plantas estavam no estágio V8 de desenvolvimento do milho (com oito folhas totalmente desenvolvidas), realizou-se a terceira coleta de resultados. Segundo Fancelli (1986), é neste estágio de desenvolvimento da cultura que ocorre o início da definição do número e tamanho da espiga. Foram separados os 16 vasos correspondentes à terceira coleta, sendo avaliados os parâmetros de planta e

separando-se o material vegetal das amostras pelo mesmo critério adotado na primeira coleta, sendo que a folha diagnóstica nesta coleta foi a folha 8.

A parte aérea, a folha diagnóstica e a folha nova, após a coleta das imagens, foram lavadas em água deionizada. As raízes, por sua vez, foram lavadas em água corrente e, posteriormente, foram lavadas na seguinte ordem: água com detergente neutro, água deionizada, ácido clorídrico (HCl) diluído em água deionizada e finalmente água deionizada. Todo o material foi colocado para secar em estufa de circulação forçada de ar à temperatura de 65°C. As amostras foram moídas em moinho de facas do tipo Wiley (aproximadamente 1 mm de abertura de malha) e acondicionadas em sacos plásticos.

Figura 3. Plantas de milho no estágio de desenvolvimento V4 (a), V6 (b) e V8 (c), submetidas a níveis de cálcio na solução nutritiva, da esquerda para a direita: dose zero, 1/3, 2/3 e dose completa de cálcio.

3.5.2. Magnésio

Foram utilizadas quatro doses de magnésio (Mg) correspondentes a 0 (dose zero – T1); 16 (dose 1/3 – T2); 32 (dose 2/3 – T3) e 48 mg. L⁻¹ (dose completa – T4). As soluções nutritivas foram preparadas a partir da solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950), com as modificações para as doses desejadas de magnésio. As soluções foram preparadas como demonstrado na Tabela 1. Neste experimento, cultivou-se o milho nos vasos no período de 23 de junho de 2010 a 24 de agosto de 2010.

Aos 28 dias após a emergência das plantas (Figura 4a), quando estavam no estágio V4 de desenvolvimento do milho (com quatro folhas totalmente desenvolvidas), realizou-se a primeira coleta de resultados, a segunda coleta ocorreu 20 dias após a primeira coleta quando as plantas estavam no estágio V6 (Figura 4b) e a terceira ocorreu 14 dias após a segunda coleta quando as plantas estavam no estágio V8 (Figura 4c). Os critérios e procedimentos adotados nas coletas, bem como os parâmetros de crescimento de planta analisados foram os mesmos utilizados no experimento com doses de cálcio, salvo uma única alteração: neste experimento foi amostrada a folha velha ao invés da folha nova.

Figura 4. Plantas de milho no estágio de desenvolvimento V4 (a), V6 (b) e V8 (c), submetidas a níveis de magnésio na solução nutritiva.

3.5.3. Enxofre

Foram utilizadas quatro doses de enxofre (S) correspondentes a 0 (dose zero – T1); 23,3 (dose 1/3 – T2); 46,7 (dose 2/3 – T3) e 70 mg. L⁻¹(dose completa – T4). As soluções nutritivas foram preparadas a partir da solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950), com as modificações para as doses desejadas de enxofre. As soluções foram preparadas como demonstrado na Tabela 1. No experimento com doses de enxofre, cultivou-se o milho nos vasos no período de 28 de maio de 2010 a 27 de julho de 2010.

Aos 26 dias após a emergência das plantas (Figura 5a), quando estavam no estágio V4 de desenvolvimento do milho (com quatro folhas totalmente desenvolvidas), realizou-se a primeira coleta de resultados, a segunda coleta ocorreu 19 dias após a primeira coleta, quando as plantas estavam no estágio V6 (Figura 5b), e a terceira coleta ocorreu 14 dias após a segunda coleta, quando as plantas estavam no estágio V8 (Figura 5c). Os critérios e procedimentos adotados nas coletas, bem como os parâmetros de crescimento de planta analisados foram os mesmos utilizados no experimento com doses de cálcio.

Figura 5. Plantas de milho no estágio de desenvolvimento V4 (a), V6 (b) e V8 (c), submetidas a níveis de enxofre na solução nutritiva.

3.6. Coleta de imagens

A coleta de imagem das folhas para o sistema de visão artificial (SVA) foi realizada utilizando um scanner de mesa convencional com até 9.600 DPI (dot per inch – pontos por polegada) de alta resolução acoplado a um computador, onde ficaram armazenadas as imagens para posterior processamento.

Figura 6. Disposição das folhas no scanner no momento da coleta das imagens para o sistema de visão artificial.

A coleta das imagens das folhas das plantas para a análise através do sistema de visão artificial ocorreu no estágio V4 de desenvolvimento do milho. As folhas digitalizadas foram: a *folha indicativa do estágio de desenvolvimento do milho* (FD): a folha 4 (quatro) e a *folha mais velha* (FV) para o Mg (primeira folha a manifestar os sintomas de deficiência de tal elemento) ou a *folha mais nova* (FN) para o S e Ca (primeira folha a manifestar os sintomas de deficiência de tais elementos) nos três estágios estudados.

3.7. Composição das soluções nutritivas

Para determinação dos níveis de Ca, Mg e S foi feito previamente um estudo com base na composição da solução nutritiva de Hoagland & Arnon (1950). A solução nutritiva dos vasos foi preparada com água destilada e deionizada, pipetando-se as soluções estoques nas quantidades descritas na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1. Concentração de nutrientes na solução nutritiva de Hoagland & Arnon (1950) (modificada).

Sal ou Fertilizante	Concentração da solução estoque	Tratamento	- Ca	- Mg	- S	- Zn
		Completo	Volume da solução estoque por L da solução			
	(g/L H ₂ O)		----- ml/L -----			
1. KH ₂ PO ₄	136,09	1	1	1	1	1
2. KNO ₃	101,11	5	5	3	3	5
3. Ca (NO ₃) ₂ 5H ₂ O	236,16	5	-	4	4	5
4. MgSO ₄ . 7H ₂ O	247,47	2	2	-	-	2
5. KCl	74,56	-	-	2	2	-
6. CaCl ₂ 2H ₂ O	147,02	-	-	1	1	-
7. NH ₄ H ₂ PO ₄	115,31	-	-	-	-	-
8. NH ₄ NO ₃	80,04	-	5	-	-	-
9. (NH ₄) ₂ SO ₄	132,14	-	-	2	-	-
10. MgNO ₃ .6H ₂ O	256,43	-	-	-	2	-
11. Solução de micros (*)		1	1	1	1	sem Zn
12. Solução Fe EDTA (**)		1	1	1	1	1

O sinal “-” indica a omissão do respectivo nutriente na composição da solução nutritiva. (*) – Em 1L: 2,86 g H₃BO₃; 1,81 g MnCl₂.4H₂O; 0,10 g ZnCl₂; 0,04 g CuCl₂; 0,02 H₂MoO₄H₂O. (**) – 24,9 g FeSO₄.7H₂O ou 24,25 g de FeCl₂.6H₂O; 33,2 g EDTA-Na; 89 mL NaOH 1N completar em 800 mL H₂O.

3.8. Avaliações no material vegetal

3.8.1. Produção de massa seca e parâmetros de planta

Nos estádios de desenvolvimento V4, V6 e V8, além da coleta de imagens para análise através da visão artificial, foram determinados também os parâmetros de plantas: a) diâmetro do colmo; b) altura de planta; c) número de folhas desenvolvidas e d) número total de folhas. Após essas avaliações as duas plantas de cada vaso foram coletadas e agrupadas compondo uma única amostra sendo separadas em parte aérea, folha diagnóstica, folha nova ou folha velha e raízes.

Esse material vegetal foi lavado com água deionizada, posto para secar em estufa de circulação forçada de ar a 65°C até massa constante. Para a obtenção dos resultados de produção de massa seca da parte aérea total, somaram-se os pesos dos seus componentes (parte aérea, folha diagnóstica e folha nova ou folha velha), enquanto os pesos das raízes, folha diagnóstica, folha nova e folha velha foram obtidos diretamente pela pesagem do material.

3.8.2. Análises químicas

Posteriormente, esse material seco foi moído para a determinação dos teores de macro e micronutrientes na parte aérea, folha diagnóstica, folha nova ou folha velha e raízes.

As determinações químicas dos nutrientes nos tecidos vegetais foram analisadas no Laboratório de Ciências Agrárias na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, da Universidade de São Paulo, Campus de Pirassununga/SP, segundo métodos descritos por Bataglia et al. (1983).

Esses resultados foram utilizados visando o estabelecimento da correlação entre os teores foliares determinados analiticamente e o resultado do método ajustado pela equipe do ICMC - USP, de São Carlos/SP, para detecção de sintomas através do Sistema de Visão Artificial.

As amostras foram digeridas por via úmida com ácido sulfúrico para a determinação de nitrogênio e com ácido nítrico e perclórico para determinação de fósforo, potássio, enxofre, magnésio, cálcio, ferro, cobre, manganês e zinco.

3.8.3. Acúmulo de nutriente

O acúmulo de nutriente na planta de milho foi obtido multiplicando-se as concentrações do nutriente em cada componente (parte aérea, folha diagnóstica, folha nova, folha velha e raízes) pela produção de massa seca de cada componente. Para a parte aérea total obteve-se esse acúmulo pela soma dos acúmulos do nutriente nos três componentes (parte aérea+folha diagnóstica+folha nova ou folha velha).

3.9. Estudo do sistema de visão artificial

O estudo para ajustar o melhor método do Sistema de Visão Artificial para detecção de sintomas de deficiência dos nutrientes estudados no milho foi realizado no Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (ICMC - USP), em São Carlos/SP. Com a colaboração de um grupo do ICMC - USP, em São Carlos/SP, constituído pelo aluno Alvaro Gómez Zúñiga, sob orientação do Prof. Dr. Odemir Martinez Bruno – ICMC – USP, esta etapa visou o desenvolvimento de métodos e técnicas necessários para a construção de um sistema de visão artificial, visando à detecção de deficiências nutricionais na cultura do milho, através da análise de imagens da superfície da folha.

O ponto de partida foi a obtenção das imagens das folhas de milho, obtidas em casa de vegetação (FZEA/USP – Pirassununga) com os sintomas induzidos para Ca, Mg e S em diferentes níveis, por meio de um scanner que são tomadas e pré-processadas e analisadas pela metodologia do sistema TreeVis, que é constituído pelas etapas: aquisição, segmentação de imagens, extração de características e classificação/identificação (BRUNO, 2000; GONZALEZ; WOODS, 1993).

O processo de segmentação foi utilizado no sistema para separar a folha do fundo no processo de aquisição, para segmentar artefatos (ex: regiões danificadas das folhas) ou ainda áreas de interesse (padrões na imagens relacionados a falta de algum nutriente), ou seja, partes das folhas (Figura 7).

Figura 7. Exemplo de processo de segmentação (BACKES et al., 2009).

A etapa da segmentação seleciona regiões da imagem para serem analisadas. A etapa de análises de imagens ou extração de características consiste de métodos capazes de aferir as regiões das imagens para sua caracterização. Uma análise preliminar das imagens demonstrou

que os métodos utilizados poderão estar nos seguintes grupos: análise cromática e análise de textura, uma vez que cor e textura são os principais atributos visuais que apresentaram relações com a nutrição do milho.

A análise por textura considera-se a distribuição e a organização dos pixels de uma determinada região da imagem. Neste contexto, métodos que utilizam medidas como lacunaridade e dimensão fractal podem aferir a complexidade das imagens e, por meio desta, gerar assinaturas digitais para caracterizar a imagem (BACKES; BRUNO, 2006).

A análise cromática é considerada as informações concernentes à cor. Dentre os métodos utilizados nesta categoria de segmentação podemos ressaltar: análise de histogramas cromáticos (SWAIN; BALLARD, 1991), momentos cromáticos e conjuntos de cores em mapeamentos (STRICKER; ORENGO, 1995).

O estudo de análise de imagens de folha foi constituído por três grandes fases, depois de obtidas as imagens das amostras, foi feita a segmentação, que consiste na subdivisão da imagem em regiões distintas, através de propriedades básicas (GONZALEZ; WOODS, 1993), extração de características e classificação. Um sistema de visão computacional pode ser definido como um conjunto de métodos e técnicas através de sistemas de computador que são capazes de interpretar imagens.

Para os experimentos foram consideradas as folhas da coleta 1 (estádio V4) unicamente. De cada parte da folha foram extraídas 12 janelas automaticamente (6 de cada lado da nervura central), retirando as janelas com presença de bordas ou ruídos. Cada janela de 80x80 pixels extraída foi orientada em posição horizontal e armazenada em formato sem compressão. No total 1200 janelas foram consideradas na base de dados final 50 de cada parte da folha misturando as repetições e considerando as folhas novas como uma classe distinta as folhas velhas.

Figura 8. Exemplo de separação das folhas para análise de imagens considerando e partes: base, meio e ponta da folha.

A coleta 1 contém 4 níveis de deficiência nutricional: T1,T2,T3,T4 onde T1 é dose 0 e T4 dose completa. De cada uma das folhas consideram-se 3 partes: Base, Meio e Ponta (Figura 8) separando as classes das folhas novas e folhas velhas. Adicionalmente foram

consideradas misturas de imagens como classes novas. No total foram geradas 36 classes e cada uma das classes contém 50 imagens coloridas. O conteúdo de cada uma das classes é:

1. BDColoridoBases: Mistura das janelas da base das plantas novas e velhas, considerando os 4 níveis de deficiência gera as classes: T1, T2, T3 e T4.
2. BDColoridoBasesNova: Janelas tiradas das bases das folhas novas somente, considerando os 4 níveis de deficiências gera as classes: T1, T2, T3 e T4.
3. BDColoridoBasesVelha: Janelas tiradas das bases das folhas velhas somente, considerando os 4 níveis de deficiências gera as classes: T1, T2, T3 e T4.
4. BDColoridoMeios: Mistura das janelas do meio das plantas novas e velhas, considerando os 4 níveis de deficiência gera as classes: T1, T2, T3 e T4.
5. BDColoridoMeiosNova: Janelas tiradas dos meios das folhas novas somente, considerando os 4 níveis de deficiências gera as classes: T1, T2, T3 e T4.
6. BDColoridoMeiosVelha: Janelas tiradas dos meios das folhas velhas somente, considerando os 4 níveis de deficiências gera as classes: T1, T2, T3 e T4.
7. BDColoridoPontas: Mistura das janelas das pontas das plantas novas e velhas, considerando os 4 níveis de deficiência gera as classes: T1, T2, T3 e T4.
8. BDColoridoPontasNova: Janelas tiradas das pontas das folhas novas somente, considerando os 4 níveis de deficiências gera as classes: T1, T2, T3 e T4.
9. BDColoridoPontasVelha: Janelas tiradas das pontas das folhas velhas somente, considerando os 4 níveis de deficiências gera as classes: T1, T2, T3 e T4.

Adicionalmente estas 36 classes foram duplicadas gerando 36 novas classes em escala de cinza (cada nome de classe muda a palavra “colorido” para “cinza”, por exemplo: BDColoridoPontasVelhaT1 gera BDCinzaPontasVelhaT1, o objetivo é testar a importância da cor e textura na classificação.

Os experimentos foram realizados usando distintas técnicas com o objetivo de encontrar a técnica que forneça a melhor separação entre as classes. Cada experimento possui uma justificativa, e conclusões dos resultados obtidos. Por cada tabela gerada são mostrados as matrizes de confusão dos 2 melhores resultados além dos seguintes resultados:

- **Correctly Classified Instances:** Porcentagem de imagens corretamente classificadas. É o dado mais importante, indica a quantidade de imagens que foram identificadas corretamente pelo classificador
- **Incorrectly Classified Instances:** Porcentagem de imagens incorretamente classificadas.

- **False Positive Rate:** Porcentagem de imagens que são classificadas como “falso positivo”. Por exemplo se o dado é 0.03 indica que o 3% do total das imagens (sem considerar as imagens corretamente classificadas) vão indicar pertencer numa classe que não é correta. O FPR é importante porque indica o margem de erro que vai ter o classificador numa situação real. Numa situação real se uma pessoa faz uma coleta e deseja saber se existe deficiência T1 na coleta uma seria de folhas das quais 100 janelas são tiradas e o 70% é corretamente classificada (70 janelas) sendo 30 deficiência T1, se o dado FPR é 0.03 (3% = 3 janelas) a pessoa pode receber como resultado que 38 janelas apresentarem deficiência T1 ou no pior dos casos se nenhuma folha é classificada como T1 podem existir 3 folhas que sejam incorretamente classificadas como T1.

- **ROC Area:** indicam o grau de confiabilidade da classificação. 0.5 indica que é uma classificação cega (se por exemplo uma pessoa pega um conjunto de imagens e etiqueta esse conjunto como classe X sem nenhuma informação previa).

0.90-1.0 = excellent

0.80-0.90 = good

0.70-0.80 = fair

0.60-0.70 = poor

0.50-0.60 fail

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

3.10. Forma de análise dos resultados

Os resultados foram analisados estatisticamente através da análise de variância e, nos casos em que o teste F foi significativo, foi realizada análise de regressão polinomial simples ou múltipla, para os efeitos principais (dose do elemento) e secundários (época de coleta), uma vez que estas variáveis são quantitativas. Foi realizada correlação entre os teores de nutrientes nas folhas obtidos pela análise foliar e os sintomas que se manifestarem na leitura das imagens através do melhor Sistema de Visão Artificial desenvolvido pela equipe de ICMC.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Cálcio

4.1.1. Sintomas visuais

De acordo com Ramos et al. (2009), quando um nutriente está em deficiência, a planta expressa esse desequilíbrio por sintomas visuais que se manifestam, principalmente, por meio de alterações foliares, como na coloração, no tamanho e outras, uma vez que este é o órgão da planta em plena atividade fisiológica e bioquímica, nas plantas deficientes em cálcio deste experimento, os sintomas de apareceram inicialmente nas folhas jovens e regiões meristemáticas (Figura 9).

Figura 9. Sintomas iniciais de deficiência de cálcio em plantas de milho submetidas à omissão completa de cálcio na solução nutritiva aos 15 dias (a) e aos 35 dias (b) após a aplicação do tratamento.

As demandas de cálcio parecem ser altas nesses tecidos e o cálcio contido em tecidos mais velhos tende a se imobilizar ali e não é deslocado em quantidade novamente para as regiões mais jovens, que crescem ativamente (EPSTEIN; BLOOM, 2006).

Figura 10. Sintomas de deficiência de cálcio em plantas de milho submetidas à omissão completa de cálcio na solução nutritiva aos 29 DAE (a) e 49 DAE (b); em plantas com 1/3 da dose de cálcio na solução nutritiva aos 29 DAE (c) e 49 DAE (d) e em plantas com 2/3 da dose de cálcio na solução nutritiva aos 29 DAE (e) e 49 DAE (f).

Verificou-se necrose apical dos primórdios foliares, a qual evoluiu para morte descendente típica. Foram observados sintomas visuais característicos da deficiência de cálcio, com as plantas mostrando folhas mal formadas, com bordos crestados e com os ápices foliares afinados e retorcidos, conforme pode ser verificado na Figura 10.

Figura 11. Sintomas de deficiência de cálcio nas raízes (a) e na parte aérea (b) de plantas de milho no estágio V4 submetidas a níveis crescentes de cálcio na solução nutritiva (da esquerda para a direita: dose zero, dose 1/3, dose 2/3 e dose completa de cálcio).

O cálcio é essencial para manter a integridade estrutural e funcional das membranas e da parede celular: quando há deficiência as membranas permitem o vazamento do conteúdo citoplasmático; a compartimentação celular é comprometida e fica afetada a ligação do cálcio com a pectina da parede celular (MALAVOLTA, 2006). Esses sintomas de deficiência de cálcio também foram relatados por outros autores em diferentes espécies de plantas (MONTEIRO et al., 1995; UTUMI et al., 1999).

4.1.2. Parâmetros de crescimento da planta

Os parâmetros de crescimento estudados: diâmetro do colmo da planta, altura da planta, número de folhas desenvolvidas, número total de folhas, massa seca da parte aérea e da raiz da planta variaram significativamente ($P < 0,01$) com o incremento das doses de cálcio na solução nutritiva e também com as épocas de amostragens do material, como pode ser observado nas Figuras 12 e 13.

Nas três épocas avaliadas, esses parâmetros de crescimento responderam às doses de cálcio segundo um modelo quadrático. O diâmetro máximo do colmo ocorreu com o cálcio na solução nutritiva em torno de 170, 190 e 160 mg.L^{-1} na época 1, 2 e 3 respectivamente, já a altura máxima da planta ocorreu com o cálcio na solução nutritiva em torno de 180 mg.L^{-1} nas épocas 1 e 2 e 160 mg.L^{-1} na época 3. A época 1 foi a que apresentou os menores valores nos parâmetros de crescimento avaliados, seguida em ordem decrescente da época 2 e época 3 (Figura 12a e 12b). A deficiência de cálcio nas plantas de milho afetaram o crescimento,

também observado por Utumi et al. (1999), e seus sintomas visuais foram os comumente observados na maioria das plantas (MALAVOLTA; VIOLANTE NETTO, 1989).

Figura 12. Diâmetro do colmo (a), altura de planta (b), número de folhas desenvolvidas (c) e número total de folhas (d) em plantas de milho submetidas a níveis crescentes de concentração de cálcio na solução nutritiva e em três épocas de amostragem.

Nas plantas com omissão total de cálcio, verificou-se drástica redução no crescimento da planta, que culminou com a morte do meristema apical (Figura 10a e 10b), aos 35 dias após a aplicação do tratamento. A deficiência de cálcio normalmente retarda o crescimento e causa a morte dos ponteiros (Marschner, 1995). Os resultados estão de acordo com os encontrados por Silva et al. (2009). De acordo com Mengel e Kirkby (1987), a necessidade de cálcio para o crescimento da planta de milho é facilmente demonstrada pela interrupção no fornecimento deste nutriente para as raízes, em que a taxa de crescimento é imediatamente reduzida.

O conhecimento da produção de matéria seca de uma cultura possibilita um melhor entendimento dos fatores relacionados à nutrição mineral das plantas e consequentemente com a adubação, uma vez que a absorção de nutrientes é influenciada pela taxa de crescimento da planta (Marschner, 1995).

Os resultados de produção de massa seca da parte aérea e da raiz variaram significativamente ($P < 0,01$) e também se ajustaram a uma equação quadrática. Houve interação significativa entre a massa seca da parte aérea e da raiz com os níveis de cálcio na solução nutritiva.

A máxima produção de massa seca da parte aérea foi observada na época 3 quando o nível de cálcio na solução nutritiva era em torno de 165 mg.L^{-1} . Para as épocas 1 e 2, a máxima produção de massa seca da parte aérea foi obtida com 180 e 165 mg.L^{-1} de cálcio na solução nutritiva (Figura 13a).

Figura 13. Produção de massa seca da parte aérea (a), massa seca das raízes (b) por planta e relação entre massa seca da parte aérea e massa seca de raízes (c) de plantas de milho submetidas a níveis crescentes de concentração de cálcio na solução nutritiva e em três épocas de amostragem.

Os resultados do presente trabalho corroboram com aqueles de Hernandez e Silveira (1998), que observaram aumentos no crescimento das plantas de milho e maior produção de material seco como consequência do acréscimo de cálcio no solo. Silva et al. (2009), estudando os sintomas visuais de deficiências nutricionais, verificaram que todos os tratamentos com omissão de cálcio apresentaram produção de massa seca inferiores à do tratamento completo. Batista e Batista (1981) concluíram que a produção de massa seca de milho foi beneficiada pelo aumento nos níveis de cálcio no solo.

A omissão do cálcio na solução nutritiva limitou a produção de massa seca da parte aérea e também a de massa seca da raiz nas três épocas estudadas (Figura 13). Caires et al. (2001) afirmam que o cálcio exerce influência no crescimento radicular.

O sistema radicular está em constante interação com a parte aérea, o que o torna um dos responsáveis pelo desenvolvimento da planta (MONTEIRO; CONSOLMAGNO NETO, 2008). O fato de as doses elevadas de cálcio serem responsáveis pelo maior produção de massa seca do sistema radicular foi visualmente constatado ao final do período experimental,

quando se verificou que as raízes desenvolvidas em elevada dose de cálcio exibiam maior produção de massa seca da raiz (Figura 11a). Como pode ser observado na Figura 8b, a produção de massa seca da raiz revelou seu ponto de máxima produção na dose de cálcio de 120, 200 e 150 mg.L⁻¹ na solução, respectivamente para as épocas 1, 2 e 3. Sendo a época 3, a que apresentou a maior produção de massa seca da raiz com produção máxima de 14,5g por planta.

No caso do milho, em seus estádios iniciais de desenvolvimento (até V6), o sistema radicular constitui o dreno principal da planta, sendo seu crescimento decisivamente influenciado pelo suprimento de carboidratos sintetizados e acumulados na parte aérea e pela respiração da raiz neste período (FANCELLI, 2010).

A relação entre a massa seca da parte aérea e a massa seca de raízes foi significativa ($P < 0,01$) e comportou-se de forma quadrática para as 3 épocas estudadas (Figura 13c). Houve aumento na relação entre massa seca da parte aérea e da raiz com o incremento nas doses de cálcio na solução para as épocas 2 e 3. Fancelli (2010) afirma que o desenvolvimento radicular está associado com o desempenho da parte aérea, desta forma, o valor da relação parte aérea:raiz varia em função das condições do meio e do estágio fenológico da planta.

4.1.3. Acúmulo de nutrientes

4.1.3.1. Parte aérea

Os resultados apresentados nas Figuras 14 e 15 demonstram que o acúmulo dos macronutrientes e micronutrientes na parte aérea de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento foi significativamente ($P < 0,01$) influenciado pela concentração de cálcio na solução nutritiva e pelo aumento da idade das plantas, além da interação entre as doses de cálcio e idade das plantas, exceto para o elemento zinco que não apresentou essa interação.

As plantas que não receberam cálcio na solução nutritiva (dose zero) foram as que apresentaram o menor acúmulo de macronutrientes primários e secundários durante o seu ciclo de crescimento (Figura 14).

a) Nitrogênio

O acúmulo de nitrogênio na parte aérea das plantas, com o aumento da idade da planta, ajustou-se a uma equação quadrática para o tratamento com omissão de cálcio na solução nutritiva (dose zero) e uma equação linear para as demais doses de cálcio estudadas (Figura 14a).

O acúmulo de nitrogênio aumentou significativamente ($P < 0,01$) com o suprimento de cálcio na solução. O menor acúmulo de nitrogênio na parte aérea foi nas plantas que não receberam cálcio (dose zero) na solução. As doses de cálcio na solução nutritiva implicaram em respostas lineares para o acúmulo de nitrogênio na parte aérea, com diferentes inclinações das retas em decorrência das doses, ou seja, para a maior dose de cálcio obteve-se a reta com maior inclinação, acumulando maior quantidade de nitrogênio (Figura 14a). Santos et al. (2002) observaram que o acúmulo de cálcio na massa seca da parte aérea da braquiária aumentou, principalmente quando foi adubado com nitrogênio; a aplicação de nitrogênio promoveu maiores acúmulos de cálcio. Malvolta e Moraes. (2007) afirmam que o nitrogênio pode mostrar interação com outros elementos, neste caso, sua presença pode provocar o aumento (sinergismo) no teor de cálcio e reciprocamente ($N \times Ca$), em que o Ca atua como acompanhante de NO_3^- .

Figura 14. Acúmulo dos macronutrientes primários: nitrogênio (a), fósforo (b) e potássio (c) e dos macronutrientes secundários cálcio (d), magnésio (e) e enxofre (f) na parte aérea de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de cálcio na solução nutritiva.

Houve um incremento no acúmulo de nitrogênio com o aumento da idade da planta como pode ser observado na Figura 14a, exceto para a dose zero. De acordo com Malavolta (2006), a curva que descreve o crescimento em relação ao tempo (idade) é uma sigmóide

típica, comumente. Por esse motivo a absorção é em geral maior no segmento linear da curva, quando são maiores a produção de biomassa e a velocidade de acumulação de nutrientes. Esse resultado concorda com os obtidos por Arnon (1975) que afirmou que as exigências de nitrogênio pelas plantas de milho variam consideravelmente com os diferentes estádios de desenvolvimento da planta, sendo mínimas nos estádios iniciais, aumentando com a elevação do crescimento da planta e alcançando o pico durante o período compreendido entre o início do florescimento e o início da formação de grãos.

O nitrogênio foi o nutriente mais acumulado na parte aérea das plantas na dose 2/3 ($1070 \text{ mg.planta}^{-1}$ de N) e dose completa ($1150 \text{ mg.planta}^{-1}$ de N) e o segundo nutriente mais acumulado na parte aérea nas doses zero ($20 \text{ mg.planta}^{-1}$ de N) e 1/3 ($850 \text{ mg.planta}^{-1}$ de N) no final do ciclo de crescimento do estudo das plantas (Figura 14a). Concordando com os resultados obtidos por Andrade et al. (1975a) estudado a exportação e o acúmulo de nutrientes pela cultura do milho.

b) Fósforo

Foi verificado incremento significativo ($P < 0,01$) e quadrático no acúmulo de fósforo na parte aérea das plantas com omissão de cálcio e linear para os níveis de cálcio estudados à medida que aumentou a idade da planta (Figura 14b).

A omissão de cálcio na solução proporcionou um menor acúmulo de fósforo na parte aérea das plantas. As doses de cálcio na solução nutritiva implicaram em respostas lineares para o acúmulo de fósforo na parte aérea, com diferentes inclinações das retas devido às doses, ou seja, para a maior dose de cálcio obteve-se a reta com maior inclinação, acumulando maior quantidade de fósforo (Figura 14b). De acordo com Mengel e Kirkby (1987), para a cultura do milho, o suprimento inadequado de fósforo nos estádios iniciais de desenvolvimento acarreta redução no número de espigas por unidade de área e, consequentemente, leva à redução na produção final de grãos.

O aumento na idade das plantas promoveu um incremento no acúmulo de fósforo na parte aérea, conforme explicado por Malavolta (2006) anteriormente.

Segundo Fornasieri Filho (1992), a planta de milho mostra elevada exigência deste nutriente por ocasião da formação e desenvolvimento dos grãos, quando, além da absorção do solo, há intensa translocação do elemento para os grãos.

O fósforo foi o 4º macronutriente mais acumulado na parte aérea das plantas de milho com dose completa de cálcio na solução nutritiva, sendo encontrado até $133,5 \text{ mg.planta}^{-1}$ de

P é o terceiro macronutriente mais acumulado na parte aérea das plantas com doses zero, 1/3 e 2/3 da dose completa de cálcio, atingindo respectivamente 9,4; 112,0 e 129,1 mg.planta⁻¹ de P no final do ciclo de desenvolvimento estudado (Figura 14b). O fósforo é um nutriente essencial para todos os seres vivos. Na produção vegetal, em solos tropicais, é considerado o nutriente muito importante, apesar das necessidades das plantas serem relativamente pequenas quando comparadas com outros macronutrientes (ROSSI et al., 1997).

c) Potássio

Houve um efeito significativo ($P < 0,01$) e quadrático no acúmulo de potássio na parte aérea com o aumento da idade das plantas (Figura 14c).

O menor acúmulo de potássio na parte aérea foi encontrado nas plantas que não receberam cálcio na solução nutritiva (Figura 14c).

O aumento na idade da planta também promoveu um incremento no acúmulo de potássio na parte aérea, conforme relatado por Malavolta (2006) anteriormente.

O potássio foi o segundo macronutriente mais acumulado na parte aérea das plantas com dose zero (9,4 mg.planta⁻¹ de K) e 1/3 (112 mg.planta⁻¹ de K) e o primeiro macronutriente mais acumulado na parte aérea dose 2/3 (1070 mg.planta⁻¹ de K) e dose completa (1150 mg.planta⁻¹ de K).

d) Cálcio

Na figura 14d, pode-se observar que o acúmulo de cálcio na parte aérea das plantas variou conforme modelo quadrático em função da dose de cálcio na solução nutritiva. Silveira e Monteiro (2010) verificaram efeito positivo das doses de cálcio na concentração desse nutriente nas lâminas de folhas do capim-tanzânia quando houve aumento da concentração de cálcio para as raízes, com ajustes dos resultados ao modelo quadrático de regressão.

Houve incremento gradativo e significativo ($P < 0,01$) no acúmulo de cálcio na parte aérea das plantas com o aumento deste nutriente na solução nutritiva. As plantas que receberam a dose completa de cálcio (200 mg. L⁻¹) na solução apresentaram o maior acúmulo de cálcio na parte aérea, seguidas das plantas que receberam 2/3 da dose completa (133 mg. L⁻¹) e posteriormente as que receberam 1/3 da dose completa (66 mg. L⁻¹). Sendo que o menor acúmulo de cálcio na parte aérea foi nas plantas que não receberam cálcio (dose zero) na solução (Figura 14d). Utumi et al. (1999) também observou redução no teor de cálcio na parte

aérea das plantas com deficiência induzida de cálcio na solução nutritiva. Esses resultados concordam com os obtidos por Silveira e Monteiro (2010) em plantas de capim-tanzânia, em que a dose de cálcio que promoveria a concentração máxima desse mineral nas lâminas de folhas do capim-tanzânia excederia a maior dose empregada no experimento.

O aumento na idade da planta promoveu um acúmulo de cálcio na parte aérea, sobretudo para as plantas que receberam dose completa de cálcio (Figura 14d), conforme relatado por Malavolta (2006) anteriormente.

O cálcio foi o 3º nutriente mais acumulado na parte aérea das plantas com dose completa de cálcio (151,8 mg planta⁻¹ de Ca), o quarto nutriente nas plantas com dose 2/3 (67,8 mg planta⁻¹ de Ca) e o nutriente menos acumulado na parte aérea das plantas com omissão completa de cálcio (0,8 mg planta⁻¹ de Ca) e dose 1/3 da dose completa de cálcio (45,5 mg planta⁻¹ de Ca), no final do ciclo de desenvolvimento das plantas estudado.

e) Magnésio

Na Figura 14e, pode-se verificar que o acúmulo de magnésio na parte aérea em cada dose de cálcio variou significativamente ($P < 0,01$) com a idade das plantas, sendo que com o aumento da idade houve um incremento quadrático.

O magnésio foi o macronutriente menos acumulado na parte aérea das plantas de milho com dose 2/3 e dose completa de cálcio na solução nutritiva, apresentando respectivamente 46,3 mg planta⁻¹ e 56,9 mg planta⁻¹. Entretanto nas plantas com dose zero e 1/3 da dose completa de cálcio foi o quarto nutriente mais acumulado na parte aérea das plantas, acumulando até 5,7 mg planta⁻¹ e 52,0 mg planta⁻¹, respectivamente, no final do ciclo das plantas (Figura 14e).

f) Enxofre

Com o aumento da idade das plantas, o acúmulo de enxofre na parte aérea, em cada dose de cálcio, variou significativamente ($P < 0,01$) e apresentou comportamento quadrático (Figura 14f)

O aumento da idade das plantas promoveu um aumento gradativo no acúmulo de enxofre na parte aérea para as doses de cálcio estudadas, conforme relatado por Malavolta (2006) anteriormente, com exceção para a dose 0 mg.L⁻¹, em que esse acúmulo não ocorreu, além disso foi a dose que promoveu o menor acúmulo de enxofre na parte aérea.

O enxofre foi o 5º nutriente mais acumulado na parte aérea das plantas (ou o 2º macronutriente acumulado em menor quantidade) em todas as doses de cálcio estudadas, apresentando 2,8; 35,6; 57,2 e 68,4 mg planta⁻¹, no final do ciclo das plantas, respectivamente nas plantas com dose zero, 1/3, 2/3 e dose completa de cálcio na solução nutritiva.

Fancelli (2010) afirma que a redução na absorção de nutriente em plantas de milho no estágio V4 provocam perdas irreversíveis de produção.

g) Micronutrientes

Na Figura 15, estão apresentados os micronutrientes cobre, ferro, manganês e zinco acumulados na parte aérea de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de cálcio na solução nutritiva.

Figura 15. Acúmulo dos micronutrientes cobre (a), ferro (b), manganês (c) e zinco (d) na parte aérea de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de cálcio na solução nutritiva.

Pode-se observar que o acúmulo de Cu na parte aérea da planta variou significativamente ($P < 0,01$) e apresentou aumento quadrático com o incremento nos dias de crescimento (Figura 15a).

Outro fato importante que deve ser destacado para esse micronutriente é aumento gradativo no acúmulo de cobre na parte aérea ser inversamente proporcional ao aumento nas doses de cálcio na solução nutritiva, ou seja, o aumento de cálcio na solução inibiu a absorção de Cu. Isso se deve ao fato de o cobre estabelecer interação de antagonismo com o cálcio (Malavolta, 1987). Esse fato não ocorreu apenas para a dose 0 mg.L^{-1} , que mostrou o menor acúmulo desse micronutriente na parte aérea. De acordo com Malavolta et al. (2006) o processo de absorção de cobre é metabolicamente ativo, sendo reduzido por inibidores respiratórios. É inibido competitivamente por Zn^{2+} e reduzido também por Ca^{2+} .

Para os demais micronutrientes, observa-se um aumento significativo ($P < 0,01$) e quadrático no acúmulo de ferro (Figura 15b), manganês (Figura 15c) e zinco (Figura 15d) com o aumento da idade das plantas.

Malavolta (2006) relata que a curva que descreve o crescimento em relação ao tempo (idade) é uma sigmóide típica, comumente. Por esse motivo a absorção é em geral maior no segmento linear da curva, quando são maiores a produção de biomassa e a velocidade de acumulação de nutrientes.

4.1.3.2. Raiz

A interação entre doses de cálcio e idade da planta foi significativa ($P < 0,01$) para o acúmulo dos macronutrientes e micronutrientes na raiz das plantas de milho, exceção apenas para o acúmulo de magnésio na raiz, que embora não tenha apresentado interação significativa, foi observado efeito isolado para cada uma das doses (Figuras 16 e 17).

Foram verificados incrementos significativos ($P < 0,01$) e quadráticos no acúmulo de nitrogênio (Figura 16a), fósforo (Figura 16b), potássio (Figura 16c), cálcio (Figura 16d), magnésio (Figura 16e) e enxofre (Figura 16f) na raiz das plantas de milho com o aumento na idade em todas as doses de cálcio estudadas, conforme relata Malavolta (2006).

Houve resposta do acúmulo de cálcio na raiz ao aumento de cálcio na solução. Como pode ser verificado na Figura 16d, a resposta quadrática apresentou maior intensidade para a dose completa durante todo o seu ciclo de crescimento.

Figura 16. Acúmulo dos macronutrientes primários: nitrogênio (a), fósforo (b) e potássio (c) e dos macronutrientes secundários cálcio (d), magnésio (e) e enxofre (f) na raiz de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de cálcio na solução nutritiva.

As plantas com omissão de cálcio na solução nutritiva mostraram o menor acúmulo desses macronutrientes em todo o seu ciclo de crescimento (Figura 16). A presença de cálcio nas soluções em contato com as raízes é essencial para a sua sobrevivência, pois não há a

translocação do nutriente da parte aérea para as porções novas das raízes em crescimento (CAIRES et al., 2001). Assim, uma planta bem suprida em cálcio apresenta sistema radicular maior que uma planta deficiente em cálcio, uma vez que o movimento de Ca^{+2} no xilema na direção da parte aérea é acropétalo, isto é, unidirecional, muito pouco caminhando na direção contrária, para as raízes (MALAVOLTA, 2006). Os sintomas de deficiência de cálcio aparecem mais cedo e mais severamente nas regiões meristemáticas e folhas jovens e desta forma o crescimento das raízes é severamente afetado e as raízes danificadas, por sua vez, tornam-se predispostas à infecção por bactérias e fungos (EPSTEIN; BLOOM, 2006).

Nota-se também que o aumento das doses de cálcio proporcionaram um incremento gradativo e significativo no acúmulo de magnésio nas raízes (Figura 16e).

Na Figura 17, está apresentado o acúmulo dos micronutrientes cobre, ferro, manganês e zinco na raiz de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de cálcio na solução nutritiva.

Figura 17. Acúmulo dos micronutrientes cobre (a), ferro (b), manganês (c) e zinco (d) na raiz de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de cálcio na solução nutritiva.

Observa-se que o acréscimo significativo ($P < 0,01$) no acúmulo desses micronutrientes com o aumento da idade das plantas, apresentando um comportamento quadrático (Figura 17). As plantas que não receberam cálcio na solução (dose 0 mg.L⁻¹), foram as que mostraram o menor acúmulo de micronutrientes no ciclo estudado da cultura do milho.

Nota-se que o acúmulo de manganês (Figura 17c) e de ferro (Figura 17b) a dose de cálcio que se destacou foi a 2/3.

O cobre foi o micronutriente acumulado em menor quantidade nas raízes das plantas de milho. Ele é um micronutriente que, em suas formas iônicas, é altamente tóxico em elevadas concentrações (EPSTEIN; BLOOM, 2006). O processo de absorção de cobre é metabolicamente ativo, sendo reduzido também por Ca²⁺ (MALAVOLTA; MORAES, 2007).

Na Tabela 2, está apresentados o acúmulo total (acumulado na parte aérea + acumulado na raiz) de macro e micronutrientes durante o período de crescimento do milho para população indicada para esse híbrido, que é de 60.000 plantas.ha⁻¹, submetidas à dose completa de nutrientes.

Tabela 2. Acúmulo de nutrientes na planta inteira durante o período de crescimento do milho para população de 60.000 plantas.ha⁻¹ com a dose completa de nutrientes.

Época	N	P	K	S	Ca	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn
	Kg/ha							g/ha		
V4	43,3	5,0	31,0	2,1	2,4	2,1	0,9	6,4	36,6	32,9
V6	86,9	8,4	71,2	5,0	5,3	3,6	2,3	8,9	77,5	49,7
V8	90,9	10,3	91,8	7,1	11,3	4,8	2,6	7,8	78,1	46,4

Nota-se que o acúmulo total de macro e micronutrientes até o estágio V4 é bem pequeno quando comparado ao estágio V6, chegando a mais que dobrar o acúmulo total de N, K, S, Ca, Fe e Mn de V4 para V6. Esses resultados corroboram com os encontrados por Flannery (1987), que constatou que a absorção de nutrientes até o estágio V4 é praticamente inexistente, correspondendo neste estágio a 3% do N total acumulado durante todo o ciclo do milho, 5% do K total e aproximadamente 2% do P, Ca, Mg e S total acumulado durante todo o ciclo do milho. Segundo Fornasieri Filho (1992) o cálcio mostra-se mais exigido pela planta de milho no período entre a fase da 12ª folha até a fase de embonecamento, quando o milho extrai cerca de 51% de suas exigências totais em cálcio (FLANNERY, 1987).

De acordo com Büll (1993), a absorção de macronutrientes, correspondente ao rendimento de 9100 Kg.ha⁻¹, pela cultura do milho no final de seu ciclo, em Kg.ha⁻¹, corresponde a: N=190; P=39; K=196; Ca=40; Mg=44 e S=21 e a absorção de micronutrientes em g.ha⁻¹ para o mesmo rendimento corresponde a: Fe=2.100; Cu=110; Mn=340 e Zn=400. Já Coelho e França (1995) afirma que para produtividade média de 9170 Kg.ha⁻¹, a extração média de nutrientes pelo milho

para produção de grãos é correspondente a: $N=187 \text{ Kg.ha}^{-1}$; $P=34 \text{ Kg.ha}^{-1}$; $K=143 \text{ Kg.ha}^{-1}$; $Ca=30 \text{ Kg.ha}^{-1}$ e $Mg=28 \text{ Kg.ha}^{-1}$.

Os resultados obtidos por Andrade et al. (1975a) mostram o pico do acúmulo de nitrogênio e magnésio em plantas de milho ao redor dos 80 dias após a emergência, com uma quantidade média acumulada de 180 Kg.ha^{-1} de N e 34 Kg.ha^{-1} de magnésio. Para o cálcio e o enxofre, observou pico de acúmulo entre 80 e 90 dias após a emergência, em quantidades de 34 Kg.ha^{-1} de cálcio e 32 Kg.ha^{-1} de enxofre.

4.1.3.3. *Folha indicativa do estágio de desenvolvimento da planta*

O acúmulo dos macronutrientes na folha indicativa do estágio de desenvolvimento de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento em função de níveis crescentes de concentração de cálcio na solução nutritiva pode ser observado na Figura 18.

Houve interação significativa ($P<0,01$) entre as doses de cálcio e idade da planta para o acúmulo dos macronutrientes na folha indicativa do estágio de desenvolvimento de plantas de milho.

O acúmulo de macronutrientes na folha indicativa do estágio de desenvolvimento de plantas foi afetado pela idade das plantas. O aumento na idade promoveu um comportamento quadrático para as doses de cálcio estudadas (Figura 18). Uma vez que a curva que descreve o crescimento em relação ao tempo (idade) é uma sigmóide típica, comumente, a absorção é em geral maior no segmento linear da curva, quando são maiores a produção de biomassa e a velocidade de acumulação de nutrientes (MALAVOLTA, 2006).

Observa-se também, na Figura 18d, acúmulo crescente de cálcio na folha indicativa do estágio de desenvolvimento de plantas, com aumento das doses de cálcio na solução nutritiva.

A omissão de cálcio na solução nutritiva implicou em menor acúmulo de todos os macronutrientes na folha indicativa do estágio de desenvolvimento de plantas durante o ciclo de crescimento. Enquanto o maior acúmulo de macronutrientes em tal folha foi observado nas plantas que receberam a dose completa de cálcio (Figura 18). Silveira e Monteiro (2010) verificaram efeito positivo das doses de cálcio na concentração desse nutriente nas lâminas de folhas do capim-tanzânia quando houve aumento da concentração de cálcio para as raízes.

Figura 18. Acúmulo dos macronutrientes primários: nitrogênio (a), fósforo (b) e potássio (c) e dos macronutrientes secundários cálcio (d), magnésio (e) e enxofre (f) na folha indicativa do estádio de desenvolvimento de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de cálcio na solução nutritiva.

O teor de macro e micronutrientes na folha indicativa do estádio de desenvolvimento da planta de milho nos estádios V4, V6 e V8 em função das doses de cálcio na solução nutritiva estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Teor de macro e micronutrientes na folha indicativa do estágio de desenvolvimento da planta de milho nos estádios V4, V6 e V8 em função das doses de cálcio na solução nutritiva.

	Ca	N	P	K	S	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg.L ⁻¹	g/Kg				Mg/Kg					
V4	0	33,82	4,63	11,47	2,77	1,01	4,57	13,40	47,30	246,00	87,79
	66	52,37	4,92	32,47	4,54	0,99	3,21	21,60	135,60	318,90	67,55
	133	49,49	4,54	28,47	3,26	14,37	2,07	28,50	182,35	264,05	52,90
	200	50,30	6,65	30,47	3,82	17,31	1,88	27,10	139,10	211,40	41,87
V6	0	22,55	2,63	11,21	1,66	0,99	1,55	11,44	46,23	23,00	10,01
	66	18,91	3,04	27,97	2,61	3,02	1,38	20,05	159,20	31,93	10,12
	133	18,91	1,83	22,97	2,14	4,89	1,03	8,40	147,28	24,05	11,85
	200	23,18	2,85	23,22	2,63	7,52	1,09	9,65	194,50	45,98	15,85
V8	0	18,42	2,13	10,35	1,35	0,89	1,11	11,34	45,11	20,00	10,01
	66	21,17	2,76	25,72	2,37	2,72	1,28	7,23	315,68	21,10	12,88
	133	17,38	2,22	23,22	2,44	3,79	1,06	14,60	286,75	12,18	10,61
	200	18,40	3,51	27,47	3,08	7,34	1,33	10,15	373,75	23,88	11,99

De acordo com Malavolta (2006), os níveis adequados de macronutrientes para a cultura do milho, deve ser de: N=28-35 g/Kg; P=2,5-4,0 g/Kg; K=17-30 g/Kg; Ca=21-50 g/Kg; Mg=2,1-4,0 g/Kg e S=1,0-2,4 g/Kg e os níveis adequados de micronutrientes para a cultura do milho, deve ser de: Cu=6-20 mg/Kg; Fe=21-250 mg/Kg; Mn=20-150 mg/Kg e Zn=20-40 mg/Kg. Embora as plantas deste experimento não serem conduzidas até o final do seu ciclo de crescimento e, conseqüentemente, o teor exposto neste trabalho não ser no estágio de desenvolvimento adequado e nem o da folha indicada para amostragem de folhas, que, para o milho, a amostragem de folhas deve ser realizada no estágio de aparecimento do cabelo e a folha indicada é a abaixo e oposta à espiga (MALAVOLTA, 2006), os níveis podem ser utilizados para um embasamento para os resultados obtidos pelo sistema de visão artificial.

4.1.3.4. Folha nova

A baixa redistribuição de cálcio e imobilidade no floema é devida, pelo menos em parte, ao fato de que predominam em muitas espécies de plantas formas do elemento insolúveis em água como o pectato da lamela média da parede celular e por esse motivo a planta necessita de um suprimento constante de cálcio (MALAVOLTA, 2006).

Na Figura 19, pode ser observado o acúmulo dos macronutrientes na folha nova de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de cálcio na solução nutritiva.

As doses de cálcio e idade da planta mostraram interação significativa ($P < 0,01$) para o acúmulo dos macronutrientes na folha nova de milho.

Figura 19. Acúmulo dos macronutrientes primários: nitrogênio (a), fósforo (b) e potássio (c) e dos macronutrientes secundários cálcio (d), magnésio (e) e enxofre (f) na folha nova de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de cálcio na solução nutritiva.

O acúmulo de macronutrientes na folha nova variou em função da idade das plantas e, para todos os macronutrientes, foi menor do que o acúmulo de macronutrientes na folha

indicativa do estágio de desenvolvimento das plantas. O aumento na idade promoveu uma resposta quadrática para as doses de cálcio estudadas (Figura 19).

Com comportamento semelhante à da folha indicativa do estágio de desenvolvimento de plantas, o maior acúmulo de macronutrientes na folha nova foi observado nas plantas que receberam a dose completa de cálcio e o menor acúmulo de todos os macronutrientes na folha nova durante o ciclo de crescimento ocorreu nas plantas que não receberam cálcio na solução nutritiva.

O aumento das doses de cálcio na solução promoveu um aumento crescente no acúmulo de cálcio na folha nova de milho (Figura 19d). Esses resultados corroboram os encontrados por Silveira e Monteiro et al. (2010) que, estudando os macronutrientes em folhas diagnósticas do capim-tanzânia adubado com nitrogênio e cálcio, verificaram efeito isolado das doses de cálcio na concentração desse nutriente nas lâminas de folhas recém-expandidas, com ajustes dos resultados ao modelo quadrático de regressão. A dose de cálcio que promoveu a concentração máxima desse nutriente nas lâminas de folhas recém-expandidas excedeu a maior dose empregada neste experimento.

Na planta, o cálcio move-se com a água, sendo sua translocação e seu teor nos tecidos sujeitos à taxa de transpiração. Uma vez depositado, não apresenta redistribuição para outras partes da planta, sendo acumulado principalmente em tecidos com transpiração mais intensa (GRANGEIRO et al., 2006).

Na Tabela 4, pode-se verificar o teor de macro e micronutrientes na folha nova da planta de milho nos estádios V4, V6 e V8 em função das doses de cálcio na solução nutritiva.

Tabela 4. Teor de macro e micronutrientes na folha nova da planta de milho nos estádios V4, V6 e V8 em função das doses de cálcio na solução nutritiva.

	Ca	N	P	K	S	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg.L ⁻¹	g/Kg						mg/Kg			
V4	0	36,52	8,07	32,47	3,87	0,61	1,25	18,20	135,80	22,80	51,66
	66	39,36	6,49	42,97	2,00	0,85	1,25	11,15	83,30	21,75	41,88
	133	31,97	5,51	27,97	1,93	0,94	1,13	11,10	49,35	17,85	35,08
	200	43,55	6,20	44,97	1,37	1,62	1,29	11,85	52,90	16,70	38,62
V6	0	19,87	3,07	22,17	1,85	0,51	1,10	8,20	95,70	8,89	21,54
	66	22,60	3,21	29,47	1,81	0,94	1,12	8,30	86,45	9,28	23,06
	133	22,96	2,66	21,47	1,98	1,19	0,74	9,33	70,83	5,20	24,03
	200	24,63	2,76	26,22	1,40	1,21	0,81	9,75	96,20	3,60	21,31
V8	0	21,11	2,16	12,47	0,95	0,42	0,91	8,20	85,80	7,80	11,66
	66	25,96	2,61	22,22	1,94	0,98	1,11	9,18	85,28	13,18	17,95
	133	23,47	2,63	26,72	1,59	1,34	0,84	9,08	99,98	7,40	18,46
	200	23,29	3,09	27,22	1,85	2,44	0,96	9,13	133,95	11,93	13,99

Os níveis adequados de macronutrientes para a cultura do milho são descritos por Malavolta (2006) no item anterior. Embora as plantas deste experimento não serem conduzidas até o final do seu ciclo de crescimento e, conseqüentemente, o teor exposto neste trabalho não ser no estágio de desenvolvimento adequado e nem o da folha indicada para amostragem de folhas, que, para o milho, é a abaixo e oposta à espiga no estágio de aparecimento do cabelo e a folha indicada (MALAVOLTA, 2006), os níveis podem ser utilizados para um embasamento para os resultados obtidos pelo sistema de visão artificial.

4.1.4. Relação entre nutrientes

Foi observada correlação positiva entre cálcio e magnésio (Ca:Mg) na parte aérea e nas raízes durante todo o ciclo de desenvolvimento da planta, ajustando-se a um modelo quadrático com o aumento da idade das plantas nas doses estudadas (Figura 20). Fancelli (2010) afirma que o desenvolvimento radicular está associado com o desempenho da parte aérea, desta forma, o valor da relação parte aérea:raiz varia em função das condições do meio e do estágio fenológico da planta.

No presente trabalho, o aumento da dosagem de cálcio na solução nutritiva alterou a relação Ca:Mg na planta, concordando com os resultados obtidos por Oliveira et al. (2009).

Figura 20. Relação entre Ca e Mg na parte aérea (a) e Ca e Mg na raiz (b) de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de cálcio na solução nutritiva.

As plantas que receberam a dose completa de cálcio apresentaram os maiores valores de relação Ca:Mg na parte aérea, seguida da dose 2/3, posteriormente a dose 1/3 e a dose 0 mg.L⁻¹ levou à menor relação Ca:Mg na parte aérea (Figura 15). Nogueira et al. (1997) constataram que, quanto maior a relação Ca:Mg no solo, mais baixa a concentração de

magnésio na planta, o que evidencia a interferência do cálcio na absorção de magnésio. Hernandez e Silveira (1998) constataram aumento no teor de cálcio na parte aérea de plantas de milho, à medida que se elevou o valor da relação Ca:Mg no solo.

Carmello (1989), avaliando diferentes relações Ca:Mg (1:4, 2:3, 3:2, 4:1) na produção de material seco de milho, observou uma ligeira tendência de redução nos rendimentos da parte aérea, com incrementos na relação Ca:Mg.

A relação Ca:Mg máxima na dose completa deste experimento foi 2,6:1 na parte aérea e 1,4:1 nas raízes, sendo desejável manter entre ambos uma relação de equilíbrio entre 3:1 a 5:1 (BAHIA FILHO et al., 1983).

Na Figura 21, pode ser observado a correlação positiva (Ca+Mg)/K na parte aérea e nas raízes durante todo o ciclo de desenvolvimento da planta, ajustando-se a um modelo quadrático com o aumento da idade das plantas nas doses estudadas.

Para Fornasieri Filho (1992) o cálcio exerce também efeitos sobre o K. Um elemento pode influenciar a absorção de outro. Um caso de inibição competitiva é a relação K/Mg e K/Ca, em que os elementos possuem o mesmo tipo de carga, valência igual ou próxima e devem ter semelhanças quanto ao raio iônico e ao grau de hidratação (MALAVOLTA, 2006).

Figura 21. Relação entre Ca + Mg e K na parte aérea (a) e Ca + Mg e K na raiz (b) de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de cálcio na solução nutritiva.

Nota-se que as plantas com omissão total de cálcio na solução apresentaram a maior relação (Ca+Mg):K tanto na parte aérea e como nas raízes, apresentando relação de 0,3:1 e 0,4:1 respectivamente. O incremento das doses de potássio causam decréscimo nos teores de cálcio e magnésio que, em doses extremas, podem provocar queda da produção. A absorção preferencial de potássio é pelo fato dele ser íon monovalente com menor grau de hidratação

comparado aos divalentes (LOUÉ, 1963). De acordo com Fornasieri Filho (1992) a relação (Ca+Mg):K deve ser de 0,5:1 para a parte aérea das plantas de milho.

De acordo com Andreoti et al. (2001), a competição entre cálcio, magnésio e potássio pelo mesmo sítio de troca, no processo de absorção, pode resultar no menor acúmulo de um desses elementos tendo como consequência menor produtividade de grãos decorrente do menor desenvolvimento da planta.

4.1.5. Sistema de Visão Artificial

O experimento 1 foi rodado com todos os tratamentos (dose zero, 1/3, 2/3 e dose completa de cálcio na solução nutritiva) e com as plantas de milho no estágio V4 de desenvolvimento da cultura, considerando as imagens em escala de cinza (sem informação de cor). O objetivo é conhecer o nível de importância da informação de cor na classificação para as técnicas usadas de Gabor Wavelets e Dimensão Fractal Volumétrica.

Na Tabela 5, pode-se observar o Experimento 1 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica com imagens em escala de cinza. Em que, nas plantas de milho no estágio V4, os melhores resultados foram encontrados no terço médio e na ponta das folhas novas, apresentando 39,50% e 41,50% de acerto, respectivamente.

Tabela 5. Experimento 1 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica com imagens em escala de cinza em folhas de plantas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de cálcio.

Fractal Cinza	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC Area
Pontas FD	34.00	66.00	0.22	0.59
Bases FD	29.50	70.50	0.235	0.557
Meios FD	21.50	78.50	0.262	0.473
Pontas FN	41.50	58.50	0.195	0.695
Bases FN	39.50	60.50	0.202	0.65
Meios FN	39.50	60.50	0.202	0.647
Pontas	26.50	73.50	0.105	0.721
Meios	22.75	77.25	0.11	0.66
Bases	27.50	72.50	0.104	0.691

Na matriz de confusão 1, da ponta da folha nova, a classe “a” (T1) obteve 23 imagens corretamente classificadas de 50, 18 imagens que teriam que ter pertencido à classe 1 foram classificadas como “b” (T2) e 5 imagens que deveriam pertencer à classe 1 foi classificada

como “c” (T3) e 4 no final da linha indica que 4 imagens que deveriam pertencer à classe 1 foram classificadas como “d” (T4).

Matriz de confusão 1. Matriz de confusão da ponta das folhas novas (à esquerda) e do terço médio das folhas novas (à direita) do experimento 1 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica com imagens em escala de cinza de plantas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de cálcio.

=== Confusion Matrix ===

```
a  b  c  d  <-- classified as
23 18  5  4 | a = 1
16 17 12  5 | b = 2
 6 14 12 18 | c = 3
 0  8 11 31 | d = 4
```

=== Confusion Matrix ===

```
a  b  c  d  <-- classified as
0 23  6 21 | a = 1
0 27 11 12 | b = 2
1 27 11 11 | c = 3
1  8  0 41 | d = 4
```

Na Tabela 6, pode-se observar o Experimento 1 rodado com Gabor Wavelets com imagens em escala de cinza. Nota-se que, nas plantas de milho no estágio V4, os melhores resultados foram encontrados na base e no terço médio das folhas novas com 52,50% e 60% de acertos, respectivamente.

Tabela 6. Experimento 1 rodado com Gabor Wavelets com imagens em escala de cinza em folhas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de cálcio.

Gabor Cinza	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC Area
Pontas FD	46.50	53.50	0.178	0.718
Bases FD	44.50	55.50	0.185	0.686
Meios FD	39.00	61.00	0.203	0.639
Pontas FN	51.50	48.50	0.162	0.765
Bases FN	52.50	47.50	0.158	0.764
Meios FN	60.00	40.00	0.133	0.844
Pontas	38.25	61.75	0.088	0.803
Meios	46.75	53.25	0.076	0.841
Bases	37.75	62.25	0.089	0.788

Os melhores resultados obtidos, considerando as imagens de todos os tratamentos (todas as bases) em escala de cinza (sem informação de cor) para as plantas de milho no estágio V4 com níveis de deficiência induzida de cálcio, foram nas classes: ponta, terço médio e base das folhas novas. O melhor resultado obtido foi 60% o qual indica que a informação de textura em escala de cinza não é suficiente para diferenciar os níveis de deficiência.

Na matriz de confusão 2, na base da folha nova, a classe “a” (T1) obteve 28 imagens corretamente classificadas de 50, 6 imagens que deveriam pertencer ao T1 foram classificadas

como “b” (T2), 10 imagens que deveriam pertencer ao T1 foram classificadas como T3 e 6 imagens que deveriam pertencer à classe 1 foram classificadas como “d” (T4).

Matriz de confusão 2. Matriz de confusão da base das folhas novas (à esquerda) e do terço médio das folhas novas (à direita) do experimento 1 rodado com Gabor Wavelets com imagens em escala de cinza de plantas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de cálcio.

=== Confusion Matrix ===

```
a  b  c  d  <-- classified as
28  6 10  6 | a = 1
 5 23 21  1 | b = 2
 5 16 27  2 | c = 3
 7  0  1 42 | d = 4
```

=== Confusion Matrix ===

```
a  b  c  d  <-- classified as
30 10  5  5 | a = 1
17 30  2  1 | b = 2
 6 11 11 22 | c = 3
 5  0 11 34 | d = 4
```

O experimento 2 foi rodado com todos os tratamentos (dose zero, 1/3, 2/3 e dose completa de cálcio na solução nutritiva) e com as plantas de milho no estágio V4 de desenvolvimento da cultura, considerando as imagens coloridas. O objetivo é conhecer o nível de importância da informação de cor na classificação, as técnicas usadas são Gabor Wavelets para imagens coloridas e Dimensão Fractal Volumétrica colorida.

Na Tabela 7, pode-se observar o Experimento 2 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica com imagens coloridas. Nota-se que, nas plantas de milho no estágio V4, os melhores resultados foram encontrados na ponta da folha indicativa do estágio de desenvolvimento do milho e na base da folha nova, apresentando 46,50% e 64% de acerto, respectivamente.

Tabela 7. Experimento 2 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica com imagens coloridas em folhas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de cálcio.

Fractal Colorido	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC Area
Pontas FD	46.50	53.50	0.178	0.722
Bases FD	40.00	60.00	0.2	0.622
Meios FD	42.50	57.50	0.192	0.7
Pontas FN	43.00	57.00	0.19	0.719
Bases FN	54.00	46.00	0.153	0.768
Meios FN	42.00	58.00	0.193	0.698
Pontas	34.50	65.50	0.094	0.787
Meios	33.75	66.25	0.095	0.784
Bases	36.25	63.75	0.091	0.779

Na matriz de confusão 3, na base a folha nova, a classe “a” (T1) obteve 39 imagens corretamente classificadas de 50, 4 imagens que deveriam pertencer ao T1 foram classificadas como “b” (T2), 4 imagens que deveriam pertencer ao T1 foram classificadas como T3 e 3 imagens que deveriam pertencer à classe 1 foram classificadas como “d” (T4).

Matriz de confusão 3. Matriz de confusão da ponta da folha indicativa do estágio de desenvolvimento do milho (à esquerda) e da base das folhas novas (à direita) do experimento 2 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica com imagens coloridas em folhas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de cálcio.

=== Confusion Matrix ===

```

a  b  c  d  <-- classified as
39  4  4  3 | a = 1
10 12 22  6 | b = 2
 2 10 24 14 | c = 3
 2  1 14 33 | d = 4

```

=== Confusion Matrix ===

```

a  b  c  d  <-- classified as
18 12  2 18 | a = 1
 1 38  5  6 | b = 2
 2 16 19 13 | c = 3
 1 20 11 18 | d = 4

```

Na Tabela 8, pode ser observado o Experimento 2 rodado com Gabor Wavelets com imagens coloridas. Nota-se que, nas plantas de milho no estágio V4, os melhores resultados foram encontrados na ponta e no terço médio das folhas novas, apresentando 62,50% e 80% de acerto, respectivamente.

Tabela 8. Experimento 2 rodado com Gabor Wavelets para imagens coloridas em folhas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de cálcio.

Gabor Colorido	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC Area
Pontas FD	55.50	44.5000	55.5	0.771
Bases FD	50.50	49.5000	0.165	0.773
Meios FD	55.50	44.5000	0.148	0.793
Pontas FN	62.50	37.5000	0.125	0.854
Bases FN	60.50	39.5000	0.132	0.859
Meios FN	80.00	20.0000	0.067	0.941
Pontas	49.50	50.5000	0.072	0.892
Meios	59.25	40.7500	0.058	0.92
Bases	49.75	50.2500	0.072	0.881

Na matriz de confusão 4, no terço médio da folha nova, a classe “a” (T1) obteve 49 imagens corretamente classificadas de 50, 1 imagem que deveria pertencer ao T1 foi classificadas como “b” (T2), o 0 (zero) no final da linha indica que não houve mistura de nenhuma imagem com as classes T3 e T4.

Matriz de confusão 4. Matriz de confusão do terço médio das folhas novas (à esquerda) e da ponta das folhas novas (à direita) do experimento 2 rodado com Gabor Wavelets com imagens coloridas em folhas de milho no estádio V4 submetidas a níveis de deficiência de cálcio.

=== Confusion Matrix ===

```

  a  b  c  d  <-- classified as
49  1  0  0 |  a = 1
 2 33 15  0 |  b = 2
 0 13 36  1 |  c = 3
 3  1  4 42 |  d = 4

```

=== Confusion Matrix ===

```

  a  b  c  d  <-- classified as
42  2  4  2 |  a = 1
10 28 10  2 |  b = 2
 2 19 12 17 |  c = 3
 0  0  7 43 |  d = 4

```

O melhor resultado obtido, considerando as imagens coloridas de todos os tratamentos, foi 80% o qual indica que a acrescentando a informação de cor o número de imagens corretamente classificada fica muito melhor, assim como a área da curva ROC fornecendo um modelo mais confiável.

Nos dois experimentos as bases que obtiveram os melhores resultados (porém a melhor separação interclasse) foram o terço médio, ponta e base das folhas novas. Esse resultado foi semelhante ao do experimento 1. Baseado nesta afirmação pode se afirmar que a o terço médio e a ponta das folhas novas fornecem informações importantes do estado nutricional da planta no estádio V4 de desenvolvimento das plantas de milho.

Outro dado importante obtido pelas matrizes de confusão dos dois experimentos é a taxa de acerto na classificação da classe T1 (etiqueta “a”). Os resultados indicam que a classe T1 é a mais simples de classificar.

Os resultados ainda não são confiáveis o suficiente para obter conclusões definitivas, porém direciona a duas informações importantes: quais classes são mais simples de classificar e quais partes da folha refletem melhor a deficiência de cálcio em plantas de milho no estádio V4 de desenvolvimento para o sistema de visão artificial.

O experimento 3 foi rodado com todos os tratamentos (dose zero, 1/3, 2/3 e dose completa de cálcio na solução nutritiva) e com as plantas de milho no estádio V4 de desenvolvimento da cultura, considerando as imagens coloridas. O objetivo é testar o impacto de outras técnicas de extração de características na classificação em escala de cinza e em imagens coloridas (serão mostradas apenas as melhores técnicas para cada tipo de imagens).

Na Tabela 9, está apresentado o experimento 3 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens em escala de cinza em folhas de plantas de milho no estádio V4 de desenvolvimento.

Tabela 9. Experimento 3 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens em escala de cinza em folhas de plantas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de cálcio.

Fractal Cinza AC	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC Area
Pontas FD	55.00	45.00	0.15	0.77
Bases FD	49.50	50.50	0.168	0.741
Meios FD	53.50	46.50	0.155	0.769
Pontas FN	66.00	34.00	0.113	0.866
Bases FN	62.50	37.50	0.125	0.858
Meios FN	69.00	31.00	0.103	0.879
Pontas	46.00	54.00	0.077	0.844
Meios	47.25	52.75	0.075	0.847
Bases	45.25	54.75	0.078	0.822

Nas plantas de milho no estágio V4, os melhores resultados foram encontrados na ponta e no terço médio das folhas novas, apresentando, respectivamente, 66% e 69% de acerto, conforme apresentado na Tabela 9.

Na matriz de confusão 5, no terço médio da folha nova, pode-se observar que a classe “a” (T1) obteve 40 imagens corretamente classificadas de 50, 3 imagens que deveriam pertencer ao T1 foram classificadas como “b” (T2) e “d” (T4) e 4 imagens que deveriam pertencer ao T1 foram classificadas como “b” (T2).

Matriz de confusão 5. Matriz de confusão do terço médio das folhas novas (à esquerda) e da ponta das folhas novas (à direita) do experimento 2 rodado com Gabor Wavelets com imagens coloridas em folhas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de cálcio.

=== Confusion Matrix ===

```

a  b  c  d  <-- classified as
40  3  4  3 | a = 1
 5 22 23  0 | b = 2
 2 16 32  0 | c = 3
 4  1  1 44 | d = 4
```

=== Confusion Matrix ===

```

a  b  c  d  <-- classified as
34 13  2  1 | a = 1
13 35  2  0 | b = 2
 5  7 22 16 | c = 3
 1  0 15 34 | d = 4
```

Na Tabela 10, está apresentado o experimento 3 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens coloridas em folhas de plantas de milho no estágio V4 de desenvolvimento e submetidas a níveis de deficiência de cálcio na solução nutritiva.

Pode ser observado na Tabela 10, que, nas plantas de milho no estágio V4, os melhores resultados foram encontrados na base e na ponta das folhas novas, com 67,5% e 71% de acerto, respectivamente.

Tabela 10. Experimento 3 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens coloridas em plantas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de cálcio.

Fractal Colorido AC	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC Area
Pontas FD	60.00	40.00	0.133	0.79
Bases FD	35.50	64.50	0.215	0.633
Meios FD	54.50	45.50	0.152	0.778
Pontas FN	67.50	32.50	0.108	0.873
Bases FN	71.00	29.00	0.097	0.89
Meios FN	65.50	34.50	0.115	0.873
Pontas	57.25	42.75	0.061	0.882
Meios	47.75	52.25	0.075	0.868
Bases	50.00	50.00	0.071	0.864

Na matriz de confusão 6, na base da folha nova, pode-se observar que a classe “a” (T1) obteve 49 imagens corretamente classificadas de 50, 1 imagem que deveria pertencer ao T1 foi classificadas como “c” (T3), o 0 (zero) no final da linha indica que não houve mistura de nenhuma imagem com as classes T2 e T4.

Matriz de confusão 6. Matriz de confusão da base das folhas novas (à esquerda) e da ponta das folhas novas (à direita) do experimento 3 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens coloridas em plantas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de cálcio.

=== Confusion Matrix ===

```

a  b  c  d  <-- classified as
49  0  1  0 | a = 1
0 37  9  4 | b = 2
3  7 25 15 | c = 3
0  7 12 31 | d = 4
```

=== Confusion Matrix ===

```

a  b  c  d  <-- classified as
40  6  2  2 | a = 1
6 35  7  2 | b = 2
2  9 26 13 | c = 3
0  8  8 34 | d = 4
```

O melhor resultado obtido foi 80% o qual indica que a técnica de Gabor Wavelets para imagens coloridas é uma das melhores técnicas que podem ser usadas neste tipo de imagens. Sendo os melhores resultados com a maior confiabilidade obtida nos experimentos, pode-se afirmar que o terço médio da folha nova é a parte da folha que fornece as informações mais importantes na classificação do estado nutricional de plantas de milho submetidas a níveis de deficiência de cálcio na solução nutritiva, como pode ser observado na Tabela 8. De acordo com Maltavolta (2006), o cálcio é muito pouco transportado no floema e normalmente é imóvel. Desta forma, os sintomas de deficiência deste nutriente manifestam-se inicialmente nas folhas mais novas e análise das mesmas mostra teores mais baixos que os encontrados nas folhas mais velhas.

Além disso, pode-se notar que o teor de cálcio na folha nova (Tabela 4) aumenta gradualmente com o acréscimo de cálcio na solução nutritiva. Esse fato pode ter possibilitado melhores condições de identificação do estado nutricional pelo sistema de visão artificial.

As matrizes de confusão indicam que a classe T1 continua sendo a mais fácil de classificar e a classe T3 (etiqueta “c”) a mais difícil. Quase todas as classes possuem o maior número de erros na classificação dentro da classe T3. Esse fato ocorre, já que as janelas extraídas do nível de deficiência T3 são muito similares (quase iguais) as folhas do nível T4 e T2, o classificador consegue identificar uma boa quantidade desta ainda assim. Esse fato ocorre uma vez que o teor de cálcio na folha nova das plantas no estágio V4 submetidas à dose 2/3 (T3) é igual a $0,94 \text{ g.Kg}^{-1}$ de Ca (Tabela 4) e encontra-se muito próximo ao teor de cálcio na folha nova das plantas em V4 submetidas à dose 1/3 (T2) e completa (T4), que apresentam $0,85$ e $1,62 \text{ g.Kg}^{-1}$ de Ca (Tabela 4), respectivamente, isso pode ter dificultado a identificação do estado nutricional das plantas pelo sistema de visão artificial.

Os resultados deste experimento indicam que é possível obter uma boa separação de classes considerando T1 e T2 que são níveis de deficiência severos e moderados na planta. Isso também pode ser confirmado pelo teor de cálcio na folha nova das plantas no estágio V4, em que aquelas submetidas à omissão completa de cálcio na solução nutritiva (T1) apresentaram $0,61 \text{ g.Kg}^{-1}$ de Ca e aquelas submetidas a dose 1/3 de cálcio (T2) apresentaram $0,85 \text{ g.Kg}^{-1}$ de Ca, essa diferença permitiu melhor diferenciação entre as classes pelo sistema de visão artificial.

Na Tabela 11, está apresentado o experimento 4 rodado com os tratamentos T1, T2 e T4, considerando as imagens coloridas. Já é conhecida a importância da informação de cor para a classificação, portanto o objetivo neste momento foi testar o desempenho da classificação excluindo a classe T3 (2/3 da dose completa) que nos experimentos anteriores mostrou-se como a classe mais difícil de classificar por ser muito similar à classe T2 e T4.

Pode-se notar na Tabela 11, que o melhor resultado obtido foi 88.67% mostrando a melhora considerável nos resultados quando a classe T3 foi excluída. Como já citado anteriormente, devido à grande proximidade do teor de cálcio na folha nova entre as plantas dos tratamentos T2, T3 e T4, quando a classe T3 foi retirada da base de dados, houve distinção maior entre as classes, possibilitando ao sistema de visão artificial melhor identificação do estado nutricional das plantas.

Tabela 11. Experimento 4 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens coloridas considerando apenas os tratamentos T1 (dose zero de cálcio), T2 (dose 1/3) e T4 (dose completa) em plantas de milho no estágio V4 e submetidas a níveis de deficiência de cálcio na solução nutritiva.

Fractal Colorido AC 3 classes (T1,T2,T4)	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC Area
Pontas FD	70.00	30.00	0.15	0.865
Bases FD	50.67	49.33	0.247	0.69
Meios FD	65.33	34.67	0.173	0.815
Pontas FN	80.67	19.33	0.097	0.939
Bases FN	88.67	11.33	0.057	0.961
Meios FN	75.33	24.67	0.123	0.899
Pontas	70.00	30.00	0.06	0.907
Meios	60.33	39.67	0.079	0.868
Bases	67.00	33.00	0.066	0.9

O experimento confirmou que a ponta e a base das folhas novas fornecem as informações mais importantes para a identificação do estado nutricional de plantas de milho submetidas a níveis de deficiência de cálcio na solução nutritiva.

Na matriz de confusão 7, fica claro que o número de erros é muito menor.

Matriz de confusão 7. Matriz de confusão da base das folhas novas (à esquerda) e da ponta das folhas novas (à direita) do experimento 4 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens coloridas considerando apenas os tratamentos T1 (dose zero de cálcio), T2 (dose 1/3) e T4 (dose completa).

=== Confusion Matrix ===

=== Confusion Matrix ===

a	b	c	<-- classified as	a	b	c	<-- classified as
50	0	0	a = 1	43	4	3	a = 1
1	42	7	b = 2	2	40	8	b = 2
0	9	41	c = 3	1	11	38	c = 3

O experimento 5 foi rodado com os tratamentos T1 e T4, considerando as imagens coloridas. O experimento tem como objetivo testar a taxa de acerto entre duas classes, T1 e T4 que representam o melhor e o pior dos casos (dose zero e dose completa), como pode ser observado na Tabela 12.

Excluindo as deficiências intermediárias T2 (1/3 da dose completa) e T3 (2/3 da dose completa) o resultado foi de 100% de acerto. Foi fácil para o classificador identificar 100% das imagens de T1 e T4 (Tabela 12).

Tabela 12. Experimento 5 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens em coloridas considerando apenas os tratamentos T1 (dose zero) e T4 (dose completa) em plantas de milho no estágio V4 e submetidas a níveis de deficiência de cálcio na solução nutritiva.

Fractal Colorido AC 2 classes (T1,T4)	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC Area
Pontas FD	82.00	18.00	0.18	0.92
Bases FD	65.00	35.00	0.35	0.68
Meios FD	84.00	16.00	0.16	0.94
Pontas FN	95.00	5.00	0.05	0.98
Bases FN	100.00	0.00	0.00	1.00
Meios FN	92.00	8.00	0.08	0.97
Pontas	79.00	21.00	0.07	0.91
Meios	77.50	22.50	0.08	0.90
Bases	66.50	33.50	0.11	0.89

Esse resultado faz sentido quando se observa o teor de cálcio na folha nova na Tabela 4, onde a folha nova das plantas submetidas à omissão completa de cálcio na solução nutritiva apresenta $0,61 \text{ g.Kg}^{-1}$ de Ca, em contrapartida a folha nova das plantas com dose completa de nutrientes apresenta $1,62 \text{ g.Kg}^{-1}$ de Ca, essa diferença permitiu maior facilidade de distinção entre as classes pelo sistema de visão artificial.

Matriz de confusão 8. Matriz de confusão da base das folhas novas (à esquerda) e da ponta das folhas novas (à direita) do experimento 5 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens em coloridas considerando apenas os tratamentos T1 (dose zero) e T4 (dose completa) em plantas de milho no estágio V4 e submetidas a níveis de deficiência de cálcio na solução nutritiva.

```

=== Confusion Matrix ===      === Confusion Matrix ===

  a  b  <-- classified as      a  b  <-- classified as
50  0  |  a = 1                46  4  |  a = 1
 0 50  |  b = 2                1 49  |  b = 2

```

Novamente os melhores resultados foram fornecidos pela folha nova, onde a deficiência de cálcio mostrou-se mais facilmente identificada pelo sistema de visão artificial no estágio V4 de desenvolvimento das plantas de milho.

Embora o sistema de visão artificial consiga identificar deficiências nutricionais severas (T1) e moderadas (T2), porém quando muito leves, como é o nível de deficiência T3 (2/3 da dose), apresenta taxa de acerto menor, com 80% de acertos, enquanto que na exclusão do dose intermediária T3 (sintomas leves) a taxa de acertos sobe para 88,67%, ou seja, apresenta diferença de 8,67% inferior, sob o ponto de vista agrônomo e operacional da técnica, é preferível que o sistema identifique sintomas mais leves (latentes) mesmo que

apresente taxa percentual de acertos menor. Desta forma, será possível corrigir deficiências do nutriente mesmo muito pequena, que nem mostrem sintomas visuais ou que estes sejam muito leves, mas que levam a decréscimos na produção e entre outros sintomas característicos da deficiência de tal nutriente.

4.2. Magnésio

4.2.1. Sintomas visuais

As plantas do experimento com deficiência de magnésio apresentaram lâminas foliares com clorose internerval, com as nervuras verdes e as bordas e o ápice do limbo voltados para baixo, inicialmente nas folhas mais velhas, como pode ser observado na Figura 22.

Figura 22. Sintomas iniciais de deficiência de magnésio em plantas de milho submetidas à omissão completa de magnésio na solução nutritiva aos 15 dias após a aplicação do tratamento.

Diferente do cálcio, o magnésio rapidamente é translocado das regiões maduras para as mais novas da planta, com crescimento ativo, como consequência os sintomas de deficiência aparecem primeiro nas folhas maduras (EPSTEIN; BLOOM, 2006). A clorose progrediu para o ápice do limbo foliar, e tornou-se bronzeada e necrosada. Sintomas similares também foram observados por vários autores (MONTEIRO et al., 1995)

Figura 23. Sintomas de deficiência de magnésio nas raízes de plantas de milho do estágio V6 (a) e na parte aérea de plantas de milho no estágio aos 15 dias após a aplicação do tratamento (b) submetidas a níveis crescentes de magnésio na solução nutritiva (da esquerda para a direita: dose completa, 2/3, 1/3 e dose zero de magnésio).

Fontes (2004) mencionou que plantas deficientes em magnésio podem apresentar, nas folhas velhas, áreas amareladas e necrosadas, de coloração marrom. A deficiência de magnésio também promoveu acentuada redução no desenvolvimento do sistema radicular (Figura 23a), concordando com os resultados obtidos por Utumi et al. (1999).

Figura 24. Sintomas de deficiência de magnésio em plantas de milho submetidas à omissão completa de magnésio na solução nutritiva aos 28 DAE (a,b) e 48 DAE (c,d).

Nas plantas deficientes em magnésio, foram observadas também manchas arroxeadas na região internerval das folhas mais velhas, sintoma típico de deficiência de fósforo para muitas espécies, como pode ser observado na Figura 24. No entanto, as manchas arroxeadas, que apareceram em todas as plantas com omissão total de magnésio na solução nutritiva, evoluíram para a clorose internerval, o que, por sua vez, é um sintoma típico de deficiência de magnésio (SARCINELLI et al., 2004).

4.2.2. Parâmetros de crescimento da planta

Os parâmetros de crescimento estudados podem ser observados nas Figuras 25 e 26. Eles variaram significativamente ($P < 0,01$) com o incremento nas doses de magnésio na solução nutritiva e também com as épocas de amostragens do material, existindo interação entre as doses de magnésio e as épocas de amostragem e respondendo às doses de magnésio segundo um modelo quadrático.

Figura 25. Diâmetro do colmo (a), altura de planta (b) e número total de folhas (c) em plantas de milho submetidas a níveis crescentes de concentração de magnésio na solução nutritiva e em três épocas de amostragem.

Na época 1 de amostragem, todos os parâmetros de crescimento da planta avaliados apresentaram-se muito pequenos em relação aos máximos alcançados nas épocas seguintes. Nesta época, o diâmetro máximo do colmo, a altura máxima e o número máximo de folhas foram de 1,5 cm na dose 42 mg.L⁻¹ de magnésio, 46,4 cm na dose 40 mg.L⁻¹ de magnésio e 11 folhas na dose 48 mg.L⁻¹ de magnésio, respectivamente (Figura 25). Já o peso seco máximo da parte aérea (Figura 25a) foi de 6,1 g.planta⁻¹ na dose de magnésio de 48 mg.L⁻¹ e o peso seco máximo da raiz (Figura 25b), nesta época, foi de 1,5 g.planta⁻¹ na dose de magnésio de 46 mg.L⁻¹.

Na época 2, o diâmetro máximo do colmo, a altura máxima e o número máximo de folhas foram, respectivamente, de 2,5 cm e 98 cm na dose 45 mg.L⁻¹ de magnésio e 13 folhas na dose 35 mg.L⁻¹ de magnésio, (Figura 25). Já o peso seco máximo da parte aérea (30,1 g.planta⁻¹) foi encontrado na dose 36 mg.L⁻¹ de magnésio e o peso seco máximo da raiz (9,3 g.planta⁻¹) foi encontrado na dose 43 mg.L⁻¹ de magnésio (Figura 26).

Figura 26. Produção de massa seca da parte aérea (a), massa seca das raízes (b) por planta e relação entre massa seca da parte aérea e massa seca de raízes (c) de plantas de milho submetidas a níveis crescentes de concentração de magnésio na solução nutritiva e em três épocas de amostragem.

Entre as épocas de avaliações, o máximo diâmetro do colmo (2,7 cm), a máxima altura de planta (105,3 cm) e o máximo número de folhas (17 folhas) foram verificados na época 3, quando o nível de magnésio da solução nutritiva era de 45, 40 e 42 mg.L⁻¹, respectivamente, como podem ser observados na Figura 17. O peso seco máximo da parte aérea da planta foi de 55,1 g.planta⁻¹ com 31 mg.L⁻¹ de magnésio na solução nutritiva e o peso seco máximo da raiz foi de 17,4 g.planta⁻¹ com 35 mg.L⁻¹ de magnésio na solução nutritiva, ambos também observados na época 3 (Figura 26).

Boaro et al. (1996) observaram que o aumento da concentração de magnésio na solução determinam o aumento do número de folhas em feijoeiro. Malavolta et al. (1980b), trabalhando com o cultivar carioca do feijão *Phaseolus vulgaris* L. observaram redução na altura das plantas submetidas à omissão de magnésio. Embora as espécies estudadas sejam diferentes, o comportamento das plantas foi o mesmo.

Os sintomas de deficiência de magnésio se caracterizaram por drástica redução no crescimento da planta (Figura 25) acompanhada pelo aparecimento de manchas cloróticas entre as nervuras, que tiveram início aos 20 dias após a aplicação do tratamento e evoluíram rapidamente para necrose. Sintomas semelhantes foram observados em plantas de milho por Malavolta et al. (1997). Inicialmente, a nervura principal das folhas mais velhas ficaram levemente amarelas. Com o agravamento da deficiência, a clorose se expandiu entre as nervuras das folhas. As folhas passaram da coloração amarela à arroxeada, com posterior necrose nas bordas da folhas.

A omissão de magnésio na solução nutritiva limitou a produção de massa seca da parte aérea e também a de massa seca da raiz nas três épocas estudadas (Figura 26). Monteiro e Consolmagno Neto (2008) também concluíram que o incremento de magnésio na solução promove o aumento da superfície radicular do capim-tanzânia. Monteiro et al. (1995) constataram que a omissão de magnésio na solução nutritiva para cultivo do *Brachiaria brizantha* Stapf. cv. Marandu reduziu a produção de massa seca de raízes quando comparada ao tratamento completo. Silva et al. (2009), estudando os sintomas visuais de deficiências nutricionais, verificaram que todos os tratamentos com omissão de magnésio apresentaram produção de massa seca inferiores à do tratamento completo.

Hernandez e Silveira (1998) observaram que o acréscimo de magnésio no solo levou à maior produção de material seco e aumentos no crescimento das plantas de milho. Estudando o efeito de doses de magnésio sobre o rendimento da massa seca da parte aérea em *Brachiaria brizantha* cv. Marandu em solução nutritiva, Sarkis et al. (1996) observaram que o magnésio acrescenta significativamente a produção de massa seca das plantas.

A relação entre a massa seca da parte aérea e a massa seca de raízes foi significativa ($P < 0,01$). Nota-se que a relação parte aérea:raiz reduziu de maneira quadrática, partindo de valores de 6,2:1; 9,4:1 e 7,9:1 para as épocas 1, 2 e 3 respectivamente na omissão completa de magnésio na solução, para atingir valores de 3,4:1; 3,1:1 e 3,2:1 respectivamente na dosagem de 48 mg.L^{-1} de Mg, ou seja, redução de 1,8; 3,0 e 2,5 vezes para as respectivas épocas, indicando o desenvolvimento crescente do sistema radicular com o acréscimo de magnésio na solução.

Essa resposta na produção de massa seca de raízes mostra a relevância de uma planta estar bem suprida de magnésio para apresentar o sistema radicular bem desenvolvido. Monteiro e Consolmagno Neto (2008) afirmaram que para o crescimento vigoroso do sistema radicular, é necessário o fornecimento de elevada dose de magnésio. Isto tem sido atribuído ao fato de o magnésio ser ativador de muitas enzimas; quase todas as enzimas fosforilativas

dependem da presença de magnésio, que forma uma ponte entre o ATP ou o ADP e a molécula de enzima. A transferência de energia desses dois compostos é fundamental nos processos de fotossíntese, respiração, reações de síntese de compostos orgânicos, absorção iônica e trabalho mecânico, como o aprofundamento e expansão da raiz (MALAVOLTA, 2006).

Fancelli (2010) afirma que o desenvolvimento radicular está associado com o desempenho da parte aérea, desta forma, o valor da relação parte aérea:raiz varia em função das condições do meio e do estágio fenológico da planta.

4.2.3. Acúmulo de nutrientes

4.2.3.1. Parte aérea

Os resultados apresentados nas Figuras 19 e 20 demonstram que o acúmulo dos macronutrientes e micronutrientes na parte aérea de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento foi significativamente ($P < 0,01$) influenciado pela concentração de magnésio na solução nutritiva, além da interação existente entre as doses de magnésio e a idade da planta.

As plantas que não receberam magnésio na solução nutritiva (dose zero) foram as que apresentaram o menor acúmulo de macronutrientes primários e secundários durante o seu ciclo de crescimento (Figura 19).

a) Nitrogênio

Com o aumento da idade da planta, houve um incremento no acúmulo de nitrogênio na parte aérea, ajustando-se a uma equação quadrática para todas as doses de magnésio estudadas (Figura 27a). Malavolta (2006) afirma que a curva que descreve o crescimento em relação ao tempo (idade) é uma sigmóide típica, comumente. Por esse motivo a absorção de nutrientes é em geral maior no segmento linear da curva, quando são maiores a produção de biomassa e a velocidade de acumulação de nutrientes. Arnon (1975) afirmou que as exigências de nitrogênio pelas plantas de milho variam consideravelmente com os diferentes estádios de desenvolvimento da planta, sendo mínimas nos estádios iniciais, aumentando com a elevação do crescimento da planta e alcançando o pico durante o período compreendido entre o início do florescimento e o início da formação de grãos.

O nitrogênio foi o nutriente mais acumulado na parte aérea das plantas na dose 0 (140 mg.planta⁻¹ de N), dose 2/3 (1320 mg.planta⁻¹ de N) e dose completa (1220 mg.planta⁻¹ de N) e o segundo nutriente mais acumulado na parte aérea na dose 1/3 (1390 mg.planta⁻¹ de N).

Figura 27. Acúmulo dos macronutrientes primários: nitrogênio (a), fósforo (b) e potássio (c) e dos macronutrientes secundários cálcio (d), magnésio (e) e enxofre (f) na parte aérea de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de magnésio na solução nutritiva.

Observou-se que não houve distinção para o acúmulo de nitrogênio na parte aérea para as doses de magnésio aplicado, indicando que com um pequeno incremento de magnésio já estimulou a absorção de nitrogênio. Malavolta e Moraes (2007) afirmam que o nitrogênio pode mostrar interação com outros elementos, neste caso, sua presença pode provocar o aumento (sinergismo) no teor de magnésio e reciprocamente (NxMg), em que o Mg atua como acompanhante de NO_3^- .

O menor acúmulo de nitrogênio na parte aérea foi nas plantas que não receberam magnésio (dose zero) na solução (Figura 27a).

b) Fósforo

Foi verificado incremento significativo ($P < 0,01$) e quadrático no acúmulo de fósforo na parte aérea das plantas nas doses de magnésio estudadas à medida que aumentou a idade da planta (Figura 27b), conforme observado por Malavolta (2006).

A omissão de magnésio na solução proporcionou um menor acúmulo de fósforo na parte aérea das plantas, já o maior acúmulo de fósforo na parte aérea foi nas plantas receberam dose completa de magnésio na solução nutritiva (Figura 27b). A absorção do H_2PO_4^- é máxima na presença de Mg^{2+} : esse papel de “carregador de fósforo” se explica, possivelmente pela sua participação na ativação de ATPase da membrana implicadas na absorção iônica e na própria geração do ATP na fotossíntese e na respiração. A falta de magnésio inibe a fixação do CO_2 porque, além de fazer parte da clorofila, o magnésio é exigido em reações de fotofosforilação e em outras de fase escura do processo, por exemplo, a carboxilase de ribulose de fosfato (MALAVOLTA, 2006). Mengel e Kirkby (1987) afirmam que, para a cultura do milho, o suprimento inadequado de fósforo nos estádios iniciais de desenvolvimento acarreta redução no número de espigas por unidade de área e, conseqüentemente, leva à redução na produção final de grãos.

O fósforo foi o 4º macronutriente mais acumulado na parte aérea das plantas de milho em todas as doses de magnésio, sendo encontrado até 18,6; 118; 139 e 143 mg.planta^{-1} de P respectivamente nas doses 0, 1/3, 2/3 e dose completa no ciclo de desenvolvimento estudado.

c) Potássio

Houve um efeito significativo ($P < 0,01$) e quadrático no acúmulo de potássio na parte aérea com o aumento da idade das plantas (Figura 27c). O aumento na idade da planta

também promoveu um incremento no acúmulo de potássio na parte aérea, conforme observado por Malavolta (2006).

O menor acúmulo de potássio na parte aérea foi observado nas plantas que não receberam magnésio na solução nutritiva (Figura 27c). Entretanto, a dose 2/3 e dose completa de magnésio apresentaram menores acúmulos de potássio em relação à dose 1/3. Souza et al. (2008) observaram que os maiores acúmulos foliares de magnésio pelo maracujazeiro ocorrem na ausência ou com pequenas doses de potássio aplicados. De modo geral, o aumento na quantidade absorvida de um cátion pela planta pode resultar em redução na absorção de um ou mais cátions. Tanto o potássio pode reduzir a absorção de magnésio como o magnésio pode diminuir a absorção do potássio, em razão do antagonismo entre esses minerais (MARSCHNER, 1995).

O potássio foi o segundo macronutriente mais acumulado na parte aérea das plantas nas dose 0 ($120 \text{ mg.planta}^{-1}$ de K), dose 2/3 ($1043 \text{ mg.planta}^{-1}$ de K) e dose completa ($1004 \text{ mg.planta}^{-1}$ de K) e o primeiro macronutriente mais acumulado na parte aérea na dose 1/3 ($1520 \text{ mg.planta}^{-1}$ de N).

d) Cálcio

Na figura 27d, pode-se observar que o acúmulo de cálcio na parte aérea das plantas variou conforme modelo quadrático em função do aumento na idade das plantas. O aumento na idade da planta promoveu um acúmulo de cálcio na parte aérea, conforme relatado por Malavolta (2006).

O cálcio, terceiro nutriente mais absorvido pela parte aérea das plantas, no final do ciclo de desenvolvimento das plantas estudado, atingiu as quantidades de 25,4; 218; 262 e 195 mg planta^{-1} respectivamente nas plantas com dose 0, 1/3, 2/3 e dose completa de magnésio na solução nutritiva.

e) Magnésio

O acúmulo de magnésio na parte aérea em cada dose de magnésio na solução nutritiva variou significativamente ($P < 0,01$) com a idade das plantas, sendo que com o aumento da idade houve um incremento segundo o modelo quadrático (Figura 27e).

O aumento na idade da planta promoveu um acúmulo de magnésio na parte aérea, sobretudo para as plantas que receberam dose completa de magnésio (Figura 27e), conforme observado por Malavolta (2006).

Houve incremento gradativo e significativo ($P < 0,01$) no acúmulo de magnésio na parte aérea das plantas com o aumento deste nutriente na solução nutritiva. As plantas que receberam a dose completa de magnésio (48 mg. L^{-1}) na solução apresentaram o maior acúmulo de magnésio na parte aérea, seguidas das plantas que receberam $2/3$ da dose completa (32 mg. L^{-1}) e posteriormente as que receberam $1/3$ da dose completa (16 mg. L^{-1}). Sendo que o menor acúmulo de magnésio na parte aérea foi nas plantas que não receberam magnésio (dose zero) na solução (Figura 27e). Esse comportamento também foi observado por Boaro et al. (1999) durante o desenvolvimento do feijoeiro em solução nutritiva, em que os menores conteúdos de magnésio foram observados nas plantas submetidas ao tratamento com omissão total deste nutriente.

O magnésio foi o macronutriente acumulado em menor quantidade na parte aérea das plantas de milho, apresentando $1,25 \text{ mg planta}^{-1}$, para a dose 0 de magnésio na solução; $41,5 \text{ mg planta}^{-1}$, para a dose $1/3$; $45,2 \text{ mg planta}^{-1}$, para a dose $2/3$ e $53,0 \text{ mg planta}^{-1}$, para a dose completa de magnésio na solução, no final do ciclo das plantas.

De acordo com Fancelli (2010), como apresenta relevantes funções no desenvolvimento de plantas, a disponibilidade de magnésio ao longo do ciclo do milho mostra-se imprescindível para assegurar o desempenho satisfatório da planta. No caso do milho, seu eficiente aproveitamento entre os estádios V6 e V10 contribui para o aumento da concentração de reservas no colmo, que será de grande valia para a complementação do enchimento de grãos em etapas mais avançadas.

f) Enxofre

Na Figura 27f, pode ser observado que com o aumento da idade das plantas, o acúmulo de enxofre na parte aérea variou significativamente ($P < 0,01$) e apresentou comportamento quadrático em cada dose de magnésio.

O aumento da idade das plantas promoveu um aumento gradativo no acúmulo de enxofre na parte aérea para as doses de magnésio estudadas (Figura 27f), podendo-se observar que de V6 (48 DAE) para V8 (59 DAE) houve um grande aumento no acúmulo de enxofre.

Além disso, a omissão de magnésio na solução nutritiva levou ao menor acúmulo de enxofre na parte aérea (Figura 27f).

O enxofre foi o quinto nutriente mais acumulado pela parte aérea das plantas (ou o segundo macronutriente acumulado em menor quantidade), apresentando $3,8 \text{ mg planta}^{-1}$, para a dose 0 de magnésio na solução; $78 \text{ mg planta}^{-1}$, para a dose 1/3; $76 \text{ mg planta}^{-1}$, para a dose 2/3 e $74 \text{ mg planta}^{-1}$, para a dose completa de magnésio na solução, no final do ciclo das plantas.

g) Micronutrientes

Na Figura 28, estão apresentados os micronutrientes cobre, ferro, manganês e zinco acumulados na parte aérea de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de magnésio na solução nutritiva.

Figura 28. Acúmulo dos micronutrientes cobre (a), ferro (b), manganês (c) e zinco (d) na parte aérea de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de magnésio na solução nutritiva.

Pode-se observar que o acúmulo de cobre na parte aérea da planta variou significativamente ($P < 0,01$) e apresentou aumento quadrático com o incremento nos dias de

crescimento (Figura 28a). Além disso, houve um aumento gradativo no acúmulo de cobre na parte aérea das plantas inversamente proporcional ao aumento nas doses de magnésio na solução nutritiva, exceto para as plantas com a dose 0 mg.L⁻¹ de magnésio, que mostrou o menor acúmulo desse micronutriente na parte aérea.

O cobre foi o nutriente menos acumulado pela parte aérea das plantas com omissão de magnésio na solução, atingindo a quantidade de 0,13 mg planta⁻¹. Foi o oitavo nutriente (ou o segundo micronutriente) mais acumulado pela parte aérea das plantas com a dose 1/3, alcançando 1,97 mg planta⁻¹, e foi também para as doses 2/3 e completa o segundo nutriente menos acumulado na parte aérea das plantas atingindo a quantidade de 0,93 e 0,47 mg planta⁻¹, respectivamente, no final do ciclo das plantas. Nota-se que o acúmulo de cobre na parte aérea das plantas de milho foi inversamente proporcional ao aumento nas doses de magnésio na solução nutritiva. Dantas et al. (1979), verificaram um aumento no teor de cobre nas folhas de feijoeiro cultivado em solução nutritiva sem magnésio. Malavolta (2006) afirma que o processo de absorção do cobre é metabolicamente ativo e reduzido por inibidores respiratórios, em que um elemento pode influenciar a absorção de outro. Um caso de inibição competitiva é a relação Ca/Cu, em que os elementos possuem o mesmo tipo de carga, valência igual ou próxima e devem ter semelhanças quanto ao raio iônico e ao grau de hidratação.

Para os demais micronutrientes, observa-se um aumento significativo ($P < 0,01$) e quadrático no acúmulo de ferro (Figura 28b), manganês (Figura 28c) e zinco (Figura 28d) com o aumento da idade das plantas.

O ferro (Figura 28b) foi o micronutriente mais acumulado na parte aérea das plantas em todos os níveis de magnésio na solução, apresentando quantidades de 1,1; 19,0; 17,1 e 17,4 mg planta⁻¹, respectivamente, para as doses 0, 1/3, 2/3 e dose completa.

O manganês (Figura 28c) foi o 8º nutriente mais acumulado pela parte aérea das plantas com omissão de magnésio na solução, com dose 2/3 e dose completa, atingindo respectivamente a quantidade de 0,59, 1,87 e 1,69 mg planta⁻¹. Foi o 9º nutriente (ou o 3º micronutriente) mais acumulado pela parte aérea das plantas com a dose 1/3, alcançando 1,22 mg planta⁻¹, no final do ciclo das plantas.

O zinco (Figura 28d) foi o 9º nutriente mais acumulado pela parte aérea das plantas com omissão de magnésio na solução e atingiu a quantidade de 0,30 mg planta⁻¹, já para as demais doses de magnésio estudadas, o zinco foi o nutriente menos acumulado na parte aérea, atingindo respectivamente a quantidade de 0,64, 0,43 e 0,39 mg planta⁻¹, no final do ciclo. Também foi observado redução do acúmulo de zinco com o aumento de magnésio na solução,

concordando com Malavolta (2006) que relatou a interação entre magnésio e zinco, em que o acréscimo de zinco na solução nutritiva causou diminuição na absorção de magnésio pela planta.

4.2.3.2. Raiz

A interação entre doses de magnésio e idade da planta foi significativa ($P < 0,01$) para o acúmulo dos macronutrientes e micronutrientes na raiz das plantas de milho (Figuras 29 e 30).

Foram verificados incrementos significativos ($P < 0,01$) e quadráticos no acúmulo de nitrogênio (Figura 29a), fósforo (Figura 29b), potássio (Figura 29c), cálcio (Figura 29d), magnésio (Figura 29e) e enxofre (Figura 29f) na raiz de milho com o aumento na idade das plantas em todas as doses de magnésio estudadas, conforme relatou Malavolta (2006).

As plantas com omissão de magnésio na solução nutritiva mostraram o menor acúmulo de macronutrientes na raiz em todo o seu ciclo de crescimento (Figura 29).

Com base no acúmulo de nutrientes nas raízes de milho, obedeceu a seguinte ordem decrescente: $N > K > Ca > P > S > Mg$, em todas as doses de magnésio estudadas

Houve resposta do acúmulo de magnésio na raiz ao aumento de magnésio na solução nutritiva. Como pode ser verificado na Figura 29e, com o aumento da disponibilidade desse nutriente, a planta mostrou acúmulos maiores de magnésio na raiz durante todo o seu ciclo de crescimento, comportamento semelhante foi observado no acúmulo de magnésio na parte aérea da planta (Figura 19e). Esses resultados corroboram com os obtidos por Monteiro e Consolmagno Neto (2008), que verificaram interação entre as doses de magnésio na solução e a concentração de magnésio nas raízes de capim-tanzânia, que elevou conforme o aumento das doses de magnésio na solução nutritiva. Pereira (2001) relatou que as concentrações de magnésio nas raízes de capim-mombaça aumentaram linearmente de acordo com o aumento das doses de magnésio na solução nutritiva.

As plantas que receberam a dose completa de magnésio (48 mg. L^{-1}) na solução apresentaram o maior acúmulo de magnésio nas raízes, seguidas das plantas que receberam $2/3$ (32 mg. L^{-1}) e posteriormente as que receberam $1/3$ (16 mg. L^{-1}), atingindo respectivamente 47,2; 27,4 e $21,0 \text{ g.Kg}^{-1}$. Sendo que o menor acúmulo de magnésio na parte aérea foi nas plantas que não receberam magnésio (dose zero) na solução (Figura 27e), atingindo $0,23 \text{ g.Kg}^{-1}$. Esse comportamento também foi observado por Boaro et al. (1999) durante o desenvolvimento do feijoeiro em solução nutritiva, em que os menores conteúdos

de magnésio foram observados nas plantas submetidas ao tratamento com omissão total deste nutriente.

Figura 29. Acúmulo dos macronutrientes primários: nitrogênio (a), fósforo (b) e potássio (c) e dos macronutrientes secundários cálcio (d), magnésio (e) e enxofre (f) na raiz de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de magnésio na solução nutritiva.

Na Figura 29, está apresentado o acúmulo dos micronutrientes: cobre, ferro, manganês e zinco na raiz de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de cálcio na solução nutritiva.

Observa-se acréscimo significativo ($P < 0,01$) no acúmulo desses micronutrientes com o aumento da idade das plantas, apresentando um comportamento quadrático (Figura 30). As plantas que não receberam magnésio na solução (dose 0 mg.L^{-1}), apresentaram o menor acúmulo de micronutrientes no ciclo estudado da cultura do milho.

Esses resultados estão de acordo com Dantas et al. (1979), para o feijoeiro, em que a omissão de magnésio na solução nutritiva causou diminuição do acúmulo manganês.

Novamente o acúmulo de cobre reduziu com o aumento das doses de magnésio na solução (Figura 30a), fato já confirmado por Malavolta (2006), que afirmou a existência da interação entre zinco e magnésio na solução.

Figura 30. Acúmulo dos micronutrientes cobre (a), ferro (b), manganês (c) e zinco (d) na raiz de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de magnésio na solução nutritiva.

Pode-se observar na Tabela 13, o acúmulo total (acumulado na parte aérea + acumulado na raiz) de macro e micronutrientes durante o período de crescimento do milho para população de 60.000 plantas.ha⁻¹ com a dose completa de nutrientes.

Verifica-se que o acúmulo total de macro e micronutrientes até o estágio V4 é menor quando comparado aos demais estádios estudados, concordando com os resultados encontrados por Flannery (1987) em plantas de milho, que constatou que a absorção de nutrientes até o estágio V4 é praticamente inexistente, correspondendo neste estágio 2% do Mg total acumulado durante todo o ciclo do milho.

Tabela 13. Acúmulo de nutrientes na planta inteira durante o período de crescimento do milho para população de 60.000 plantas.ha⁻¹ com a dose completa de nutrientes.

Época	N	P	K	S	Ca	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn
	Kg/há							g/há		
V4	21,21	2,14	11,90	0,80	1,64	0,96	0,22	4,66	21,84	7,98
V6	67,91	6,87	50,38	3,92	7,78	3,07	0,93	33,26	80,58	27,60
V8	102,44	11,71	83,20	7,33	17,97	6,03	2,18	23,02	136,80	38,17

Nota-se que o acúmulo total de Mg triplicou do estágio V4 para V6 e em V8, aumentou mais de 6 vezes em relação à V4. De acordo com Fornasieri Filho (1992) a marcha de absorção de magnésio pela planta de milho é de reduzida intensidade até o estágio da 12ª folha desenvolvida, intensificando-se a partir desta até a fase de formação de dente. Sua maior concentração está nas folhas, entretanto nos grãos atinge mais de 36% do total absorvido pelas folhas.

De acordo com Büll (1993), a absorção de macronutrientes, correspondente ao rendimento de 9100 Kg.ha⁻¹, pela cultura do milho no final de seu ciclo, em Kg.ha⁻¹, corresponde a: N=190; P=39; K=196; Ca=40; Mg=44 e S=21 e a absorção de micronutrientes em g.ha⁻¹ para o mesmo rendimento corresponde a: Fe=2.100; Cu=110; Mn=340 e Zn=400. Já Coelho e França (1995) afirma que para produtividade média de 9170 Kg.ha⁻¹, a extração média de nutrientes pelo milho para produção de grãos é correspondente a: N=187 Kg.ha⁻¹; P=34 Kg.ha⁻¹; K=143 Kg.ha⁻¹; Ca=30 Kg.ha⁻¹ e Mg=28 Kg.ha⁻¹.

Os três nutrientes mais acumulados pela planta+raiz de milho no experimento foram os seguintes em ordem decrescente de acúmulo: N>K>Ca, concordando com os resultados obtidos por Hiroce et al. (1989), que observaram esta ordem de acúmulo de macronutrientes.

4.2.3.3. *Folha indicativa do estágio de desenvolvimento da planta*

O acúmulo dos macronutrientes na folha indicativa do estágio de desenvolvimento de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento em função de níveis crescentes de concentração de magnésio na solução nutritiva pode ser observado na Figura 31.

Houve interação significativa ($P < 0,01$) entre as doses de magnésio e idade da planta para o acúmulo dos macronutrientes na folha indicativa do estágio de desenvolvimento de plantas de milho, exceção apenas para o acúmulo de fósforo na folha indicativa do estágio de desenvolvimento da planta de milho, que embora não tenha apresentado interação significativa, foi observado efeito isolado para a idade das plantas.

O acúmulo de macronutrientes na folha indicativa do estágio de desenvolvimento de plantas foi afetado pela idade das plantas. O aumento na idade promoveu uma relação quadrática para as doses de magnésio estudadas (Figura 31), conforme relatado por Malavolta (2006).

A omissão de magnésio na solução nutritiva promoveu o menor acúmulo de todos os macronutrientes na folha indicativa do estágio de desenvolvimento de plantas durante o ciclo de crescimento (Figura 31).

Observa-se também, na Figura 31e, o acúmulo significativo ($P < 0,01$) e crescente de magnésio na folha indicativa do estágio de desenvolvimento de plantas, com aumento das doses de magnésio na solução nutritiva. A diminuição no teor de magnésio em plantas submetidas à menor dose de magnésio na solução confirmam os resultados encontrados por Boaro et al. (1999) em feijoeiro.

O magnésio foi o macronutriente acumulado em menor quantidade na folha indicativa do estágio de desenvolvimento do milho, atingindo, no final do ciclo das plantas, $0,46 \text{ mg planta}^{-1}$, para a dose zero de magnésio na solução; $2,3 \text{ mg planta}^{-1}$, para a dose 1/3; $2,9 \text{ mg planta}^{-1}$, para a dose 2/3 e $3,8 \text{ mg planta}^{-1}$, para a dose completa de magnésio na solução.

Nota-se novamente que o acúmulo de nitrogênio na folha indicativa do estágio de desenvolvimento da folha de milho apresentou resposta discreta para o acréscimo de magnésio na solução, ou seja, com apenas 1/3 da dose de magnésio já houve grande resposta na absorção de nitrogênio.

Figura 31. Acúmulo dos macronutrientes primários: nitrogênio (a), fósforo (b) e potássio (c) e dos macronutrientes secundários cálcio (d), magnésio (e) e enxofre (f) na folha indicativa do estádio de desenvolvimento de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de magnésio na solução nutritiva.

Na Tabela 14, está apresentado o teor de macro e micronutrientes na folha indicativa do estádio de desenvolvimento da planta de milho nos estádios V4, V6 e V8 em função das doses de magnésio na solução nutritiva.

Tabela 14. Teor de macro e micronutrientes na folha indicativa do estágio de desenvolvimento da planta de milho nos estádios V4, V6 e V8 em função das doses de magnésio na solução nutritiva.

	Mg mg.L ⁻¹	N	P	K	S	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn
		g/Kg					mg/Kg				
V4	0	28,09	5,45	25,14	1,60	2,07	0,68	4,57	162,70	96,50	44,15
	16	51,70	6,06	31,47	1,30	7,28	1,40	17,03	314,23	195,27	48,22
	32	49,25	5,56	29,97	1,43	9,13	1,75	19,30	227,65	284,35	58,11
	48	52,26	5,89	29,97	1,39	6,98	2,08	23,65	217,90	199,05	46,14
V6	0	28,48	6,72	29,72	1,60	2,24	0,69	7,43	210,70	170,25	40,08
	16	24,82	3,64	24,97	1,51	2,86	1,08	8,65	346,85	38,83	7,87
	32	27,68	2,74	24,72	1,53	2,69	1,31	8,75	273,45	34,63	7,98
	48	25,38	3,15	26,97	1,48	3,04	1,53	13,05	296,10	30,03	9,78
V8	0	18,71	6,75	28,97	1,64	2,19	0,66	7,30	213,83	130,20	22,66
	16	19,24	3,06	23,47	1,39	2,88	1,01	7,43	360,33	25,38	5,91
	32	18,73	2,51	21,72	1,60	4,43	1,30	9,03	388,95	22,03	8,33
	48	16,29	2,50	22,97	1,79	3,31	1,44	10,83	418,55	17,25	8,24

Os níveis adequados de macronutrientes para a cultura do milho são descritos por Malavolta (2006) no item anterior. Embora as plantas deste experimento não serem conduzidas até o final do seu ciclo de crescimento e, conseqüentemente, o teor exposto neste trabalho não ser no estágio de desenvolvimento adequado e nem o da folha indicada para amostragem de folhas, que, para o milho, é a abaixo e oposta à espiga no estágio de aparecimento do cabelo e a folha indicada (MALAVOLTA, 2006), os níveis podem ser utilizados para um embasamento para os resultados obtidos pelo sistema de visão artificial.

4.2.3.4. Folha velha

Em contraste com o cálcio, o magnésio é muito móvel no floema e pode ser redistribuído da folhas mais velhas para as mais novas ou para as regiões de crescimento. Desta forma, uma das conseqüências da falta de magnésio na planta é o aparecimento dos sintomas inicialmente nas folhas mais velhas (Malavolta, 2006). Na Figura 32, pode ser observado o acúmulo dos macronutrientes na folha velha de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de magnésio na solução nutritiva.

As doses de magnésio e idade da planta mostraram interação significativa ($P < 0,01$) para o acúmulo dos macronutrientes na folha velha de milho (Figura 32).

O acúmulo de macronutrientes na folha velha das plantas variou em função da idade das plantas. O aumento na idade promoveu uma resposta quadrática para as doses de magnésio estudadas (Figura 32).

Figura 32. Acúmulo dos macronutrientes primários: nitrogênio (a), fósforo (b) e potássio (c) e dos macronutrientes secundários cálcio (d), magnésio (e) e enxofre (f) na folha velha de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de magnésio na solução nutritiva.

Com comportamento semelhante à da folha indicativa do estágio de desenvolvimento de plantas, o maior acúmulo de macronutrientes na folha velha foi observado nas plantas que receberam a dose completa de magnésio e o menor acúmulo de todos os macronutrientes na

folha velha durante o ciclo de crescimento ocorreu nas plantas que não receberam magnésio na solução nutritiva, exceto para o fósforo (Figura 32).

O aumento de magnésio na solução nutritiva promoveu um aumento crescente no acúmulo de magnésio na folha velha de milho (Figura 32e), atingindo, no final do ciclo das plantas, 0,41 mg planta⁻¹, para a dose 0 de magnésio na solução; 1,0 mg planta⁻¹, para a dose 1/3; 1,8 mg planta⁻¹, para a dose 2/3 e 2,8 mg planta⁻¹, para a dose completa de magnésio na solução. Além disso, o magnésio foi o macronutriente acumulado em menor quantidade na folha velha. Neste estudo, de uma maneira geral, ocorreu aumento nos teores de magnésio nas folhas de milho, à medida que se aumentava a concentração de magnésio na solução nutritiva. Esses resultados concordam com os observados por Clark (1975) em folhas de milho e Boaro et al. (1999) no feijoeiro.

Na Tabela 15, pode ser observado o teor de macro e micronutrientes na folha velha da planta de milho nos estádios V4, V6 e V8 em função das doses de magnésio na solução nutritiva.

Os níveis adequados de macronutrientes para a cultura do milho são descritos por Malavolta (2006) no item anterior. Embora as plantas deste experimento não serem conduzidas até o final do seu ciclo de crescimento e, conseqüentemente, o teor exposto neste trabalho não ser no estágio de desenvolvimento adequado e nem o da folha indicada para amostragem de folhas, que, para o milho, é a abaixo e oposta à espiga no estágio de aparecimento do cabelo e a folha indicada (MALAVOLTA, 2006), os níveis podem ser utilizados para um embasamento para os resultados obtidos pelo sistema de visão artificial.

Tabela 15. Teor de macro e micronutrientes na folha velha da planta de milho nos estádios V4, V6 e V8 em função das doses de magnésio na solução nutritiva.

	Mg mg.L ⁻¹	N	P	K	S	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn
		g/Kg					mg/Kg				
V4	0	33,12	2,11	11,47	1,22	3,00	0,20	32,40	77,80	156,50	46,37
	16	30,88	2,43	19,47	2,35	5,10	0,30	4,30	157,00	123,30	64,52
	32	30,11	1,89	17,47	1,34	3,30	0,35	9,00	148,50	214,20	38,72
	48	30,28	1,13	11,47	2,14	10,54	0,60	10,00	112,40	193,60	36,15
V6	0	26,38	3,25	22,80	1,99	2,67	0,42	3,87	210,00	66,47	20,70
	16	24,51	2,40	29,47	2,94	4,07	0,80	4,25	226,85	87,58	20,63
	32	24,51	2,40	29,47	2,94	4,07	0,80	4,25	226,85	87,58	20,63
	48	25,45	2,66	23,97	2,63	10,68	1,19	19,58	255,40	68,55	12,83
V8	0	20,86	5,98	24,47	1,47	2,42	0,44	18,50	149,00	121,40	47,42
	16	15,68	2,27	26,22	2,59	3,68	0,56	12,88	523,23	50,43	14,69
	32	14,54	1,69	20,72	2,30	8,40	0,96	11,68	270,28	25,73	8,75
	48	16,40	1,78	21,97	2,48	6,91	1,12	9,83	286,58	15,53	7,98

4.2.4. Relação entre nutrientes

Foi observada correlação significativa ($P < 0,01$) entre cálcio e magnésio (Ca:Mg) na parte aérea e entre cálcio e magnésio nas raízes durante todo o ciclo de desenvolvimento da planta, ajustando-se a um modelo quadrático nas doses estudadas (Figura 33).

As plantas com omissão de magnésio na solução mostraram os maiores valores de relação Ca:Mg na parte aérea e na raiz, seguida em ordem decrescente da dose 1/3, posteriormente a dose 2/3 e a dose completa de magnésio na solução proporcionou a menor relação Ca:Mg na parte aérea e na raiz (Figura 33).

Figura 33. Relação entre Ca e Mg na parte aérea (a), Ca e Mg na parte aérea excluindo a dose zero de magnésio(b) e Ca e Mg na raiz (c) de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de magnésio na solução nutritiva.

Observa-se, na Figura 34, a correlação positiva (Ca+Mg)/K na parte aérea e nas raízes durante todo o ciclo de desenvolvimento da planta, ajustando-se a um modelo quadrático com o aumento da idade das plantas nas doses estudadas.

Segundo Fornasieri Filho (1992), um elemento pode influenciar a absorção de outro. Um caso de inibição competitiva é a relação K/Mg e K/Ca, em que os elementos possuem o mesmo tipo de carga, valência igual ou próxima e devem ter semelhanças quanto ao raio iônico e ao grau de hidratação (MALAVOLTA, 2006).

Nota-se que as plantas com omissão total de magnésio na solução apresentaram a maior relação (Ca+Mg)/K tanto na parte aérea e como nas raízes, assim como foi observado também nas plantas com omissão total de cálcio.

Figura 34. Relação entre Ca + Mg e K na parte aérea (a) e Ca + Mg e K na raiz (b) de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de magnésio na solução nutritiva.

O incremento das doses de potássio causa decréscimo nos teores de cálcio e magnésio que, em doses extremas, podem provocar queda da produção. A absorção preferencial de potássio é pelo fato dele ser íon monovalente com menor grau de hidratação comparado aos divalentes (Loué, 1963). De acordo com Fornasieri Filho (1992) a relação (Ca+Mg):K deve ser de 0,5:1 para a parte aérea das plantas de milho.

De acordo com Andreoti et al. (2001), a competição entre, magnésio e potássio ocorre durante o processo de absorção radicular, uma vez que utilizam os mesmos sítios de absorção. Entretanto, o efeito negativo do desbalanço de nutrientes somente é detectado a partir do florescimento da cultura do milho, através da determinação do acúmulo de nutrientes e produção de matéria seca. A correção do problema nesse estágio não surtirá mais efeito na produção de grãos. Portanto, a proporção de K em relação ao Ca e Mg deve ser definida na implantação de cultura.

4.2.5. Sistema de Visão Artificial

Para a análise feita pelo sistema de visão artificial foram utilizadas apenas as imagens das folhas das plantas de milho no estágio V4.

O experimento 1 foi rodado com todas as bases, considerando as imagens em escala de cinza (sem informação de cor). O objetivo é conhecer o nível de importância da informação de cor na classificação para as técnicas usadas de Gabor Wavelets e Dimensão Fractal Volumétrica.

Na Tabela 16, pode-se observar o Experimento 1 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica com imagens em escala de cinza.

Tabela 16. Experimento 1 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica com imagens em escala de cinza em folhas de plantas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de magnésio.

Fractal Cinza	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC Area
Pontas FD	32.00	68.0000	0.227	0.538
Bases FD	35.50	64.5000	0.215	0.641
Meio FD	32.50	67.5000	0.225	0.597
Pontas FV	36.50	63.5000	0.212	0.635
Bases FV	32.50	67.5000	0.225	0.586
Meio FV	34.50	65.5000	0.218	0.572
Pontas	31.50	68.5000	0.228	0.571
Meio	35.00	65.0000	0.217	0.569
Bases	35.25	64.7500	0.216	0.592

Verifica-se na Tabela 16, que, nas plantas de milho no estágio V4, os melhores resultados foram encontrados na base das folhas indicativas do estágio de desenvolvimento da planta de milho (FD) com 35,50% de acerto e na ponta das folhas velhas (FV) com 36,50% de acerto.

Na matriz de confusão 9, para a base da folha indicativa do estágio, a classe “a” (T1) obteve 13 imagens corretamente classificadas de 50, 16 imagens que deveriam pertencer à classe 1 foram classificadas como “b” (T2), 1 imagem que deveria pertencer à classe 1 foi classificada como “c” (T3) e 20, no final da linha, indica que 20 imagens que deveriam pertencer à classe 1 foram classificadas como “d” (T4).

Matriz de confusão 9. Matriz de confusão da base da folha indicativa do estágio de desenvolvimento do milho (à esquerda) e da ponta das folhas velhas (à direita) do experimento 1 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica com imagens em escala de cinza de plantas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de magnésio.

```

a  b  c  d  <-- classified as  a  b  c  d  <-- classified as
13 16  1 20 | a = 1          20  9  6 15 | a = 1
 1 32  4 13 | b = 2          2 33 10  5 | b = 2
 5 30  3 12 | c = 3          7 23  8 12 | c = 3
 6 19  0 25 | d = 4          11 14 15 10 | d = 4

```

Na Tabela 17, pode-se observar o Experimento 1 rodado com Gabor Wavelets com imagens em escala de cinza. Nota-se que, nas plantas de milho no estágio V4, os melhores resultados foram encontrados na ponta das folhas velhas (FV) com 46% de acerto e no terço médio das folhas indicativas do estágio de desenvolvimento do milho (FD) com 50% de acerto.

Tabela 17. Experimento 1 rodado com Gabor Wavelets com imagens em escala de cinza em folhas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de magnésio.

Gabor Cinza	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC Area
Pontas FD	38.00	62.00	0.207	0.663
Bases FD	42.00	58.00	0.193	0.705
Meio FD	50.00	50.00	0.167	0.742
Pontas FV	46.00	54.00	0.18	0.735
Bases FV	44.50	55.50	0.185	0.694
Meio FV	41.50	58.50	0.195	0.681
Pontas	40.75	59.25	0.198	0.678
Meio	38.00	62.00	0.207	0.682
Bases	40.75	59.25	0.197	0.673

Na matriz de confusão 10, do terço médio da folha indicativa do estágio de desenvolvimento do milho, a classe “a” (T1) obteve 26 imagens corretamente classificadas de 50, 17 imagens que deveriam pertencer ao T1 foram classificadas como “b” (T2), o 0 (zero) indica que não houve mistura de nenhuma imagem com a classe T3 e que 7 imagens que deveriam pertencer à classe 1 foram classificadas como “d” (T4).

Os melhores resultados obtidos, considerando as imagens de todos os tratamentos (todas as bases) em escala de cinza (sem informação de cor) para as plantas de milho no estágio V4 com níveis de deficiência induzida de magnésio, foram nas classes: terço médio das folhas indicativas do estágio de desenvolvimento do milho (Médio FD), na ponta das folhas velhas (Pontas FV) e na base das folhas indicativas do estágio de desenvolvimento do

milho (Base FD). O melhor resultado obtido foi 50% o qual indica que a informação de textura em escala de cinza não é suficiente para diferenciar os níveis de deficiência.

Matriz de confusão 10. Matriz de confusão da ponta da folha velha (à esquerda) e do terço médio das folhas indicativas do estágio de desenvolvimento do milho (à direita) do experimento 1 rodado com Gabor Wavelets com imagens em escala de cinza de plantas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de magnésio.

a	b	c	d	<-- classified as	a	b	c	d	<-- classified as
26	7	8	9	a = 1	26	17	0	7	a = 1
2	31	9	8	b = 2	7	30	8	5	b = 2
5	10	29	6	c = 3	11	24	5	10	c = 3
4	15	17	14	d = 4	6	13	0	31	d = 4

O experimento 2 foi rodado com todas as bases (todos tratamentos), considerando as imagens coloridas. O objetivo é conhecer o nível de importância da informação de cor na classificação, as técnicas usadas são Gabor Wavelets para imagens coloridas e Dimensão Fractal Volumétrica colorida.

Na Tabela 18, pode-se observar o Experimento 2 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica com imagens coloridas. Nota-se que, nas plantas de milho no estágio V4, os melhores resultados foram encontrados na base e no terço médio das folhas indicativas do estágio de desenvolvimento do milho, com 57,50% e 64% de acerto respectivamente.

Tabela 18. Experimento 2 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica com imagens coloridas em folhas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de magnésio.

Fractal Colorido	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC Area
Pontas FD	47.50	52.50	0.175	0.73
Bases FD	57.50	42.50	0.142	0.797
Meio FD	64.00	36.00	0.12	0.82
Pontas FV	44.00	56.00	0.187	0.665
Bases FV	48.50	51.50	0.172	0.755
Meio FV	48.50	51.50	0.172	0.767
Pontas	42.75	57.25	0.191	0.68
Meio	51.00	49.00	0.163	0.773
Bases	44.75	55.25	0.184	0.727

Na matriz de confusão 11, do terço médio da folha indicativa do estágio de desenvolvimento do milho, a classe “a” (T1) obteve 42 imagens corretamente classificadas de 50, 8 imagens que deveriam pertencer ao T1 foram classificadas como “b” (T2), o 0 (zero) no final da linha indica que não houve mistura de nenhuma imagem com as classes T3 e T4.

Matriz de confusão 11. Matriz de confusão da base da folha indicativa do estágio de desenvolvimento do milho (à esquerda) e do terço médio da folha indicativa (à direita) do experimento 2 rodado com

Dimensão Fractal Volumétrica com imagens coloridas em folhas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de magnésio.

```

a  b  c  d  <-- classified as  a  b  c  d  <-- classified as
42  8  0  0 | a = 1          42  8  0  0 | a = 1
 4 26  7 13 | b = 2          4 23  8 15 | b = 2
 2  3 18 27 | c = 3          2  7 29 12 | c = 3
 2  5 14 29 | d = 4          0  3 13 34 | d = 4

```

Na Tabela 19, pode ser observado o Experimento 2 rodado com Gabor Wavelets com imagens coloridas. Nota-se que, nas plantas de milho no estágio V4, os melhores resultados foram encontrados na ponta das folhas velhas (63,5% de acerto) e no terço médio das folhas indicativas do estágio de desenvolvimento do milho (57,50% de acerto).

Tabela 19. Experimento 2 rodado com Gabor Wavelets para imagens coloridas em folhas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de magnésio.

Gabor Colorido	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC Area
Pontas FD	57.00	43.0000	0.143	0.807
Bases FD	58.50	41.5000	0.138	0.81
Meio FD	66.00	34.0000	0.113	0.845
Pontas FV	63.50	36.5000	0.122	0.826
Bases FV	60.50	39.5000	0.132	0.833
Meio FV	55.50	44.5000	0.148	0.825
Pontas	57.00	43.0000	0.143	0.779
Meio	51.50	48.5000	0.162	0.789
Bases	51.25	48.7500	0.163	0.779

Pelas matrizes de confusão dos dois experimentos observa-se a taxa de acerto na classificação da classe T1 (etiqueta “a”). Os resultados indicam que a classe T1 é a mais simples de classificar. No experimento com Gabor Colorido, no terço médio da folha indicativa do estágio (Matriz de confusão 12), a classe T1 obteve 50 imagens corretamente classificadas (100% da classe), como pode ser verificado na Matriz de confusão 12.

Matriz de confusão 12. Matriz de confusão da ponta da folha velha (à esquerda) e do terço médio da folha indicativa do estágio de desenvolvimento do milho (à direita) do experimento 2 rodado com Gabor Wavelets com imagens coloridas em folhas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de magnésio.

```

a  b  c  d  <-- classified as  a  b  c  d  <-- classified as
30 13  5  2 | a = 1          50  0  0  0 | a = 1
 4 31  5 10 | b = 2          1 34 12  3 | b = 2
 1 12 22 15 | c = 3          0 12 33  5 | c = 3
 0  2  4 44 | d = 4          0 12 23 15 | d = 4

```


O melhor resultado obtido, considerando as imagens coloridas de todos os tratamentos, foi 66% o qual indica que a acrescentando a informação de cor o número de imagens corretamente classificada fica muito melhor, assim como a área da curva ROC fornecendo um modelo mais confiável.

Nos dois experimentos as bases que obtiveram os melhores resultados (porém a melhor separação interclasse) foram o terço médio das folhas indicativas do estágio de desenvolvimento do milho (Médios FD), base das folhas indicativas do estágio de desenvolvimento do milho (Bases FD) e ponta das folhas velhas (Pontas FV). Esse resultado foi semelhante ao do experimento 1. Baseado nesta afirmação pode se afirmar que a o terço médio e a base das folhas indicativas do estágio de desenvolvimento do milho e a ponta das folhas velhas fornecem informações importantes do estado nutricional da planta no estágio V4 de desenvolvimento das plantas de milho.

Os resultados ainda não são confiáveis o suficiente para obter conclusões definitivas, porém direciona a duas informações importantes: quais classes são mais simples de classificar e quais partes da folha refletem melhor a deficiência de magnésio em plantas de milho no estágio V4 de desenvolvimento para o sistema de visão artificial.

O experimento 3 foi rodado com todas as bases (todos os tratamentos), considerando as imagens coloridas. O objetivo é testar o impacto de outras técnicas de extração de características na classificação em escala de cinza e em imagens coloridas (serão mostradas apenas as melhores técnicas para cada tipo de imagens).

Na Tabela 20, está apresentado o experimento 3 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens em escala de cinza em folhas de plantas de milho no estágio V4 de desenvolvimento.

Tabela 20. Experimento 3 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens em escala de cinza em folhas de plantas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de magnésio.

Fractal Cinza AC	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC Area
Pontas FD	47.00	53.00	0.177	0.703
Bases FD	49.50	50.50	0.168	0.751
Meio FD	47.00	53.00	0.177	0.706
Pontas FV	48.00	52.00	0.173	0.711
Bases FV	42.50	57.50	0.192	0.715
Meio FV	48.00	52.00	0.173	0.723
Pontas	47.00	53.00	0.177	0.715
Meio	39.50	60.50	0.202	0.67
Bases	43.00	57.00	0.19	0.71

Nas plantas de milho no estágio V4, os melhores resultados foram encontrados na base das folhas indicativas do estágio de desenvolvimento do milho, com 49,5% de acerto, e no terço médio das folhas velhas, com 48% de acerto, conforme pode ser observado na Tabela 20. Segundo Malavolta (2006), o magnésio é mais abundante nos tecidos novos, alimentados pelo floema principalmente em vias de crescimento, existindo, portanto, uma diferença com o cálcio que tende a se acumular nos órgãos mais velhos, devido a pouca mobilidade no floema. Plantas deficientes em magnésio apresentam os sintomas de deficiência inicialmente nas folhas mais velhas. Como neste estágio de coleta de imagens (V4), a folha mais velha da planta de milho (folha 2) foi muito próxima da folha indicativa do estágio de desenvolvimento da planta (folha 4), os sintomas iniciais já haviam progredido da folha mais velha para a folha indicativa do estágio, desta forma o sistema de visão artificial identificou esta deficiência em ambas as folhas.

Na matriz de confusão 13, no terço médio da folha velha, a classe “a” (T1) obteve 39 imagens corretamente classificadas de 50, 3 imagens que deveriam pertencer ao T1 foram classificadas como “b” (T2) e “c” (T3) e 5 imagens que deveriam pertencer ao T1 foram classificadas como “d” (T4).

Matriz de confusão 13. Matriz de confusão do terço médio da folha velha (à esquerda) e da base da folha indicativa do estágio de desenvolvimento do milho (à direita) do experimento 2 rodado com Gabor Wavelets com imagens coloridas em folhas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de magnésio.

a	b	c	d	<-- classified as	a	b	c	d	<-- classified as
39	3	3	5	a = 1	32	9	4	5	a = 1
4	17	16	13	b = 2	4	26	11	9	b = 2
6	8	26	10	c = 3	5	13	20	12	c = 3
3	11	22	14	d = 4	5	8	16	21	d = 4

Na Tabela 21, está apresentado o experimento 3 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens coloridas em folhas de plantas de milho no estágio V4 de desenvolvimento.

Pode ser observado na Tabela 21 que, nas plantas de milho no estágio V4, os melhores resultados foram encontrados na base e no terço médio da folha indicativa do estágio de desenvolvimento do milho, com 67,5% e 75,5% de acerto, respectivamente.

Tabela 21. Experimento 3 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens coloridas em plantas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de magnésio.

Fractal Colorido AC	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC Area
Pontas FD	57.00	43.00	0.143	0.821
Bases FD	67.50	32.50	0.108	0.865
Meio FD	75.50	24.50	0.082	0.901
Pontas FV	46.50	53.50	0.178	0.743
Bases FV	58.50	41.50	0.138	0.81
Meio FV	55.00	45.00	0.15	0.782
Pontas	49.25	50.75	0.169	0.748
Meio	62.50	37.50	0.125	0.848
Bases	55.25	44.75	0.149	0.808

Na matriz de confusão 14, na base da folha indicativa do estágio de desenvolvimento do milho, a classe “a” (T1) obteve 49 imagens corretamente classificadas de 50, 1 imagem que deveria pertencer ao T1 foi classificada como “b” (T2), o 0 (zero) no final da linha indica que não houve mistura de nenhuma imagem com as classes T3 e T4.

Matriz de confusão 14. Matriz de confusão da base da folha indicativa do estágio de desenvolvimento do milho (à esquerda) e do terço médio da folha indicativa do estágio de desenvolvimento do milho (à direita) do experimento 3 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens coloridas em plantas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de magnésio.

a	b	c	d	<-- classified as	a	b	c	d	<-- classified as
49	1	0	0	a = 1	50	0	0	0	a = 1
1	35	5	9	b = 2	1	41	5	3	b = 2
1	12	26	11	c = 3	0	4	29	17	c = 3
0	7	18	25	d = 4	0	7	12	31	d = 4

O melhor resultado obtido foi 75.5% o qual indica que a técnica de Dimensão Fractal Volumétrica para imagens coloridas é uma das melhores técnicas que podem ser usadas neste tipo de imagens. Sendo o melhor resultado de 75.5% com a maior confiabilidade obtida nos experimentos, pode-se afirmar que a base e o meio das folhas indicativas do estágio de desenvolvimento do milho são as partes de folha que fornecem a informação mais importante na classificação, como pode ser observado na Tabela 21.

As matrizes de confusão indicam que a classe T1 continua sendo a mais fácil de classificar e a classe T3 (etiqueta “c”) a mais difícil. Quase todas as classes possuem o maior número de erros na classificação dentro da classe T3. Esse fato ocorre, já que as janelas extraídas do nível de deficiência T3 são muito similares (quase iguais) as folhas do nível T4 e T2, o classificador consegue identificar uma boa quantidade desta ainda assim. Isso ocorre uma vez que o teor de magnésio na folha indicativa do estágio das plantas no estágio V4

submetidas à dose 2/3 (T3) foi igual a $1,75 \text{ g.Kg}^{-1}$ de Mg (Tabela 14) e encontra-se muito próximo ao teor de magnésio na folha indicativa do estágio das plantas em V4 submetidas à dose 1/3 (T2) e completa (T4), que apresentam $1,40$ e $2,08 \text{ g.Kg}^{-1}$ de Mg (Tabela 14), respectivamente, isso pode ter dificultado a identificação do estado nutricional das plantas pelo sistema de visão artificial.

Os resultados deste experimento indicam que é possível obter uma boa separação de classes considerando T1 e T2 que são níveis de deficiência severos e moderados na planta. Esse fato também pode ser confirmado pelo teor de magnésio na folha indicativa do estágio das plantas no estágio V4 (Tabela 14), em que as plantas submetidas à omissão completa de magnésio na solução nutritiva (T1) apresentaram $0,68 \text{ g.Kg}^{-1}$ de Mg e as submetidas a dose 1/3 de magnésio (T2) apresentaram $1,40 \text{ g.Kg}^{-1}$ de Mg, essa diferença permitiu melhor diferenciação entre as classes pelo sistema de visão artificial.

Na Tabela 22, está apresentado o experimento 4 rodado com todas as bases, considerando as imagens coloridas. Já é conhecido que é muito importante a informação de cor para a classificação, portanto o objetivo neste momento foi testar o desempenho da classificação excluindo a classe T3 (2/3 da dose completa) que nos experimentos anteriores mostrou-se como a classe mais difícil de classificar por ser muito similar à classe T2 e T4.

Tabela 22. Experimento 4 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens coloridas considerando apenas os tratamentos T1 (dose zero), T2 (dose 1/3) e T4 (dose completa) em plantas de milho no estágio V4 e submetidas a níveis de deficiência de magnésio na solução nutritiva.

Fractal Colorido AC 3 classes (T1,T2,T4)	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC Area
Pontas FD	76.67	23.33	0.117	0.907
Bases FD	85.33	14.67	0.073	0.951
Meio FD	86.67	13.33	0.067	0.935
Pontas FV	67.33	32.67	0.163	0.806
Bases FV	70.00	30.00	0.15	0.857
Meio FV	74.00	26.00	0.13	0.886
Pontas	68.00	32.00	0.16	0.835
Meio	77.67	22.33	0.112	0.917
Bases	74.33	25.67	0.128	0.894

Pode-se notar na Tabela 22, que o melhor resultado obtido foi 86.67% mostrando a melhora considerável nos resultados quando a classe T3 foi excluída. Como já citado anteriormente, devido à proximidade do teor de magnésio na folha indicativa do estágio entre as plantas dos tratamentos T2, T3 e T4 (Tabela 14), quando a classe T3 foi retirada da base de

dados, houve distinção maior entre as classes, possibilitando ao sistema de visão artificial melhor identificação do estado nutricional das plantas.

O experimento confirma que a base e o meio da folha indicativa do estágio de desenvolvimento do milho fornecem as informações mais importantes sendo o meio da folha indicativa a mais importante. A conclusão mais importante deste experimento é que o sistema consegue identificar deficiências nutricionais severas (T1) e moderadas (T2), porém não muito leves como é o nível de deficiência T3.

Na Matriz de confusão 15, fica claro que o número de erros é muito menor.

Matriz de confusão 15. Matriz de confusão da base da folha indicativa do estágio de desenvolvimento da planta (à esquerda) e do terço médio da folha indicativa do estágio de desenvolvimento da planta (à direita) do experimento 4 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens coloridas considerando apenas os tratamentos T1 (dose zero de cálcio), T2 (dose 1/3) e T4 (dose completa) em plantas de milho no estágio V4 e submetidas a níveis de deficiência de magnésio na solução nutritiva.

a	b	c	<-- classified as	a	b	c	<-- classified as
50	0	0	a = 1	49	1	0	a = 1
1	37	12	b = 2	1	41	8	b = 2
0	9	41	c = 3	0	10	40	c = 3

O experimento 5 foi rodado com todas as bases, considerando as imagens coloridas. O experimento tem como objetivo testar a taxa de acerto entre duas classes, T1 e T4 que representam o melhor e o pior dos casos (dose zero e dose completa), como pode ser observado na Tabela 23.

Tabela 23. Experimento 5 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens em coloridas considerando apenas os tratamentos T1 (dose zero) e T4 (dose completa) em plantas de milho no estágio V4 e submetidas a níveis de deficiência de magnésio na solução nutritiva.

Fractal Colorido AC 2 classes (T1,T4)	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC Area
Pontas FD	99.00	1.00	0.0100	0.9950
Bases FD	100.00	0.00	0.0000	1.0000
Meio FD	100.00	0.00	0.0000	1.0000
Pontas FV	93.00	7.00	0.0700	0.9850
Bases FV	94.00	6.00	0.0600	0.9810
Meio FV	97.00	3.00	0.0300	0.9970
Pontas	97.00	3.00	0.0300	0.9970
Meio	99.00	1.00	0.0050	0.9980
Bases	98.50	1.50	0.0150	0.9960

Excluindo as deficiências intermediárias T2 (1/3 da dose completa) e T3 (2/3 da dose completa) o resultado foi de 100% de acerto. Foi fácil para o classificador identificar 100% das imagens de T1 e T4 (Tabela 23). Isso faz sentido quando se observa o teor de magnésio na folha indicativa do estágio na Tabela 14, onde a folha indicativa do estágio das plantas submetidas à omissão completa de magnésio na solução nutritiva apresentou $0,68 \text{ g.Kg}^{-1}$ de Mg, em contrapartida a folha indicativa do estágio das plantas com dose completa de nutrientes apresentou $2,08 \text{ g.Kg}^{-1}$ de Mg, essa diferença permitiu maior facilidade de distinção entre as classes pelo sistema de visão artificial.

Novamente os melhores resultados foram fornecidos pela base e terço médio da folha indicativa do estágio, considerando os experimentos anteriores no terço médio da folha nova e na base e ponta da folha velha são as partes onde a deficiência de magnésio mostrou-se mais facilmente identificada pelo sistema de visão artificial no estágio V4 de desenvolvimento das plantas de milho.

Matriz de confusão 16. Matriz de confusão da base da folha indicativa do estágio de desenvolvimento da planta (à esquerda) e do terço médio da folha indicativa do estágio de desenvolvimento da planta (à direita) do experimento 5 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens em coloridas considerando apenas os tratamentos T1 (dose zero) e T4 (dose completa) em plantas de milho no estágio V4 e submetidas a níveis de deficiência de magnésio na solução nutritiva.

a	b	<-- classified as	a	b	<-- classified as
50	0	a = 1	50	0	a = 1
0	50	b = 2	0	50	b = 2

Na Tabela 24, está apresentado o experimento 6 em que houve a combinação entre as folhas de plantas submetidas a níveis de cálcio e níveis de magnésio na solução nutritiva

Tabela 24. Experimento 6 rodado considerando a combinação entre folhas de plantas submetidas a níveis de cálcio e a níveis de magnésio na solução nutritiva no estágio V4.

Fractal classes (T1,T2,T3,T4) Calcio, (T1,T2,T3) Magnésio	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC Area
Meio FV Magnésio e Base FN Cálcio	75.43	24.57	0.04	0.939

Considerando a combinação entre folhas de plantas submetidas a níveis de cálcio e a níveis de magnésio na solução nutritiva no estágio V4, o melhor resultado foi obtido na combinação do terço médio da folha velha nas plantas submetidas a níveis de magnésio e na base da folha nova das plantas submetidas a níveis de deficiência de cálcio na solução nutritiva, apresentado 75,43% de acertos.

Matriz de confusão 17. Matriz de confusão considerando a combinação entre folhas de plantas submetidas a níveis de cálcio e a níveis de magnésio na solução nutritiva no estádio V4.

=== Confusion Matrix ===

```

  a  b  c  d  e  f  g  <-- classified as
44  0  0  4  0  1  1 |  a = 1
 1 42  0  0  5  0  2 |  b = 2
 0  1 39  0  8  0  2 |  c = 3
 3  0  0 39  1  7  0 |  d = 4
 1  3  7  1 25  0 13 |  e = 5
 1  0  0  5  0 44  0 |  f = 6
 0  4  7  0  8  0 31 |  g = 7

```

Onde a=T1 Calcio, b=T1 Magnesio, c=T2 Calcio, d=T2 Magnesio, e=T3 Calcio, f=T3 Magnesio, g=T4 Calcio.

Embora o sistema de visão artificial consiga identificar deficiências nutricionais severas (T1) e moderadas (T2), porém quando muito leves, como é o nível de deficiência T3 (2/3 da dose), apresenta taxa de acerto menor, com 75,5% de acertos enquanto que na exclusão do dose intermediária T3 (sintomas leves) a taxa de acertos sobe para 86,67%, ou seja, apresenta diferença de 11,17% inferior, sob o ponto de vista agrônomo e operacional da técnica, é preferível que o sistema identifique sintomas mais leves (latentes) mesmo que apresente taxa percentual de acertos menor. Desta forma, será possível corrigir deficiências do nutriente mesmo muito pequena, que nem mostrem sintomas visuais ou que estes sejam muito leves, mas que levam a decréscimos na produção e entre outros sintomas característicos da deficiência de tal nutriente.

4.3. Enxofre

4.3.1. Sintomas visuais

Durante o período de condução deste experimento, não foram observados nas folhas das plantas de milho submetidas à omissão completa ou parcial de enxofre sintomas visuais típicos de deficiência deste nutriente. Neves et al. (2005) avaliando os teores foliares de enxofre do algodoeiro herbáceo, não observaram sintomas visuais de deficiência de enxofre nas folhas durante a fase experimental.

Figura 35. Sintomas de deficiência de enxofre na parte aérea (a,c) e nas raízes (b,d) em plantas de milho submetidas a níveis crescentes de enxofre na solução nutritiva (da esquerda para a direita: dose zero, 1/3, 2/3 e dose completa de enxofre) aos 26 DAE (a,b) e aos 59 DAE (c,d).

Observou-se uma ligeira redução do tamanho das plantas em que o enxofre foi omitido completamente. Concordando com Malavolta (2006), que afirma que a deficiência de enxofre provoca inibição no crescimento das plantas, por ser um elemento que participa na

composição das proteínas. Além de reduzir a sustentação da planta, por auxiliar na síntese de enzimas, vitaminas e na proteção da planta e de reduzir o valor nutritivo das plantas devido à sua participação na formação de grãos (MALAVOLTA; MORAES et al., 2007).

4.3.2. Parâmetros de crescimento da planta

Os parâmetros de crescimento estudados podem ser observados na Figura 36 e 37 a seguir.

Figura 36. Diâmetro do colmo (a), altura da planta (b) e número total de folhas (c) em plantas de milho submetidas a níveis crescentes de concentração de enxofre na solução nutritiva e em três épocas de amostragem.

O diâmetro do colmo, a altura da planta e o número total de folhas variaram significativamente ($P < 0,01$) com o aumento nas doses de enxofre na solução nutritiva e apresentaram um comportamento ajustado ao modelo quadrático em todas as épocas estudadas, exceto para o número total de folhas na época 3, que não apresentou diferença significativa entre as doses de enxofre, entretanto essa época mostrou o maior número total de folhas.

A época 1 apresentou os menores valores de diâmetro do colmo, altura de plantas e número total de folhas (Figura 36).

Com o incremento das doses de enxofre, houve variação significativa na produção de massa seca da parte aérea ($P < 0,01$) e das raízes ($P < 0,05$) das plantas de milho somente na época 3 (estádio V8). Para as épocas 1 e 2 essa variação não foi significativa (Figura 37).

Figura 37. Produção de massa seca da parte aérea (a), massa seca das raízes (b) por planta e relação entre massa seca da parte aérea e massa seca de raízes (c) de plantas de milho submetidas a níveis crescentes de concentração de enxofre na solução nutritiva e em três épocas de amostragem.

Na época 3, a produção de massa seca da parte aérea da planta respondeu às doses de enxofre segundo um modelo linear (Figura 37a). Já a produção de massa seca da raiz ajustou-se a uma equação quadrática na época 3 (Figura 37b) e a produção máxima de massa seca da raiz foi de $19,0 \text{ g.planta}^{-1}$ e ocorreu na época 3 com o enxofre na solução nutritiva em torno de 35 mg.L^{-1} (Figura 37b).

Um sistema radicular bem desenvolvido garante boa formação e sustentação da parte aérea das plantas (BATISTA; MONTEIRO, 2004). O estado nutricional das plantas tem efeito nas propriedades de crescimento de suas raízes (ESHEL; WAISEL, 1996).

O conhecimento da produção de matéria seca de uma cultura possibilita um melhor entendimento dos fatores relacionados à nutrição mineral das plantas e consequentemente com a adubação, uma vez que a absorção de nutrientes é influenciada pela taxa de crescimento da planta (MARSCHNER, 1995).

Os menores valores de produção de massa seca da parte aérea e também de massa seca da raiz foram verificados na época 1, já os maiores valores foram observados na época 3

(Figuras 37a e 37b). Silva et al. (2009), estudando os sintomas visuais de deficiências nutricionais, verificaram que todos os tratamentos com omissão de enxofre apresentaram produção de massa seca inferiores à do tratamento completo. Monteiro et al. (1995) também constataram, no tratamento em que se omitiu o enxofre, reduções significativas na produção de massa seca e altura das plantas de *Brachiaria brizantha* Stapf. cv. Marandu, quando comparado ao tratamento completo.

A relação entre a massa seca da parte aérea e a massa seca de raízes foi significativa ($P < 0,01$) e comportou-se de forma quadrática para as 3 épocas estudadas (Figura 37c). Houve redução na relação entre massa seca da parte aérea e da raiz com o incremento de enxofre na solução para as épocas 1 e 3, entretanto na época 2 essa relação apresentou ligeiro aumento com o incremento de enxofre.

A época 1 mostrou relação entre massa seca da parte aérea e da raiz maior, seguida da época 2 e por último a época 3, a qual apresentou a menor relação. Fancelli (2010) afirma que o desenvolvimento radicular está associado com o desempenho da parte aérea, desta forma, o valor da relação parte aérea:raiz varia em função das condições do meio e do estágio fenológico da planta.

4.3.3. Acúmulo de nutrientes

4.3.3.1. Parte aérea

Os resultados apresentados nas Figuras 38 e 39 demonstram que o acúmulo dos macronutrientes e micronutrientes na parte aérea de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento foi significativamente ($P<0,01$) influenciado pela aumento da idade das plantas.

a) Nitrogênio

Embora o acúmulo de nitrogênio na parte aérea das plantas com o incremento de enxofre na solução nutritiva não tenha apresentado diferença significativa, foi observado efeito isolado para o acúmulo deste nutriente com o aumento da idade da planta, ajustando-se a uma equação quadrática para todas as doses de enxofre estudadas. Houve um incremento no acúmulo de nitrogênio na parte aérea com o aumento da idade da planta como pode ser observado na Figura 38a. Concordando com os resultados obtidos por Arnon (1975) que afirmou que as exigências de nitrogênio pelas plantas de milho variam consideravelmente com os diferentes estádios de desenvolvimento da planta, sendo mínimas nos estádios iniciais, aumentando com a elevação do crescimento da planta e alcançando o pico durante o período compreendido entre o início do florescimento e o início da formação de grãos.

O nitrogênio foi o nutriente mais acumulado na parte aérea das plantas na dose zero, dose 2/3 e dose completa e o segundo nutriente mais acumulado na parte aérea na dose 1/3, com acúmulo de até $1000 \text{ mg.planta}^{-1}$ de N no final do ciclo estudado (Figura 38a).

b) Fósforo

Foi verificado incremento significativo ($P<0,01$) e quadrático no acúmulo de fósforo na parte aérea à medida que aumentou a idade da planta em todas as doses de enxofre estudadas (Figura 38b). Malavolta (2006) relatou que a curva que descreve o crescimento em relação ao tempo (idade) é uma sigmóide típica, comumente. Por esse motivo a absorção de nutrientes é em geral maior no segmento linear da curva, quando são maiores a produção de biomassa e a velocidade de acumulação de nutrientes.

O maior acúmulo de fósforo na parte aérea foi nas plantas que receberam dose completa de enxofre na solução nutritiva (Figura 38b). Ramos et al. (2002) constataram que as doses de fósforo proporcionaram um aumento no acúmulo de enxofre na parte aérea da braquiária.

Figura 38. Acúmulo dos macronutrientes primários: nitrogênio (a), fósforo (b) e potássio (c) e dos macronutrientes secundários: cálcio (d), magnésio (e) e enxofre (f) na parte aérea de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de enxofre na solução nutritiva.

O fósforo foi o 4º nutriente mais acumulado pela parte aérea das plantas de milho nas doses zero, 1/3 e 2/3 de enxofre, sendo encontrado até 74,0; 73,5 e 77,6 mg.planta⁻¹ de P

respectivamente, e o terceiro nutriente mais acumulado pela parte aérea das plantas de milho na dose completa de enxofre, 126,8 mg.planta⁻¹ de P, no final do ciclo de desenvolvimento estudado.

c) Potássio

Houve um efeito significativo ($P < 0,01$) e quadrático no acúmulo de potássio na parte aérea com o aumento da idade das plantas (Figura 38c). O aumento na idade da planta também promoveu um incremento no acúmulo de potássio na parte aérea, conforme afirmou Malavolta (2006).

Os maiores acúmulos de potássio na parte aérea foram nas plantas com omissão total de enxofre na solução nutritiva (940 mg.planta⁻¹ de K) e na dose 1/3 de enxofre (1058 mg.planta⁻¹ de K). O menor acúmulo de potássio na parte aérea foi observado nas plantas que receberam a dose completa de enxofre na solução nutritiva, acumulando até 723,6 mg.planta⁻¹ de K (Figura 38c).

O potássio foi o segundo nutriente mais acumulado na parte aérea das plantas na dose zero, dose 2/3 (928 mg.planta⁻¹ de K) e dose completa e o primeiro nutriente mais acumulado na parte aérea na dose 1/3 de enxofre.

d) Cálcio

Na figura 38d, pode-se observar que a concentração de cálcio na parte aérea variou significativamente ($P < 0,01$) conforme modelo quadrático em função do aumento na idade das plantas. O aumento na idade da planta promoveu um acúmulo de cálcio na parte aérea, conforme afirmou Malavolta (2006).

Houve redução gradativa e significativa ($P < 0,01$) no acúmulo de cálcio na parte aérea das plantas com o incremento de enxofre na solução nutritiva, ou seja, o aumento do acúmulo de cálcio nesta parte da planta foi inversamente proporcional ao aumento do enxofre na solução nutritiva. As plantas que receberam a dose completa de enxofre na solução apresentaram o menor acúmulo de cálcio na parte aérea (127,2 mg.planta⁻¹ de Ca), seguidas das plantas que receberam 2/3 da dose completa (170,0 mg.planta⁻¹ de Ca) e posteriormente as que receberam 1/3 da dose completa (184,0 mg.planta⁻¹ de Ca). Sendo que o maior acúmulo de cálcio na parte aérea foi nas plantas com omissão de enxofre na solução nutritiva (257,2 mg.planta⁻¹ de Ca), e pode ser verificado na Figura 38d.

O cálcio foi terceiro nutriente mais absorvido pela parte aérea das plantas de milho, concordando com os resultados de Hiroce (1989), que estudando os conteúdos de nutrientes em partes da planta do milho, verificou que o cálcio foi o 3º nutriente mais acumulado na massa seca da parte aérea do milho.

e) Magnésio

O acúmulo de magnésio na parte aérea em cada dose de enxofre variou significativamente ($P < 0,01$) com a idade das plantas, sendo que com o aumento da idade houve um incremento quadrático. O aumento na idade da planta promoveu um acúmulo de magnésio na parte aérea (Figura 38e), conforme observado por Malavolta (2006).

Na Figura 38e, observa-se que as plantas que receberam a dose completa de enxofre na solução apresentaram o menor acúmulo de magnésio na parte aérea ($38,4 \text{ mg.planta}^{-1}$ de Mg). Sendo que o maior acúmulo de magnésio na parte aérea foi nas plantas com omissão de enxofre na solução nutritiva ($85,7 \text{ mg.planta}^{-1}$ de Ca).

O magnésio foi o macronutriente acumulado em menor quantidade na parte aérea das plantas de milho com dose completa de enxofre na solução nutritiva, nas plantas com as demais doses de enxofre, o magnésio foi o 5º macronutriente mais acumulado na parte aérea, atingindo $86,7 \text{ mg planta}^{-1}$, para a dose 0 de enxofre na solução; $57,8 \text{ mg planta}^{-1}$, para a dose 1/3 e $67,3 \text{ mg planta}^{-1}$, para a dose 2/3 de enxofre, no final do ciclo das plantas, apenas superando o acúmulo de enxofre na parte aérea.

f) Enxofre

Na Figura 38f, pode ser observado que com o aumento da idade das plantas, o acúmulo de enxofre na parte aérea variou significativamente ($P < 0,01$) e apresentou comportamento quadrático em cada dose de enxofre.

O aumento da idade das plantas promoveu um aumento gradativo no acúmulo de enxofre na parte aérea para as doses de enxofre estudadas, conforme observado por Malavolta (2006).

A Figura 38f, mostra que houve incremento gradativo e significativo ($P < 0,01$) no acúmulo de enxofre na parte aérea das plantas com o aumento deste nutriente na solução nutritiva. As plantas que receberam a dose completa de enxofre na solução apresentaram o maior acúmulo de enxofre na parte aérea ($67,3 \text{ mg. planta}^{-1}$), seguidas das plantas que

receberam 2/3 da dose completa (34,1 mg. planta⁻¹) e posteriormente as que receberam 1/3 da dose completa (30,8 mg. planta⁻¹). Sendo que o menor acúmulo de enxofre na parte aérea foi nas plantas que não receberam enxofre na solução (28,0 mg. planta⁻¹). Esses resultados confirmam os encontrados por Batista e Monteiro (2006), em plantas de capim-marandu, em que os valores maiores de acúmulo total de enxofre foram encontrados em condições de doses elevadas de enxofre no substrato. Ressalta-se, ainda, que valores muito baixos de acúmulo total de enxofre na planta foram observados em condições de doses baixas deste nutriente.

O enxofre foi o quinto nutriente mais acumulado na parte aérea das plantas (ou o segundo macronutriente acumulado em menor quantidade) nas plantas que receberam a dose completa de enxofre na solução e o nutriente menos acumulado na parte aérea das plantas com deficiência de enxofre na solução nutritiva (dose zero, 1/3 e 2/3 de enxofre).

Portanto, nas plantas de milho com a dose completa de enxofre na solução nutritiva, constatou-se a seguinte ordem de acúmulo de nutrientes pela parte aérea: N > K > Ca > P > S > Mg.

g) Micronutrientes

Na Figura 39, estão apresentados os micronutrientes cobre, ferro, manganês e zinco acumulados na parte aérea de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de enxofre na solução nutritiva.

Pode-se observar que o acúmulo na parte aérea da planta dos micronutrientes estudados variou significativamente ($P < 0,01$) e apresentou aumento quadrático com o incremento nos dias de crescimento (Figura 39a), conforme observado por Malavolta (2006).

As plantas que receberam a dose completa de enxofre na solução foram as que apresentaram o maior acúmulo de cobre na parte aérea (Figura 39a).

O cobre foi o nutriente menos acumulado pela parte aérea das plantas em todas as doses de enxofre estudadas, atingindo, no final do ciclo das plantas, a quantidade de 0,13; 0,10; 0,16 e 0,50 mg planta⁻¹, respectivamente, nas plantas com dose zero, 1/3, 2/3 e dose completa de enxofre.

O ferro (Figura 39b) foi o micronutriente mais acumulado na parte aérea das plantas em todos os níveis de enxofre estudados, apresentando quantidades de 8,7; 6,7; 8,8 e 13,9 mg planta⁻¹ de Fe, respectivamente para as doses 0, 1/3, 2/3 e dose completa. O maior acúmulo de ferro na parte aérea foi nas plantas que receberam dose completa de enxofre na solução nutritiva.

O manganês (Figura 39c) foi o 8º nutriente (ou o 2º micronutriente) mais acumulado pela parte aérea das plantas, atingindo a quantidade de 1,45; 1,15; 1,35 e 1,17 mg planta⁻¹, no final do ciclo das plantas. As plantas com omissão total de enxofre foram as que mostraram o maior acúmulo de manganês na parte aérea das plantas.

Figura 39. Acúmulo dos micronutrientes cobre (a), ferro (b), manganês (c) e zinco (d) na parte aérea de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de enxofre na solução nutritiva.

O zinco (Figura 39d) foi o 9º nutriente (ou o 3º micronutriente) mais acumulado pela parte aérea das plantas em todas as doses de enxofre estudadas, e não apresentou diferença significativa para as doses estudadas, atingindo a quantidade em torno de 0,68 mg planta⁻¹ de Zn no final do ciclo.

Em todas as doses de enxofre estudadas, constatou-se a seguinte ordem de acúmulo de micronutrientes na parte aérea de plantas de milho: Fe>Mn>Zn>Cu. Concordando com os resultados obtidos por Andrade (1975b) estudando a marcha de absorção dos micronutrientes cobre, ferro, manganês e zinco em plantas de milho, observou a mesma sequência de acúmulo desses micronutrientes na parte aérea do milho.

4.3.3.2. Raiz

A interação entre doses de enxofre e idade da planta foi significativa ($P < 0,01$) para o acúmulo dos macronutrientes e micronutrientes na raiz das plantas de milho (Figuras 40 e 41).

Figura 40. Acúmulo dos macronutrientes primários: nitrogênio (a), fósforo (b) e potássio (c) e dos macronutrientes secundários: cálcio (d), magnésio (e) e enxofre (f) na raiz de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de enxofre na solução nutritiva.

Foram verificados incrementos significativos ($P < 0,01$) e quadráticos no acúmulo de nitrogênio (Figura 40a), fósforo (Figura 40b), potássio (Figura 40c), cálcio (Figura 40d),

magnésio (Figura 40e) e enxofre (Figura 40f) na raiz de milho com o aumento na idade das plantas em todas as doses de enxofre estudadas, conforme observado por Malavolta (2006).

A dose completa de enxofre na solução levou ao menor acúmulo de fósforo nas raízes das plantas de milho, atingindo, no final do ciclo de crescimento, 28,2 mg. planta⁻¹ (Figura 40b).

Na Figura 40d, nota-se que o aumento das doses de enxofre na solução nutritiva proporcionaram um incremento gradativo e significativo no acúmulo de cálcio nas raízes. As plantas que receberam a dose 2/3 e a dose completa de enxofre na solução apresentaram o maior acúmulo de cálcio nas raízes (150,0 mg.planta⁻¹ de Ca), seguidas das plantas que receberam 1/3 da dose completa (135,6 mg.planta⁻¹ de Ca). E o menor acúmulo de cálcio nas raízes foi nas plantas com omissão de enxofre na solução nutritiva (105,0 mg.planta⁻¹ de Ca), no final do ciclo de crescimento das plantas.

Assim como o comportamento observado no acúmulo de nutrientes na parte aérea das plantas submetidas a doses de enxofre na solução nutritiva, o cálcio foi terceiro nutriente mais acumulado pelas raízes das plantas de milho.

Entretanto, o maior acúmulo de magnésio nas raízes foi encontrado nas plantas com omissão total de enxofre, acumulando até 106,7 mg.planta⁻¹ de Mg. Já as plantas com a dose completa de enxofre foram as que apresentaram o menor acúmulo de magnésio das raízes (37,9 mg.planta⁻¹ de Mg), ambas no final do ciclo de crescimento estudado (Figura 40e).

Houve resposta significativa ($P < 0,01$) do acúmulo de enxofre na raiz ao aumento deste nutriente na solução nutritiva. Como pode ser verificado na Figura 40f, o aumento da disponibilidade desse nutriente proporcionou maiores acúmulos de enxofre na raiz no final do ciclo de crescimento das plantas, comportamento semelhante foi observado no acúmulo de enxofre na parte aérea da planta (Figura 38f).

O maior acúmulo de enxofre nas raízes foi nas plantas que receberam a dose completa de enxofre na solução, apresentando 55,3 mg. planta⁻¹, seguidas das plantas que receberam 2/3 da dose completa (52,2 mg. planta⁻¹) e posteriormente as que receberam 1/3 da dose completa (32,0 mg. planta⁻¹). Sendo que o menor acúmulo de enxofre nas raízes foi nas plantas que não receberam enxofre na solução, apresentando 55,3 mg. planta⁻¹. Batista e Monteiro constataram que os valores maiores de acúmulo total de enxofre em plantas de capim-marandu foram encontrados em condições de doses elevadas de enxofre no substrato.

Na Figura 41, está apresentado o acúmulo dos micronutrientes: cobre, ferro, manganês e zinco na raiz de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de enxofre na solução nutritiva.

Observa-se o acréscimo significativo ($P < 0,01$) no acúmulo desses micronutrientes com o aumento da idade das plantas, apresentando um comportamento quadrático (Figura 41).

O aumento do acúmulo de manganês nas raízes das plantas foi inversamente proporcional ao incremento de enxofre na solução nutritiva (Figura 41c).

Figura 41. Acúmulo dos micronutrientes cobre (a), ferro (b), manganês (c) e zinco (d) na raiz de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de enxofre na solução nutritiva.

Pode-se observar na Tabela 25 o acúmulo de nutrientes na planta inteira (acumulado na parte aérea + acumulado na raiz) durante o período de crescimento do milho para população de 60.000 plantas.ha⁻¹ com a dose completa de nutrientes.

Tabela 25. Acúmulo de nutrientes na planta inteira durante o período de crescimento do milho para população de 60.000 plantas.ha⁻¹ com a dose completa de nutrientes.

Época	N	P	K	S	Ca	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn
	Kg/há							g/ha		
V4	11,01	0,83	7,40	0,50	1,06	0,62	0,07	5,49	23,72	20,70
V6	59,30	5,34	37,39	3,33	7,81	4,27	1,35	41,41	96,21	62,44
V8	92,17	9,30	64,36	7,35	16,66	4,58	2,15	65,04	94,48	57,11

Verifica-se que o acúmulo total de macro e micronutrientes até o estágio V4 é bem menor quando comparado aos demais estádios estudados, concordando com os resultados encontrados por Flannery (1987) em plantas de milho, que constatou que a absorção de nutrientes até o estágio V4 é praticamente inexistente, correspondendo neste estágio 1,5% do S total acumulado durante todo o ciclo do milho. De acordo com Fornasier Filho (1992) as exigências quantitativas de enxofre pela planta de milho são reduzidas perante os demais macronutrientes.

De acordo com Büll (1993), a absorção de macronutrientes, correspondente ao rendimento de 9100 Kg.ha⁻¹, pela cultura do milho no final de seu ciclo, em Kg.ha⁻¹, corresponde a: N=190; P=39; K=196; Ca=40; Mg=44 e S=21 e a absorção de micronutrientes em g.ha⁻¹ para o mesmo rendimento corresponde a: Fe=2.100; Cu=110; Mn=340 e Zn=400. Já Coelho e França (1995) afirma que para produtividade média de 9170 Kg.ha⁻¹, a extração média de nutrientes pelo milho para produção de grãos é correspondente a: N=187 Kg.ha⁻¹; P=34 Kg.ha⁻¹; K=143 Kg.ha⁻¹; Ca=30 Kg.ha⁻¹ e Mg=28 Kg.ha⁻¹.

Os três nutrientes mais acumulados pela planta+raiz de milho no experimento foram os seguintes em ordem decrescente de acúmulo: N>K>Ca, concordando com os resultados obtidos por Hiroce et al. (1989), que observaram esta ordem de acúmulo de macronutrientes.

4.3.3.3. *Folha indicativa do estágio de desenvolvimento da planta*

Na Figura 42, está apresentado o acúmulo dos macronutrientes na folha indicativa do estágio de desenvolvimento de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento em função de níveis crescentes de concentração de enxofre na solução nutritiva.

Houve interação significativa entre as doses de enxofre e idade da planta para o acúmulo dos macronutrientes na folha indicativa do estágio de desenvolvimento de plantas de milho (P<0,05 para o potássio e P<0,01 para os demais macronutrientes).

O acúmulo de macronutrientes na folha indicativa do estágio de desenvolvimento de plantas foi afetado pela idade das plantas. O aumento na idade promoveu uma relação quadrática para as doses de enxofre estudadas (Figura 42).

Na Figura 42f, observa-se o acúmulo crescente de enxofre na folha indicativa do estágio de desenvolvimento de plantas, com aumento das doses deste nutriente na solução nutritiva, acumulando até 1,22; 1,79; 1,97 e 2,92 mg. planta⁻¹ de S no final do ciclo de crescimento das plantas estudado. Bonfim-Silva e Monteiro (2010) estudando o efeito das doses de enxofre no capim braquiária, também observaram aumento de enxofre na lâmina

foliar das plantas à medida que aumentou este nutriente na solução nutritiva. Os resultados do presente estudo confirmam os encontrados por Batista e Monteiro, em plantas de capim-marandu, em que os valores maiores de acúmulo total de enxofre foram encontrados em condições de doses elevadas de enxofre no substrato.

Figura 42. Acúmulo dos macronutrientes primários: nitrogênio (a), fósforo (b) e potássio (c) e dos macronutrientes secundários: cálcio (d), magnésio (e) e enxofre (f) na folha indicativa do estádio de desenvolvimento de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de enxofre na solução nutritiva.

O teor de macro e micronutrientes na folha indicativa do estágio de desenvolvimento da planta de milho nos estádios V4, V6 e V8 em função das doses de enxofre na solução nutritiva estão apresentados na Tabela 26 a seguir.

Tabela 26. Teor de macro e micronutrientes na folha indicativa do estágio de desenvolvimento da planta de milho nos estádios V4, V6 e V8 em função das doses de enxofre na solução nutritiva.

	S	N	P	K	S	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg.L ⁻¹	g/Kg				mg/Kg					
V4	0	52,33	4,96	31,47	2,10	7,77	1,55	17,30	275,10	301,30	183,20
	23,3	55,01	5,51	34,47	2,27	6,76	1,72	12,50	245,50	276,30	227,30
	46,7	46,76	5,02	33,47	2,30	7,38	1,50	11,00	234,70	236,90	184,30
	70	39,76	4,34	35,47	2,86	7,55	1,58	12,30	269,50	240,00	180,20
V6	0	37,77	2,91	25,97	0,45	3,71	1,33	5,38	166,13	68,68	31,89
	23,3	37,68	3,50	24,22	0,93	1,79	1,01	9,65	135,58	58,78	23,48
	46,7	45,37	3,23	29,72	1,08	2,55	1,24	10,18	158,18	96,00	28,27
	70	40,52	2,79	26,22	1,16	2,18	1,00	9,98	145,60	80,75	29,98
V8	0	29,73	1,76	21,72	0,53	2,60	1,28	4,73	143,38	36,90	19,31
	23,3	27,57	1,85	21,72	0,64	2,48	1,05	2,45	131,15	31,33	14,70
	46,7	27,50	1,99	22,97	0,76	1,66	0,95	7,33	155,33	34,68	15,32
	70	25,70	2,34	23,22	1,17	0,91	0,81	4,08	188,50	19,28	12,56

Os níveis adequados de macronutrientes para a cultura do milho são descritos por Malavolta (2006) no item anterior. Embora as plantas deste experimento não serem conduzidas até o final do seu ciclo de crescimento e, conseqüentemente, o teor exposto neste trabalho não ser no estágio de desenvolvimento adequado e nem o da folha indicada para amostragem de folhas, que, para o milho, é a abaixo e oposta à espiga no estágio de aparecimento do cabelo e a folha indicada (MALAVOLTA, 2006), os níveis podem ser utilizados para um embasamento para os resultados obtidos pelo sistema de visão artificial.

4.3.3.4. Folha nova

O sulfato absorvido pela raiz é transportado preferencialmente na direção acrópeta, da base para cima. A capacidade da planta para redistribuir o enxofre na direção basípeta é muito pequena. Em caso de carência, os sintomas aparecem em primeiro lugar nos órgãos mais novos, como as folhas superiores (MALAVOLTA, 2006).

Na Figura 43, pode ser observado o acúmulo dos macronutrientes na folha nova de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de enxofre na solução nutritiva. O acúmulo de macronutrientes na folha nova variou em função da idade das plantas. O aumento na idade promoveu uma resposta quadrática para as doses de enxofre estudadas (Figura 43).

Figura 43. Acúmulo dos macronutrientes primários: nitrogênio (a), fósforo (b) e potássio (c) e dos macronutrientes secundários: cálcio (d), magnésio (e) e enxofre (f) na folha nova de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de enxofre na solução nutritiva.

As doses de enxofre e a idade da planta mostraram interação significativa ($P < 0,01$) para o acúmulo dos macronutrientes na folha nova de milho.

O menor acúmulo de todos os macronutrientes na folha nova durante o ciclo de crescimento ocorreu nas plantas que não receberam enxofre na solução nutritiva, exceto para o cálcio.

As plantas com as maiores doses de enxofre (dose completa e dose 2/3 da dose completa) mostraram os maiores acúmulos de nitrogênio (Figura 43a), fósforo (Figura 43b) e magnésio (Figura 43e) na folha nova durante todo o ciclo de crescimento das plantas de milho.

O incremento na dose de enxofre na solução nutritiva resultou em aumento do acúmulo de nitrogênio na folha nova de plantas de milho. A mais baixa dose de enxofre promoveu os menores acúmulos de nitrogênio na folha nova, enquanto altas doses de enxofre acarretavam elevados acúmulos de nitrogênio na folha nova em todo o ciclo estudado. De acordo com Andrew (1962) a deficiência de enxofre reduz a quantidade de nitrogênio convertida à forma orgânica, resultando em restrição ao crescimento da planta, por conta da proporção entre esses nutrientes nas proteínas.

Esses resultados de acúmulo de enxofre na folha nova demonstram a necessidade de cuidar do fornecimento de enxofre, quando o nitrogênio é suprido em quantidade apreciável para o milho, para que a relação entre N e S seja adequada. Isto pode ser devido ao fato de que, em condições de altas doses de enxofre, maior era a necessidade da planta pelo nitrogênio para a manutenção da relação N:S na planta (BATISTA; MONTEIRO, 2006).

O incremento nas doses de enxofre na solução proporcionou um aumento no acúmulo de potássio na folha nova das plantas de milho durante todo o ciclo de crescimento das plantas (Figura 43).

As plantas com as doses 2/3 e completa de enxofre na solução nutritiva foram as que mais acumularam enxofre na folha nova, seguidas das plantas com dose 1/3; já as que apresentaram o menor acúmulo de enxofre na folha nova foram as plantas com omissão total de enxofre na solução. Salvador et al. (1999) observaram que o acúmulo de enxofre nas folhas das plantas cultivadas em omissão desse nutriente foram reduzidos. Monteiro et al. (1995) também verificaram redução do acúmulo de enxofre nas plantas de *Brachiaria brizantha* Stapf. cv. Marandu submetidas à omissão desse nutriente.

Neste estudo, a concentração de enxofre para as plantas dos tratamentos com dose 2/3 e dose completa de enxofre na solução encontra-se dentro da faixa de concentração ideal para a cultura do milho que de acordo com Fancelli (2000) é de 1,7 a 3,0 mg.Kg⁻¹ de S.

Na Tabela 27, está apresentado o teor de macro e micronutrientes na folha nova da planta de milho nos estádios V4, V6 e V8 em função das doses de enxofre na solução nutritiva.

Tabela 27. Teor de macro e micronutrientes na folha nova da planta de milho nos estádios V4, V6 e V8 em função das doses de enxofre na solução nutritiva.

	S	N	P	K	S	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg.L ⁻¹	g/Kg				mg/Kg					
V4	0	49,74	4,74	28,72	2,96	2,28	1,24	36,72	37,91	41,12	58,22
	23,3	48,36	4,60	25,47	3,00	2,43	1,28	10,60	17,50	52,80	63,33
	46,7	46,49	4,69	28,97	3,07	1,97	1,18	16,55	48,30	33,60	59,14
	70	49,72	4,74	40,14	3,20	2,18	1,13	17,23	14,20	49,47	70,10
V6	0	30,32	3,12	26,47	2,35	2,02	1,10	51,50	63,70	20,50	34,68
	23,3	30,52	3,17	23,97	2,48	1,86	0,84	11,55	28,20	25,75	30,64
	46,7	32,60	3,76	25,80	2,51	1,54	1,05	5,53	116,23	25,87	40,03
	70	30,34	3,51	27,97	2,62	1,87	1,14	8,30	30,95	21,45	36,56
V8	0	20,16	2,40	21,80	2,12	2,78	1,17	7,57	9,83	9,23	25,83
	23,3	22,46	2,39	23,80	2,59	2,12	1,00	3,87	15,23	18,20	25,81
	46,7	21,64	2,50	22,47	2,16	3,05	1,07	4,03	21,90	16,03	27,50
	70	21,74	3,00	25,47	1,91	1,80	0,94	10,05	25,88	5,75	16,57

Os níveis adequados de macronutrientes para a cultura do milho são descritos por Malavolta (2006) no item anterior. Embora as plantas deste experimento não serem conduzidas até o final do seu ciclo de crescimento e, conseqüentemente, o teor exposto neste trabalho não ser no estágio de desenvolvimento adequado e nem o da folha indicada para amostragem de folhas, que, para o milho, é a abaixo e oposta à espiga no estágio de aparecimento do cabelo e a folha indicada (MALAVOLTA, 2006), os níveis podem ser utilizados para um embasamento para os resultados obtidos pelo sistema de visão artificial.

4.3.4. Relação entre nutrientes

A interação entre nutrientes consiste no efeito de um elemento no teor de outro com consequência no crescimento ou na produção da cultura ou qualidade. Uma relação de significado fisiológico é o quociente N/S (MALAVOLTA; MORAES et al., 2007).

O nitrogênio e o enxofre são dois nutrientes básicos para a síntese de proteínas e um suprimento inadequado desses nutrientes acarreta desequilíbrio do produto colhido e da produção (MALAVOLTA, 2006). Existe uma relação estreita entre os teores de nitrogênio e enxofre na planta que exige 1 parte de S para 15 de N para a síntese de proteínas. Geralmente, a adição de enxofre aumenta a concentração de nitrogênio também. Entretanto, o quociente N/S varia com o estágio de crescimento e com a espécie (MALAVOLTA, 2006)

A relação entre nitrogênio e enxofre (N:S) da parte aérea e da raiz correlacionou-se significativa e positivamente com o aumento da idade das plantas e comportou-se de forma quadrática para as doses estudadas (Figura 44).

Figura 44. Relação entre N e S (N:S) na parte aérea (a) e entre N e S (N:S) na raiz (b) de plantas de milho durante o seu ciclo de crescimento e em função de níveis crescentes de concentração de magnésio na solução nutritiva.

Com o incremento de enxofre na solução nutritiva, houve redução na relação N:S da raiz de plantas de milho, especialmente no final do ciclo de crescimento estudado, com destaque para a dose zero de enxofre. Esses resultados corroboram com os obtidos por Batista e Monteiro (2006), que estudando o sistema radicular do capim-Marandu considerando combinações de doses de nitrogênio e de enxofre, observaram que a deficiência de enxofre, demonstrada por apreciável número de culturas, acaba interferindo na quantidade absorvida de nitrogênio e, como consequência, pode induzir a planta a desenvolver deficiência de nitrogênio que, em muitos casos, acaba mascarando a deficiência de enxofre. Deste modo, o estudo da relação N:S tem despertado interesse crescente de pesquisadores em todo o mundo.

A relação N:S, no final do ciclo, manteve-se em torno de 6:1; 9:1; 13:1 e 26:1 na dose zero, 1/3, 2/3 e dose completa respectivamente. Monteiro et al. (1995), estudando os efeitos da omissão de macronutrientes em *Brachiaria brizantha* Stapf. cv. Marandu em solução nutritiva, verificaram que as plantas com omissão total de enxofre apresentaram a relação N:S maior (19,7 na parte aérea e 25,3 nas raízes) que no tratamento completo (14,1 na parte aérea e 9,5 nas raízes). Estudos de Stewart e Porter (1969) indicam que a máxima produção de massa seca de milho foi obtida quando a relação N/S no tecido se apresentava em torno de 11:1.

Fancelli (2010) afirma que a relação adequada de nitrogênio e enxofre para a cultura do milho corresponde a 8-10:1 e a não observância disto acarreta menor produtividade, maior incidência de doenças (raízes e colmo), além de menor valor biológico de proteínas.

4.3.5. Sistema de Visão Artificial

O experimento 1 foi rodado com todos os tratamentos (dose zero, 1/3, 2/3 e dose completa de enxofre na solução nutritiva) e com as plantas de milho no estágio V4 de desenvolvimento da cultura, considerando as imagens em escala de cinza (sem informação de cor). O objetivo é conhecer o nível de importância da informação de cor na classificação para as técnicas usadas de Gabor Wavelets e Dimensão Fractal Volumétrica.

Na Tabela 28, pode-se observar o Experimento 1 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica com imagens em escala de cinza. Em que, nas plantas de milho no estágio V4, o melhor resultado foi encontrado na base da folha nova com 63% de acerto.

Tabela 28. Experimento 1 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica com imagens em escala de cinza em folhas de plantas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de enxofre.

Fractal Cinza	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC Area
Pontas FN	55.50	44.50	0.148	0.764
Bases FN	63.00	37.00	0.123	0.815
Meio FN	60.50	39.50	0.132	0.806
Pontas FD	35.50	64.50	0.215	0.606
Bases FD	51.00	49.00	0.163	0.762
Meio FD	39.00	61.00	0.203	0.689
Pontas	37.75	62.25	0.089	0.755
Meio	47.00	53.00	0.076	0.851
Bases	54.25	45.75	0.065	0.89

Na matriz de confusão 18, a classe “a” (T1) obteve 48 imagens corretamente classificadas de 50, 1 imagem que deveria pertencer à classe 1 foi classificada como “b” (T2) e “c” (T3) e o 0 (zero) no final da linha indica que não houve mistura de nenhuma imagem com a classe T4.

Matriz de confusão 18. Matriz de confusão da base da folha nova do experimento 1 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica com imagens em escala de cinza de plantas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de enxofre.

```
=== Confusion Matrix ===
```

```

a  b  c  d  <-- classified as
48  1  1  0 | a = 1
 0 28 18  4 | b = 2
 0  9 39  2 | c = 3
10 13 16 11 | d = 4
```

Na Tabela 29, pode-se observar o Experimento 1 rodado com Gabor Wavelets com imagens em escala de cinza. Nota-se que, nas plantas de milho no estádio V4, os melhores resultados foram encontrados na base e no terço médio da folha nova, apresentando, respectivamente, 66% e 71% de acertos.

Tabela 29. Experimento 1 rodado com Gabor Wavelets com imagens em escala de cinza em folhas de milho no estádio V4 submetidas a níveis de deficiência de enxofre.

Gabor Cinza	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC Area
Pontas FN	63.50	36.50	0.12	0.85
Bases FN	66.00	34.00	0.11	0.87
Meio FN	71.00	29.00	0.10	0.87
Pontas FD	58.00	42.00	0.14	0.82
Bases FD	61.00	39.00	0.13	0.82
Meio FD	63.50	36.50	0.12	0.85
Pontas	53.75	46.25	0.07	0.87
Meio	64.50	35.50	0.05	0.91
Bases	62.00	38.00	0.05	0.92

Na matriz de confusão 19, do terço médio da folha nova, a classe “a” (T1) obteve 45 imagens corretamente classificadas de 50, 2 imagens que deveriam pertencer ao T1 foram classificadas como “b” (T2), o 0 (zero) indica que não houve mistura de nenhuma imagem com a classe T3 e que 3 imagens que deveriam pertencer à classe 1 foram classificadas como “d” (T4).

Matriz de confusão 19. Matriz de confusão do terço médio da folha nova (à esquerda) e da base das folhas novas (à direita) do experimento 1 rodado com Gabor Wavelets com imagens em escala de cinza de plantas de milho no estádio V4 submetidas a níveis de deficiência de enxofre.

=== Confusion Matrix ===

```

a  b  c  d  <-- classified as
45  2  0  3 | a = 1
 0 40  6  4 | b = 2
 1  8 40  1 | c = 3
 0 14 19 17 | d = 4

```

=== Confusion Matrix ===

```

a  b  c  d  <-- classified as
44  0  0  6 | a = 1
 0 28 17  5 | b = 2
 0 15 30  5 | c = 3
 3 10  7 30 | d = 4

```

Os melhores resultados obtidos, considerando as imagens de todos os tratamentos (todas as bases) em escala de cinza (sem informação de cor) para as plantas de milho no estádio V4 com níveis de deficiência induzida de enxofre, foram nas classes: base e terço médio da folha nova.

O experimento 2 foi rodado com todos os tratamentos (dose zero de enxofre, 1/3, 2/3 e dose completa) com as plantas de milho no estádio V4, considerando as imagens coloridas. O objetivo é conhecer o nível de importância da informação de cor na classificação, as técnicas usadas são Gabor Wavelets para imagens coloridas e Dimensão Fractal Volumétrica colorida.

Na Tabela 30, pode-se observar o Experimento 2 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica com imagens coloridas. Nota-se que, nas plantas de milho no estádio V4, os melhores resultados foram encontrados na base e no terço médio da folha nova, com 60,50% e 63% de acerto respectivamente.

Tabela 30. Experimento 2 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica com imagens coloridas em folhas de milho no estádio V4 submetidas a níveis de deficiência de enxofre.

Fractal Colorido	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC Area
Pontas FN	56.00	44.00	0.15	0.78
Bases FN	60.50	39.50	0.13	0.82
Meio FN	63.00	37.00	0.12	0.82
Pontas FD	49.00	51.00	0.17	0.75
Bases FD	59.50	40.50	0.14	0.82
Meio FD	52.00	48.00	0.16	0.77
Pontas	38.75	61.25	0.09	0.79
Meio	51.00	49.00	0.07	0.85
Bases	56.75	43.25	0.06	0.88

Na matriz de confusão 20, do terço médio da folha nova, a classe “a” (T1) obteve 48 imagens corretamente classificadas de 50, 2 imagens que deveriam pertencer ao T1 foram classificadas como “d” (T4) e o 0 (zero) indica que não houve mistura de nenhuma imagem com as classes T2 e T3.

Matriz de confusão 20. Matriz de confusão da base da folha nova (à esquerda) e do terço médio da folha nova (à direita) do experimento 2 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica com imagens coloridas em folhas de milho no estádio V4 submetidas a níveis de deficiência de enxofre.

=== Confusion Matrix ===

=== Confusion Matrix ===

a	b	c	d	<-- classified as	a	b	c	d	<-- classified as
45	2	2	1	a = 1	48	0	0	2	a = 1
0	20	19	11	b = 2	0	26	18	6	b = 2
3	3	44	0	c = 3	0	34	11	5	c = 3
3	14	16	17	d = 4	2	10	4	34	d = 4

Na Tabela 31, pode ser observado o experimento 2 rodado com Gabor Wavelets com imagens coloridas. Nota-se que, nas plantas de milho no estádio V4, os melhores resultados

foram encontrados na base da folha nova (78% de acerto) e no terço médio da folha indicativa do estádio de desenvolvimento do milho (76,50% de acerto).

Tabela 31. Experimento 2 rodado com Gabor Wavelets para imagens coloridas em folhas de milho no estádio V4 submetidas a níveis de deficiência de enxofre.

Gabor Colorido	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC Area
Pontas FN	71.50	28.50	0.10	0.90
Bases FN	78.00	22.00	0.07	0.93
Meio FN	74.00	26.00	0.09	0.92
Pontas FD	66.50	33.50	0.11	0.88
Bases FD	68.00	32.00	0.11	0.87
Meio FD	76.50	23.50	0.08	0.92
Pontas	61.50	38.50	0.06	0.92
Meio	71.50	28.50	0.04	0.94
Bases	72.25	27.75	0.04	0.95

O melhor resultado obtido, considerando as imagens coloridas de todos os tratamentos, foi 78% (Tabela 31), o qual indica que a acrescentando a informação de cor o número de imagens corretamente classificadas fica muito melhor, assim como a área da curva ROC fornecendo um modelo mais confiável.

Outro dado importante obtido pelas matrizes de confusão dos dois experimentos é a taxa de acerto na classificação da classe T1 (etiqueta “a”). Os resultados indicam que a classe T1 é a mais simples de classificar. No experimento com Gabor Colorido a classe T1 obteve 50 imagens corretamente classificadas (100% da classe), como pode ser observado na Matriz de confusão 21.

Matriz de confusão 21. Matriz de confusão do terço médio da folha indicativa do estádio de desenvolvimento do milho (à esquerda) e da base da folha nova (à direita) do experimento 2 rodado com Gabor Wavelets com imagens coloridas em folhas de milho no estádio V4 submetidas a níveis de deficiência de enxofre.

=== Confusion Matrix ===

```

a  b  c  d  <-- classified as
45  0  3  2 | a = 1
 0 33  9  8 | b = 2
 0 15 35  0 | c = 3
 0  7  0 43 | d = 4
```

=== Confusion Matrix ===

```

a  b  c  d  <-- classified as
50  0  0  0 | a = 1
 0 34 10  6 | b = 2
 0 11 34  5 | c = 3
 1  6  8 35 | d = 4
```

Os resultados direcionam a duas informações importantes: quais classes são mais simples de classificar e quais partes da folha refletem melhor a deficiência de enxofre em plantas de milho no estádio V4 de desenvolvimento para o sistema de visão artificial.

O experimento 3 foi rodado com todas as bases (todos os tratamentos) em plantas de milho no estádio V4 submetidas a níveis de enxofre na solução nutritiva, considerando as imagens coloridas. O objetivo é testar o impacto de outras técnicas de extração de características na classificação em escala de cinza e em imagens coloridas (serão mostradas apenas as melhores técnicas para cada tipo de imagens).

Na Tabela 32, está apresentado o experimento 3 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens em escala de cinza em folhas de plantas de milho no estádio V4 de desenvolvimento.

Tabela 32. Experimento 3 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens em escala de cinza em folhas de plantas de milho no estádio V4 submetidas a níveis de deficiência de enxofre.

Fractal Cinza AC	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC Area
Pontas FN	71.00	29.00	0.10	0.89
Bases FN	75.00	25.00	0.08	0.90
Meio FN	69.00	31.00	0.10	0.85
Pontas FD	66.50	33.50	0.11	0.84
Bases FD	61.00	39.00	0.13	0.80
Meio FD	65.50	34.50	0.12	0.85
Pontas	57.50	42.50	0.06	0.88
Meio	62.50	37.50	0.05	0.90
Bases	66.25	33.75	0.05	0.92

Na Tabela 32, pode ser observado que, nas plantas de milho no estádio V4, os melhores resultados foram encontrados na base da folha nova, apresentando 75% de acertos, e na ponta da folha nova, com 71% de acerto.

Na matriz de confusão 22, base da folha nova, a classe “a” (T1) obteve 100% das imagens em T1 classificadas corretamente; para a classe “b” (T2) 26 imagens corretamente classificadas de 50, 7 imagens que deveriam pertencer ao T2 foram classificadas como “c” (T3) e que 17 imagens que deveriam pertencer à classe 2 foram classificadas como “d” (T4).

Matriz de confusão 22. Matriz de confusão ponta da folha nova (à esquerda) e da base da folha nova (à direita) do experimento 2 rodado com Gabor Wavelets com imagens coloridas em folhas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de enxofre.

```

=== Confusion Matrix ===
      a  b  c  d  <-- classified as
48  1  0  1 | a = 1
 2 33 11  4 | b = 2
 3 12 29  6 | c = 3
 0  6  4 40 | d = 4

=== Confusion Matrix ===
      a  b  c  d  <-- classified as
50  0  0  0 | a = 1
 0 26  7 17 | b = 2
 0  9 27 14 | c = 3
 0 15  7 28 | d = 4

```

Na Tabela 33, está apresentado o experimento 3 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens coloridas em folhas de plantas de milho no estágio V4 de desenvolvimento submetidas a níveis de deficiência de enxofre.

Tabela 33. Experimento 3 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens coloridas em plantas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de enxofre.

Fractal Colorido AC	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC Area
Pontas FN	66.50	33.50	0.112	0.84
Bases FN	75.50	24.50	0.082	0.915
Meio FN	73.00	27.00	0.09	0.9
Pontas FD	60.50	39.50	0.132	0.825
Bases FD	65.00	35.00	0.117	0.856
Meio FD	64.00	36.00	0.12	0.832
Pontas	60.00	40.00	0.057	0.866
Meio	64.00	36.00	0.051	0.908
Bases	67.25	32.75	0.047	0.931

Pode ser observado na Tabela 33 que os melhores resultados foram encontrados na base e no terço médio da folha nova, com 75,50% e 73% de acerto, respectivamente.

A matriz de confusão 23 indica que a classe T1 continua sendo a mais fácil de classificar e a classe T3 (etiqueta “c”) a mais difícil. Quase todas as classes possuem o maior número de erros na classificação dentro da classe T3. Esse fato ocorre, já que as janelas extraídas do nível de deficiência T3 são muito similares (quase iguais) as folhas do nível T4 e T2, o classificador consegue identificar uma boa quantidade desta ainda assim. Como o teor de enxofre na folha nova das plantas no estágio V4 submetidas à dose 2/3 (T3) é igual a 3,07 g.Kg⁻¹ de S (Tabela 27) e encontra-se muito próximo ao teor de enxofre na folha nova das plantas em V4 submetidas à dose 1/3 (T2) e completa (T4), que apresentam 3,0 e 3,2 g.Kg⁻¹ de S (Tabela 27), respectivamente, isso pode ter dificultado a identificação do estado nutricional das plantas pelo sistema de visão artificial.

Matriz de confusão 23. Matriz de confusão da base das folhas novas (à esquerda) e da ponta das folhas novas (à direita) do experimento 3 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens coloridas em plantas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de enxofre.

=== Confusion Matrix ===

	a	b	c	d	<-- classified as
46	1	1	2		a = 1
1	36	10	3		b = 2
1	10	39	0		c = 3
2	11	7	30		d = 4

=== Confusion Matrix ===

	a	b	c	d	<-- classified as
42	0	3	5		a = 1
0	37	8	5		b = 2
1	8	34	7		c = 3
3	8	6	33		d = 4

O melhor resultado obtido foi 78% (Tabela 31), o qual indica que a técnica de Gabor Wavelets para imagens coloridas foi uma das melhores técnicas que podem ser usadas neste tipo de imagens. Sendo o melhor resultado de 78% com a maior confiabilidade obtida nos experimentos, pode-se afirmar que a base da folha nova é a parte da folha de milho no estágio V4 que fornece a informação mais importante na identificação do estado nutricional de plantas de milho submetidas a deficiência de enxofre, como pode ser observado na Tabela 31. De acordo com Malavolta e Moraes (2007), 0 enxofre caminha da raiz para a parte aérea no xilema, na corrente transpiratória, sendo classificado como um elemento pouco móvel no floema. Assim, em caso de carência de enxofre na planta, os sintomas aparecem em primeiro lugar nos órgãos mais novos, como as folhas superiores (MALAVOLTA, 2006).

Os resultados deste experimento indicam que é possível obter uma boa separação de classes considerando T1 e T2 que são níveis de deficiência severos e moderados na planta.

Na Tabela 34, está apresentado o experimento 4 rodado os tratamentos T1, T2 e T4, considerando as imagens coloridas. Já é conhecido que é muito importante a informação de cor para a classificação, portanto o objetivo neste momento foi testar o desempenho da classificação excluindo a classe T3 (2/3 da dose completa) que nos experimentos anteriores mostrou-se como a classe mais difícil de classificar por ser muito similar à classe T2 e T4.

Pode-se notar na Tabela 34, que o melhor resultado obtido foi 82% mostrando a melhora considerável nos resultados quando a classe T3 foi excluída. Como já citado anteriormente, devido à grande proximidade do teor de enxofre na folha nova entre as plantas dos tratamentos T2, T3 e T4 (Tabela 27), quando a classe T3 foi retirada da base de dados, houve distinção maior entre as classes, possibilitando ao sistema de visão artificial melhor identificação do estado nutricional das plantas.

Tabela 34. Experimento 4 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens coloridas considerando apenas os tratamentos T1 (dose zero), T2 (dose 1/3) e T4 (dose completa) em plantas de milho no estágio V4 e submetidas a níveis de deficiência de enxofre.

Fractal Colorido AC 3 classes (T1,T2,T4)	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC	Area
Pontas FN	76.67	23.33	0.117	0.883	
Bases FN	82.00	18.00	0.09	0.894	
Meio FN	78.67	21.33	0.107	0.885	
Pontas FD	78.67	21.33	0.107	0.893	
Bases FD	82.67	17.33	0.087	0.931	
Meio FD	70.67	29.33	0.147	0.856	
Pontas	73.33	26.67	0.053	0.927	
Meio	72.67	27.33	0.055	0.922	
Bases	80.33	19.67	0.039	0.956	

O experimento confirma que o terço médio e, sobretudo, a base da folha nova fornecem as informações mais importantes para a identificação do estado nutricional de plantas de milho no estágio V4 submetidas a deficiência de enxofre. O sistema consegue identificar deficiências nutricionais severas (T1) e moderadas (T2), porém não muito leves como é o nível de deficiência T3.

Nas matrizes de confusão fica claro que o número de erros é muito menor.

Matriz de confusão 24. Matriz de confusão da base das folhas novas (à esquerda) e da ponta das folhas novas (à direita) do experimento 4 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens coloridas considerando apenas os tratamentos T1 (dose zero de cálcio), T2 (dose 1/3) e T4 (dose completa) em plantas de milho no estágio V4 e submetidas a níveis de deficiência de enxofre na solução nutritiva.

```

=== Confusion Matrix ===          === Confusion Matrix ===

  a  b  c  <-- classified as    a  b  c  <-- classified as
45  4  1 | a = 1                43  1  6 | a = 1
 3 42  5 | b = 2                0 38 12 | b = 2
 3 11 36 | c = 3                3 10 37 | c = 3

```

O experimento 5 apresentado na Tabela 35 teve como objetivo testar a taxa de acerto entre duas classes, T1 e T4 que representam o melhor e o pior dos casos (dose zero e dose completa).

Excluindo as deficiências intermediárias T2 (1/3 da dose completa) e T3 (2/3 da dose completa) o resultado foi de 95% de acerto na ponta da folha nova e 97% de acerto na base da folha indicativa do estágio de desenvolvimento da planta de milho.

Tabela 35. Experimento 5 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens em coloridas considerando apenas os tratamentos T1 (dose zero) e T4 (dose completa) em plantas de milho no estágio V4 e submetidas a níveis de deficiência de enxofre.

Fractal Colorido AC 2 classes (T1,T4)	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC	Area
Pontas FN	95.00	5.00	0.0500	0.9150	
Bases FN	94.00	6.00	0.0600	0.9740	
Meio FN	92.00	8.00	0.0800	0.9160	
Pontas FD	87.00	13.00	0.1300	0.9330	
Bases FD	97.00	3.00	0.0300	0.9650	
Meio FD	84.00	16.00	0.1600	0.8650	
Pontas	87.50	12.50	0.0420	0.9630	
Meio	85.50	14.50	0.0480	0.9640	
Bases	89.00	11.00	0.0370	0.9660	

Esse resultado faz sentido quando se observa o teor de enxofre da folha nova na Tabela 27, onde a folha nova das plantas submetidas à omissão completa de enxofre na solução nutritiva apresentou 2,96 g.Kg⁻¹ de S, em contrapartida a folha nova das plantas com dose completa de nutrientes apresentou 3,20 g.Kg⁻¹ de S, essa diferença, embora pequena, permitiu maior facilidade de distinção entre as classes pelo sistema de visão artificial.

Matriz de confusão 25. Matriz de confusão da base das folhas novas (à esquerda) e da ponta das folhas novas (à direita) do experimento 5 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica usando análise canônica com imagens em coloridas considerando apenas os tratamentos T1 (dose zero) e T4 (dose completa) em plantas de milho no estágio V4 e submetidas a níveis de deficiência de enxofre na solução nutritiva.

```

=== Confusion Matrix ===
a  b  <-- classified as
45  5 | a = 1
0 50 | b = 2

=== Confusion Matrix ===
a  b  <-- classified as
48  2 | a = 1
1 49 | b = 2

```

Na Tabela 36, está apresentado o experimento 6 rodado com Dimensão Fractal Volumétrica para imagens colorida na combinação entre as folhas de plantas submetidas a níveis de cálcio, de magnésio e de enxofre na solução nutritiva.

Tabela 36. Experimento 6 rodado considerando a combinação entre folhas de plantas de milho submetidas a níveis de cálcio, de magnésio e de enxofre na solução nutritiva no estágio V4.

Fractal Colorido 7 classes (T1,T2,T3,T4) Cálcio; (T1,T2,T3) Magnésio e (T1,T2,T3) Enxofre	Correctly Classified Instances	Incorrectly Classified Instances	False Positive Rate	ROC Area
Meio FD Magnésio Base FN Cálcio Bases FN Enxofre	77.40	22.60	0.03	0.967

O melhor resultado obtido na combinação entre as folhas de plantas submetidas a níveis de cálcio, de magnésio e de enxofre foi de 77,40% de acertos.

Matriz de confusão 26. Matriz de confusão considerando a combinação entre folhas de plantas submetidas a níveis de cálcio e a níveis de enxofre na solução nutritiva no estágio V4.

=== Confusion Matrix ===

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j		<-- classified as
48	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0		a = 1
0	43	2	0	3	0	1	1	0	0	0		b = 2
0	2	48	0	0	0	0	0	0	0	0		c = 3
0	0	0	41	0	0	7	2	0	0	0		d = 4
0	2	4	0	36	0	0	8	0	0	0		e = 5
2	0	1	0	0	31	0	1	10	5	0		f = 6
2	2	1	5	0	0	40	0	0	0	0		g = 7
0	2	0	1	9	0	0	38	0	0	0		h = 8
1	0	0	0	0	5	0	0	31	13	0		i = 9
0	0	0	0	0	12	0	0	7	31	0		j = 10

Onde a=T1 Calcio, b=T1 Enxofre, c=T1 Magnésio d=T2 Calcio, e=T2 Enxofre, f=T2 Magnésio, g=T3 Calcio, h=T3 Enxofre, i=T3Magnésio, j=T4 Magnésio

Embora o sistema de visão artificial consiga identificar deficiências nutricionais severas (T1) e moderadas (T2), porém quando muito leves, como é o nível de deficiência T3 (2/3 da dose), apresenta taxa de acerto menor, com 78% de acertos, enquanto que na exclusão do dose intermediária T3 (sintomas leves) a taxa de acertos sobe para 82%, ou seja, apresenta diferença de 4% inferior, sob o ponto de vista agrônomo e operacional da técnica, é preferível que o sistema identifique sintomas mais leves (latentes) mesmo que apresente taxa percentual de acertos menor. Desta forma, será possível corrigir deficiências do nutriente mesmo muito pequena, que nem mostrem sintomas visuais ou que estes sejam muito leves, mas que levam a decréscimos na produção e entre outros sintomas característicos da deficiência de tal nutriente.

5. CONCLUSÕES

5.1. Cálcio

- O aumento da concentração de cálcio na solução nutritiva implica em níveis crescentes do teor deste nutriente nas diversas partes estudadas da planta e, conseqüentemente, gera sintomas visuais específicos para cada nível em todos os estádios de desenvolvimento estudados (V4, V6 e V8).
- O aumento do nível de cálcio na solução nutritiva promove teores crescentes deste nutriente nas partes estudadas, levando ao incremento no acúmulo de cálcio nas plantas nos estádios de desenvolvimento estudados (V4, V6 e V8).
- A omissão de cálcio na solução nutritiva promove sintomas típicos de deficiência deste nutriente em plantas de milho.
- A deficiência de cálcio nas plantas de milho reduz o diâmetro do colmo da planta, altura da planta, número de folhas desenvolvidas, número total de folhas, massa seca da parte aérea e da raiz.
- Há acúmulo de nutrientes nas plantas de milho, com o aumento da idade das plantas.
- O sistema de visão artificial identifica as imagens das folhas de plantas de milho no estágio V4 submetidas à omissão completa de cálcio e à dose completa com 100% de acerto.
- O melhor resultado obtido na identificação do estado nutricional de plantas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de cálcio na solução nutritiva é de 80% o qual indica que a técnica de Gabor Wavelets para imagens coloridas é uma das melhores técnicas que podem ser usadas neste tipo de imagens.
- Há melhora considerável nos resultados quando exclui o tratamento T3 (2/3 da dose completa), com 88.67% de acertos no estágio V4, entretanto, sob o ponto de vista agrônomo e operacional, é preferível considerar todos os níveis de deficiência.
- O terço médio da folha nova fornece as informações mais importantes para a identificação do estado nutricional de plantas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de cálcio na solução nutritiva.

5.2. Magnésio

- O aumento da concentração de magnésio na solução nutritiva implica em níveis crescentes do teor deste nutriente nas diversas partes estudadas da planta e, conseqüentemente, gera sintomas visuais específicos para cada nível em todos os estádios de desenvolvimento estudados (V4, V6 e V8).
- O aumento do nível de magnésio na solução nutritiva promove teores crescentes deste nutriente nas partes estudadas, levando ao incremento no acúmulo de magnésio nas plantas nos estádios de desenvolvimento estudados (V4, V6 e V8).
- A omissão de magnésio na solução nutritiva promove sintomas típicos de deficiência deste nutriente em plantas de milho.
- A deficiência de magnésio nas plantas de milho reduz o diâmetro do colmo da planta, altura da planta, número total de folhas, massa seca da parte aérea e da raiz.
- O acúmulo de nutrientes nas plantas de milho aumenta com o aumento da idade das plantas.
- O sistema de visão artificial identifica as imagens das folhas de plantas de milho no estágio V4 submetidas à omissão completa de magnésio e à dose completa com 100% de acerto.
- O melhor resultado obtido na identificação do estado nutricional de plantas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de magnésio na solução nutritiva é de 75,5% de acerto, através da técnica de Dimensão Fractal Volumétrica para imagens coloridas, portanto é uma das melhores técnicas usadas neste tipo de identificação de imagens.
- Há melhora no resultado quando exclui o tratamento T3 (2/3 da dose completa), com 86.67% de acerto, entretanto, sob o ponto de vista agrônômico e operacional, é preferível considerar todos os níveis de deficiência.
- O terço médio da folha diagnóstica fornece melhores informações para a identificação do estado nutricional de plantas de milho no estágio V4 submetidas a níveis de deficiência de magnésio.

5.3. Enxofre

- Não foram observados sintomas visuais de deficiência de enxofre nas folhas das plantas de milho durante a fase experimental.
- O acúmulo de nutrientes nas plantas de milho aumenta com o aumento da idade das plantas.
- O aumento de níveis de enxofre na solução nutritiva promove incremento no acúmulo deste nutriente nas plantas de milho.
- O sistema de visão artificial identifica as imagens das folhas de plantas de milho no estágio V4 submetidas à omissão completa de enxofre e à dose completa com 97% de acerto.
- O melhor resultado obtido foi 78%, o qual indica que a técnica de Gabor Wavelets para imagens coloridas é uma das melhores técnicas que podem ser usadas neste tipo de imagens.
- Há melhora considerável nos resultados quando exclui o tratamento T3 (2/3 da dose completa), com 82% de acertos, entretanto, sob o ponto de vista agrônomo e operacional, é preferível considerar todos os níveis de deficiência.
- A base da folha nova fornecem as informações mais importantes para a identificação do estado nutricional de plantas de milho no estágio V4 submetidas a deficiência de enxofre.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, C.G.D; PINHO, R.G.V.; BORGES, I.D. Avaliação de características agronômicas e de produção de forragem e grãos de milho em diferentes densidades de semeadura e espaçamentos entre linhas. **Ciência e Agrotecnologia**. Lavras, v.30, n.3, p.402-408, 2006.
- AMARAL FILHO, J.P.R. et al. Espaçamento, densidade populacional e adubação nitrogenada na cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.29, n.3, p.467-473, 2005.
- ANDRADE, A.G.; HAAG, H.P.; OLIVEIRA, G.D. Acumulação diferencial de nutrientes por cinco cultivares de milho (*Zea mays* L.). I. Acumulação de macronutrientes, 32, 1975, Piracicaba. **Anais da Escola Superior "Luiz de Queiroz"**. Piracicaba, 1975a, p.115-149.
- ANDRADE, A.G.; HAAG, H.P.; OLIVEIRA, G.D. Acumulação diferencial de nutrientes por cinco cultivares de milho (*Zea mays* L.). II. Acumulação de micronutrientes, 32, 1975, Piracicaba. **Anais da Escola Superior "Luiz de Queiroz"**. Piracicaba, 1975b, p.150-172.
- ANDREOTTI, M. et al. Crescimento do milho em função da saturação por bases e da adubação potássica. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.58, n.1, p.145-150, 2001.
- ANDREW, C.S. Influence of nutrition on nitrogen fixation and growth of legumes. In: COMMONWEALTH SCIENTIFIC INDUSTRIAL RESEARCH ORGANIZATION. 1962, Melbourne. **A review of nitrogen in the tropics with particular reference to pasture**. A symposium. Melbourne: Farnham Royal, CSIRO, 1962. p.130-146.
- ARAÚJO, F. F. et al. Desenvolvimento do milho e fertilidade do solo após aplicação de lodo de curtume e fosforita. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.12, n.5, p.507-511, 2008.
- ARGENTA, G. et al. Parâmetros de planta como indicadores do nível de nitrogênio na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.37, n.4, p.519-527, 2002.
- ARNON, I. **Mineral nutrition of maize**. Bern: International PotashInstitute, 1975. 452p.
- ASSAD, E. D. et al. 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.
- BAESSO, M. M. et al. Determinação do "status" nutricional de nitrogênio no feijoeiro utilizando imagens digitais coloridas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.2, p.520-528, 2007.
- BAHIA FILHO, A.F.C.; VASCONCELOS, C.A.; SANTOS, H.L.; FRANÇA, G.E.; PITTA, G.V. **Nutrição e adubação do milho**. Sete Lagoas: CNPMS/EMBRAPA, 1983. 44p. (Documentos, 3).
- 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. et al. **Método de análises química de plantas**. Campinas: Instituto Agrônômico, 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 na produção do milho (*Zea mays* L.). **Agropecuária Técnica**, Areia, v.2, n.1, p.31-39, 1981.

BATISTA, K.; MONTEIRO, F.A. Sistema radicular do capim-Marandu, considerando as combinações de doses de nitrogênio e de enxofre. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.5, p. 821-828, 2006.

BACKES, A. R.; BRUNO, O. M. Segmentação de Texturas por Análise de Complexidade. **INFOCOMP**, v.5, n.1, p.87-95, 2006.

BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability a mechanistic approach**. New York: John Wiley & Sons, 1984, 398p.

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

BRADFIELD, E.G.; GUTTRIDGE, C.G. Effects of night-time humidity and nutrient solution concentration on the calcium content of tomato fruit. **Scientia Horticulturae**, v.22, p.207-217, 1984.

BOARO, C.S.F. et al. Níveis de magnésio em solução nutritiva e o desenvolvimento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L. cv Carioca): Avaliação de parâmetros biométricos. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.53, n.2-3, p. 254-260, 1996.

BOARO, C.S.F. et al. Interações entre magnésio e micronutrientes metálicos durante o desenvolvimento de feijoeiro, em solução nutritiva. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.56, n.1, p.125-134, 1999.

BRUNO, O. M. **Paralelismo em Visão Natural e Artificial**. 2000. Tese (Doutorado) – Instituto de Física de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

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

CAIRES, E.F.; FELDHAUS, I.C.; BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da cevada em função da calagem e aplicação de gesso. **Bragantia**, Campinas, v.60, n.3, p.213-223, 2001.

CARMELLO, Q.A.C. **Saturação por bases e relações entre K, Ca e Mg do solo na nutrição potássica do milho (*Zea mays* L.) cv. Piranão**. 1989. 103f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

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.

CLARK, R.B. Differential magnesium efficiency in corn inbreds: I. Dry matter yield and mineral element composition. **Soil Science of Society American Proceedings**, v.39, p.488-491, 1975.

COELHO, A. M.; ALVES, V. M. C. Adubação fosfatada na cultura do milho. In: SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Potafos/Anda, 2003. 31p. CD-ROM.

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

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos, quarto levantamento, janeiro 2010**. Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília: Conab, 2010. 39p. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/3graos>>. Acesso em 9 jan. 2011.

DANTAS, J.P.; BERGAMIN FILHO, H.; MALAVOLTA, E. Estudos sobre a nutrição mineral do feijão macassar (*Vigna sinensis* (L.) ENDL.): II. Efeitos das carências de macronutrientes no crescimento, produção e composição mineral. **Anais da ESALQ**, v.36, p.247-257, 1979.

DEON, M.D. **Crescimento e nutrição mineral da soja submetida a excesso de P, S, K, Ca e Mg em solução nutritiva**. 2007. 71f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2007.

DIAS, T. J. et al. Composição foliar de macronutrientes em maracujazeiro-amarelo e fertilidade do solo em função do número de ramos laterais por planta. **Anais do Curso de Pós-graduação em Manejo de Solo e Água**, Areia, v.26, p.81-97, 2004.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Cultivo do milho: Economia da Produção**. Emprapa milho e sorgo. Disponível em: http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho_2ed/economia.htm. Acesso em 4 jan 2011.

EPISTEIN, E. **Nutrição mineral das plantas: princípios e perspectivas**. Tradução e notas de Eurípedes Malavolta. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. e Editora da Universidade de São Paulo, 1975. 341p.

EPISTEIN, E; BLOOM, A.J. **Nutrição mineral das plantas: princípios e perspectivas**. 2.ed. Tradução de Maria Edna Tenório Nunes. Londrina: Editora Planta, 2006. 403p.

ESHEL, A.; WAISEL, Y. Multifunction and multifunction of various constituents of one root system. In: WAISEL, Y., ESHEL, A. & KAFKAFI, U. (Ed.). **Plant roots: the hidden half**. 2.ed. New York: Marcel Dekker, 1996. p.175-192.

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

FANCELLI, A.L. **Nutrição e adubação do milho**. Piracicaba: Departamento de Agricultura/ESALQ/USP, 2000. 43p.

FANCELLI, A.L. Milho. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S.R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2010. p.39-93.

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

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

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

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

GUIMARÃES, T.G. et al. Teores de clorofila determinados por medidor portátil e sua relação com formas de nitrogênio em folhas de tomateiro cultivados em dois tipos de solo. **Bragantia**. Campinas, v.58, n.01, p.209-216, 1999.

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

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.

GRANGEIRO, L.C. et al. Acúmulo de nutrientes por três cultivares de alface cultivadas em condições do Semi-Árido. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.24, n.2, p. 190-194, 2006.

HERNANDEZ, R.J.M.; SILVEIRA, R.I. *Efeitos da saturação por bases, relações Ca:Mg no solo e níveis de fósforo sobre a produção de material seco e nutrição mineral do milho (Zea mays L.)*. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, n. 1, p.79-85, 1998.

HEINRICHS, R. et al. Atributos químicos do solo e produção do feijoeiro com a aplicação de calcário e manganês. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.32, n.3, p.1157-1164, 2008.

HELL, R. Molecular physiology of plant sulfur metabolism. **Plant**, v.202, p.138-148, 1997.

HIROCE, R.; FURLANI, A.M.C.; LIMA, M. **Extração de nutrientes na colheita por populações e híbridos de milho**. Campinas: Instituto Agronômico, 1989. 24p. (Boletim Científico, 17).

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

KHOURY JUNIOR, J. K. et al. 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.

KIRKBY, E.A. Maximizing calcium uptake by plants. *Commun. Soil Science Plant Anal.* v.10, p.89-114, 1984.

LOUÉ, A. Contribuição para o estudo da nutrição catiônica do milho, principalmente a do potássio. **Fertilé**, Paris, v.20, p.01-57, 1963.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1980a. 251p.

MALAVOLTA, E. **Deficiência de macro e micronutrientes e toxidez de Cl, Mn e Al no feijoeiro** (*Phaseolus vulgaris* L.). Piracicaba: ESALQ/USP, 1980b. 14p. (Apostila)

MALAVOLTA E. Nutrição mineral das plantas. In: CURSO DE ATUALIZAÇÃO EM FERTILIDADE DO SOLO, 1987, Campinas. **Atualização em fertilidade do solo**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p.33-101.

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

MALAVOLTA, E.; MORAES, M.F. Fundamentos do nitrogênio e do enxofre na nutrição mineral de plantas cultivadas. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S.; VITTI, G.C (Ed.). **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: Internacional Plant Nutrition Institute – Brasil, 2007. p.189-249.

MALAVOLTA, E.; VIOLANTE NETTO, A. **Nutrição mineral, calagem, gessagem e adubação dos citros**. Piracicaba: POTAFOS, 1989. 153p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas. Princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319p.

MAR, G. D. et al. Produção do milho safrinha em função de doses e épocas de aplicação de nitrogênio. **Bragantia**, Campinas, v.62, n.2, p.267-274, 2003.

MARIA, I. C. et al. Efeito da adição de diferentes fontes de cálcio no movimento de cátions em colunas de solo. **Scientia agrícola**, Piracicaba, v.50, n.1, p.87-98, 1993.

MARSCHNER H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2.ed. London: Academic Press. 1995. 889p

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. Bern: International Potash Institute, 1987. 687p.

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

MONTEIRO, F.A.; COLOZZA, M.T.; WERNER, J.C. Enxofre e micronutrientes em pastagens. In: PEDREIRA, C.G.S.; MOURA, J.C.; FARIA, V.P. (Org.). **Fertilidade do solo para pastagens produtivas**. Piracicaba: FEALQ, 2004. p.279-301.

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

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

NEPTUNE, A. M. L. O magnésio como nutriente para as culturas. In: SILVA, M. C., coord. Seminário sobre fósforo, cálcio, magnésio, enxofre e micronutrientes; situação atual e perspectivas na agricultura, 1984, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Manah S. A., 1984, p.74-77.

NEVES, O.S.C. et al. *Uso do SPAD-502 na avaliação dos teores foliares de clorofila, nitrogênio, enxofre, ferro e manganês do algodoeiro herbáceo.* **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.5, p.517-521, 2005.

NOGUEIRA, A. et al. Efeito de diferentes relações Ca:Mg do corretivo no crescimento de capim Napier. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. 1 CD-ROM.

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

OLIVEIRA, A. M. G.; 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.

OLIVEIRA, A.R.; OLIVEIRA, S.A.; GIORDANO, L.B.; GOEDERT, W.J. Absorção de nutrientes e resposta à adubação em linhagens de tomateiro. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.27, n.4, 2009.

PEREIRA, W.L.M. **Doses de potássio e de magnésio em solução nutritiva para o capim-Mombaça.** 2001. 128f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

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

PÔRTO, D.R.Q. et al. Acúmulo de macronutrientes pela cebola 'Optima' estabelecida por semeadura direta. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.24, n.4, p. 470-475, 2006.

PUNAM, K. S.; UDUPA, J. K. Optimum image thresholding via class uncertainty and region homogeneity. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v.23, n.7, p.689-706, 2001.

RAIJ, B. Van; CANTARELLA, H. Milho para grão e silagens. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLAN, A.M.C. (Ed.). **Boletim técnico 100.** Campinas: Instituto Agrônômico, 1996. p.56-59.

RAMBO, L. et al. 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.

RAMOS, M.J.M. et al. Sintomas visuais de deficiência de macronutrientes e de boro em abacaxizeiro 'imperial'. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.31, n.1, p.252-256, 2009.

REIS, A.R. et al. Metodologia e técnicas experimentais diagnóstico da exigência do cafeeiro em nitrogênio pela utilização do medidor portátil de clorofila. **Bragantia**, Campinas, v.65, n.1, p.163-171, 2006.

ROSSI, C. et al. Calagem e fontes de fósforo na produção do braquiário e níveis críticos de fósforo em amostras de Latossolo dos Campos das Vertentes (MG). **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.26, n.6, p.1083-1089, 1997.

SALVADOR, J.O.; MOREIRA, A.; MURAOKA, T. Efeito da omissão combinada de N, P, K e S nos teores foliares de macronutrientes em mudas de goiabeira. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.56, n.2, p. 501-507, 1999.

SANTOS, I.P.A. et al. Influência do fósforo, micorriza e nitrogênio no conteúdo de minerais de *Brachiaria brizantha* e *Arachis pintoi* consorciados. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.31, n.2, p. 605-616, 2002.

SARCINELLI, T. S. et al. Sintomas de deficiência nutricional em mudas de *Acacia holosericea* em resposta à omissão de macronutrientes. **Revista Árvore**, Viçosa, v.28, n.2, p.173-181, 2004.

SCHNUG, E.; PANTEN, K.; HANEKLAUS, S. Sampling and nutrient recommendations. **Communications in Soil Science and Planta Analysis**, v.29, n.11-14, p.1455-1462, 1998.

SILVA, E.B. et al. Sintomas visuais de deficiências nutricionais em pinhão-mansão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.4, p.392-397, 2009.

SILVEIRA, C.P.; MONTEIRO, F.A. Macronutrientes em folhas diagnósticas do capim - tanzânia adubado com nitrogênio e cálcio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.39, n.4, p.736-745, 2010.

SOUSA, V.F. et al. Níveis de irrigação e doses de potássio sobre os teores foliares de nutrientes do maracujazeiro amarelo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 1, p.41-46, 2008.

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

STEWART, B.A.; PORTER, L.K. Nitrogen-Sulfur relationships in wheat (*Triticum aestivum* L.), corn (*Zea mays*), and beans (*Phaseolus vulgaris*). **Agronomy Journal**, Madison, v.61, n.2, p.267-271, 1969.

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

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

URANO, E.O.M. et al. Avaliação do estado nutricional da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.9, p.1421-1428, 2006.

UTUMI, M. M. et al. Deficiência de macronutrientes em estévia: sintomas visuais e efeitos no crescimento, composição química e produção de esteviosídeo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.6, p.1038-1043, 1999.

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. O enxofre na agricultura; situação, perspectivas e sugestões. In: SILVA, M. C., coord. SEMINÁRIO SOBRE FÓSFORO, CÁLCIO, MAGNÉSIO, ENXOFRE E MICRONUTRIENTES; SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS NA AGRICULTURA, 1984, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Manah S. A., 1984. p.98-105.

WU, J.; WANG, D.; C.J. ROSEN, C.J.; BAUER, M.E. Comparison of petiole nitrate concentrations, SPAD chlorophyll readings, and QuickBird satellite imagery in detecting nitrogen status of potato canopies. **Field Crops Research**. Amsterdam, v.101, n.1, p.96-103, 2007.