

**ESTABILIDADE DE VARIEDADES DE
MILHO QUANTO AOS TEORES DE
MINERAIS NOS GRÃOS**

MARCUS REIS SENA

2010

MARCUS REIS SENA

**ESTABILIDADE DE VARIEDADES DE MILHO QUANTO AOS
TEORES DE MINERAIS NOS GRÃOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, área de concentração em Melhoramento Genético de Plantas de Importância na Região, para a obtenção do título de "Doutor".

Orientador
Prof. Dr. João Cândido de Souza

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL

2010

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Sena, Marcus Reis.

Estabilidade de variedades de milho quanto aos teores de
minerais nos grãos / Marcus Reis Sena. – Lavras : UFLA, 2010.
74 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2010.

Orientador: João Cândido de Souza.

Bibliografia.

1. Milho. 2. Melhoramento genético. 3. Produtividade. 4.
Correlações. 5. Nutrientes. I. Universidade Federal de Lavras. II.
Título.

CDD – 631.53

MARCUS REIS SENA

**ESTABILIDADE DE VARIEDADES DE MILHO QUANTO
AOS TEORES DE MINERAIS NOS GRÃOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, área de concentração em Melhoramento Genético de Plantas de Importância na Região, para a obtenção do título de "Doutor".

APROVADA em 26 de fevereiro de 2010.

| | |
|---|---------|
| Dr. Paulo Evaristo de Oliveira Guimarães | EMBRAPA |
| Dra. Valéria Aparecida Vieira Queiroz | EMBRAPA |
| Prof. Dr. José Airton Rodrigues Nunes | UFLA |
| Profª. Dra. Flávia Maria Avelar Gonçalves | UFLA |

Prof. Dr. João Cândido de Souza
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

AGRADECIMENTOS

A Deus.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Biologia, pela oportunidade de estudar.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos durante o doutorado.

À Embrapa Milho e Sorgo e ao Programa Harvest Plus, pelo financiamento de parte do trabalho e pela oportunidade de participar de um congresso internacional e pela visita ao CIMMYT.

Ao Paulo Evaristo, pela orientação, ensinamentos, amizade e incentivo.

Ao João Cândido, pelo apoio, compreensão e liberdade de trabalho.

Aos meus pais, João e Ana, pelo incentivo e ajuda nos meus estudos.

Aos meus irmãos, João e Maíra, pelo apoio.

A Jacqueline, pela compreensão, incentivo, carinho e amor.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas.

Aos colegas de pós-graduação e do GEN.

Aos funcionários de campo da UFLA, Leo e Lindolfo, e da Embrapa Milho e Sorgo.

SUMÁRIO

| | Página |
|--|---------------|
| RESUMO..... | i |
| ABSTRACT | iii |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 3 |
| 2.1 Deficiência Nutricional e o Programa Harvest Plus | 3 |
| 2.2 Variabilidade dos teores de minerais nos grãos de milho | 4 |
| 2.3 Interação genótipos por ambientes (G x A) para teores de Fe e Zn em grãos de milho. | 10 |
| 2.4 Correlações entre os teores de minerais nos grãos de milho..... | 13 |
| 2.5 Nutrientes na cultura do milho..... | 17 |
| 2.5.1 Nitrogênio | 18 |
| 2.5.2 Fósforo | 21 |
| 2.5.3 Potássio | 22 |
| 2.5.4 Cálcio e Magnésio | 23 |
| 2.5.5 Micronutrientes..... | 25 |
| 2.5.5.1 Zinco | 25 |
| 2.5.5.2 Manganês | 27 |
| 2.5.5.3 Cobre..... | 29 |
| 2.5.5.4 Ferro..... | 30 |
| 2.5.5.5 Alumínio e Bário | 32 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS | 34 |
| 3.1 Ambientes | 34 |
| 3.2 Variedades | 35 |
| 3.3 Análise do Solo..... | 37 |
| 3.4 Análise de minerais..... | 38 |
| 3.5 Planejamento experimental e análise dos dados | 39 |

| | |
|---|----|
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 41 |
| 4.1 Características do Solo..... | 41 |
| 4.2 Características Agronômicas | 42 |
| 4.3 Teores de Minerais em Grãos de Milho..... | 48 |
| 4.4 Correlações entre Caracteres | 58 |
| 5 CONCLUSÕES | 66 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 67 |

RESUMO

SENA, Marcus Reis. **Estabilidade de variedades de milho quanto aos teores de minerais nos grãos**. 2010. 74p. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.*

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a estabilidade de variedades de milho quanto aos teores de minerais e à produtividade de grãos e o grau de associação entre esses caracteres. Para isso, foram utilizados 5 ambientes e 36 variedades de milho do Ensaio Nacional de Variedades, coordenado pela Embrapa Milho e Sorgo, na safra 2004/2005. O delineamento experimental foi o látice simples 6 x 6. Para avaliar a estabilidade das variedades, aplicaram-se o índice de confiança de Annichiarico (I_i) e a ecovalência de Wricke (W^2_i). Foi observada interação genótipos por ambientes (GxA) significativa para a produtividade de grãos. A variedade AL Piratininga foi a mais promissora com média de 9,1 t/ha, $I_i = 125,2\%$ e W^2_i relativa de 2,4%. Em geral, as variedades contribuíram pouco para a interação, exceto a BRS São Vicente que, além de possuir a menor produtividade de grãos, de 2.114 kg/ha, contribuiu com 19,3% (W^2_i). Com relação aos teores de minerais, o efeito de ambiente foi significativo, o que se deveu, principalmente, à variação nos diferentes atributos químicos do solo e às diferentes adubações aplicadas. O efeito de variedade foi significativo para os minerais Ca, Mg, P, Mn e Zn, enquanto o efeito da interação GxA foi significativo apenas para P, Mn e Zn. A variedade com maior concentração absoluta de P nos grãos foi a BRS Assum Preto (2.637,2 mg/kg), a qual apresentou ainda uma baixa contribuição para a interação GxA, de 2,6% (W^2_i). A variedade mais instável foi a Fundacep 34, com W^2_i de 10,2%. Para o Mn, as variedades de maiores concentrações foram BR 451 (7,3mg/kg), BRS 2020 (7,2 mg/kg) e BRS Sol da Manhã (6,7 mg/kg). As que mais contribuíram para a interação GxA foram BRS Eldorado ($W^2_i = 8,9\%$) e BR São Vicente ($W^2_i = 9,8\%$). Para o Zn, em geral, também foi pequena a contribuição das variedades para a interação GxA, tendo Missões sido a de maior ecovalência (9,0%). As correlações estimadas entre minerais apresentaram variação de acordo com o ambiente avaliado. As correlações de maiores magnitudes foram aquelas observadas entre P e K e P e Zn. Já as estimativas entre Fe e Zn variaram de 0,25ns a 0,51**. Observou-se a limitada variabilidade para os teores de Fe e Zn nos genótipos avaliados, mas, em contrapartida, a reduzida magnitude das correlações entre os minerais é uma indicação da

* Comitê orientador: João Cândido de Souza – UFLA (orientador). Paulo Evaristo. de Oliveira Guimarães – Embrapa Milho e Sorgo.

possibilidade de seleção de genótipos produtivos que aliem consideráveis teores desses dois minerais.

ABSTRACT

SENA, Marcus Reis. **Variety Stability for Kernel Mineral Content**. 2010. 74p. Thesis (Doctor in Plant Genetics and Breeding) – Lavras Federal University, Lavras. *

The present work had the objective of evaluating the stability of mineral grain content and productivity of maize varieties and the association degree among these characters. For this, five environments and 36 cultivars of the National Variety Test coordinated by Embrapa Maize and Sorghum during season 2004/2005 were used. The experimental design used was the simple lattice 6 x 6. To evaluate varieties stabilities the Annichiarico's Confident Index (I_i) and Wricke's Ecovalence (W^2_i) were used. The genotypes by environments interaction (G x E) was significant for grain yield. The AL Piratininga variety was the most promising reaching 9.1 ton/ha, $I^2_i = 125.2\%$ and relative W^2_i of 2.4%. In general the varieties contribution to the interaction was low, except the BRS São Vicente that reached the smaller grain productivity with 2114 kg/ha with interaction contribution of 19.3% (W^2_i). The environment effect was significant for all the minerals analyzed due to the different soil chemicals properties and nutrients input. The variety effect was significant for Ca, Mg, P, Mn and Zn. The interaction effect was significant just for P, Mn and Zn. The variety with the highest P grain concentration was BRS Assum Preto (2637.2 mg/kg) which presented a low G x E interaction contribution of 2.6% (W^2_i). The most instable was Fundacep 34 with $W^2_i = 10.2\%$. For Mn the varieties with the highest concentrations were: BR 451 (7.3 mg/kg), BRS 2020 (7.2 mg/kg) and BRS Sol da Manhã (6.7 mg/kg). The varieties which contributed the most to the interaction were: BRS Eldorado ($W^2_i = 8.9\%$) and BR São Vicente ($W^2_i = 9.8\%$). For Zn, the varieties contribution to the interaction in general was low, except Missões that reached the highest ecovalence (9.0%). The estimated correlations among minerals presented variation according to the environment evaluated. The highest correlations were observed between P x K and P x Zn. The estimate between Fe and Zn varied from 0.25^{ns} to 0.51^{**}. It was observed the limited variability for Fe and Zn content in the genotype were low, but on the other hand, the weak association among minerals is an indication of the possibility of genotypes selection that can associate grain productivity and good mineral content.

* Guidance Committee: João Cândido de Souza – UFLA, (Major Professor) Paulo Evaristo de Oliveira Guimarães – Embrapa Milho e Sorgo.

1 INTRODUÇÃO

A desnutrição, envolvendo micronutrientes como Fe, I, Zn e vitamina A, vem se agravando, atingindo, principalmente, populações de baixa renda em países em desenvolvimento. Para atenuar esse problema, algumas alternativas foram desenvolvidas, como a fortificação de alimentos, que tem na distribuição seu principal ponto fraco. Outra alternativa, como o incentivo à diversificação das fontes alimentares, esbarra na questão do fornecimento e da pouca aceitação, por parte da população, de novos alimentos (Bouis & Welch, 2010).

Com esses problemas já enfrentados e conhecidos, uma nova alternativa é a biofortificação, que se caracteriza pela melhoria da qualidade nutricional (minerais e vitaminas) dos alimentos via melhoramento genético e/ou práticas agrícolas.

Já se conhecem os teores de minerais nos grãos e em outras partes da planta de milho e, o que se observa é que não há relação entre eles. Tem sido demonstrado que os teores de minerais nos grãos exibem vasta variabilidade, que é a fonte primária para o melhoramento. Desde a década de 1960, vem se supondo que o controle genético para os teores de P, K, Mg, Cu, B, Zn, Mn, Al e Fe seja aditivo (Gorlsline et al., 1964). Sabe-se também que alguns genes, como o *opaque-2*, podem influenciar os teores de vários minerais nos grãos, favorecendo a concentração na maioria deles.

Mas, alguns problemas também são enfrentados, como a provável correlação negativa entre os teores de minerais e a produtividade, a interação genótipos x ambientes de magnitudes consideráveis e a alteração dos valores das correlações entre minerais de acordo com o ambiente. Em último caso, o problema da contaminação durante a coleta, o preparo e a análise das amostras influencia alguns resultados.

Assim, conciliar qualidade nutricional, produtividade agrícola e possibilidade de melhoramento para aumento dos teores de minerais e vitaminas nos grãos de uma cultura tão importante como a do milho é, sem dúvida, um grande desafio.

Diante do exposto, este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a estabilidade de variedades de milho quanto aos teores de minerais e produtividade de grãos, além de determinar o grau de associação entre esses caracteres.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Deficiência nutricional e o Programa Harvest Plus

A produção de alimentos sempre foi uma grande preocupação mundial. Atualmente, observa-se o crescimento da fome oculta ou desnutrição, que é aquela causada pela deficiência de minerais e vitaminas essenciais à saúde (Welch & Graham, 2002).

Os seres humanos necessitam de mais de 22 minerais, os quais podem ser supridos por uma dieta equilibrada. Os mais frequentemente deficientes em nossa dieta são Fe, Zn, I, Ca, Mg, Cu e Se. Estimativas apontam que entre 60% a 80% da população mundial tenha deficiência em Fe, 15% em Se e mais de 30% em Zn e I (Welch & Graham, 2002; White & Broadley, 2005).

A deficiência de Fe é responsável por 20% das mortes de mulheres durante o parto e de 30% das crianças devido à anemia severa. Em gestantes, a deficiência deste nutriente pode causar danos irreversíveis no cérebro e no coração dos bebês, além de causar nascimentos prematuros e hipoxia (baixo teor de oxigênio no sangue). Já a deficiência de Zn causa nanismo, retardo do crescimento, redução da resistência a infecções em crianças, dificuldade nos partos, além de ter grande efeito na biodisponibilidade de vitaminas lipossolúveis, como a vitamina E (Welch & Graham, 2002).

Ca, P e Mg são os principais responsáveis pela formação de ossos e membranas celulares, assim como P, Fe, Mn e Zn são partes constituintes do DNA e da molécula de insulina (Rosa, 1991).

As intervenções feitas até agora para atenuar o problema da desnutrição se baseavam na suplementação, fortificação e diversificação da dieta, mas, por vários motivos, tais como distribuição e grande custo da fortificação, essas

medidas não surtiram o efeito esperado (Welch & Graham, 2002; White & Broadley, 2005). Para a atenuação da desnutrição, foi proposta uma nova alternativa, denominada de biofortificação, que consiste no desenvolvimento de variedades melhoradas com maior conteúdo de minerais e vitaminas.

É crescente o interesse no melhoramento vegetal para eficiência na utilização e acumulação de minerais, visando produtos mais nutritivos. Essa poderia ser uma alternativa de menor custo para atingir áreas remotas, superando os maiores obstáculos das intervenções utilizadas até agora (White & Broadley, 2005).

O Consultative Group on International Agricultural Research (CGIAR), por meio do programa Harvest Plus, vem promovendo pesquisas para a determinação do potencial genético das culturas de arroz, trigo, milho, feijão, batata-doce e mandioca, para uso em melhoramento genético, visando obter aumento do teor de minerais, principalmente Fe e Zn, por serem os de maior carência em nossa dieta. Essas culturas foram escolhidas por constituírem a base da alimentação das populações rurais carentes da Ásia, África e América Latina. Os objetivos principais deste programa são a determinação da herdabilidade e do número de genes que afetam o caráter concentração de minerais, sua estabilidade em diferentes ambientes e a possibilidade de melhoramento da qualidade nutricional, considerando a produtividade e outras características importantes (White & Broadley, 2005; Poletti et al., 2004).

2.2 Variabilidade dos teores de minerais nos grãos de milho

Já se sabe que há considerável variabilidade, nas mais diversas culturas, para a maioria dos minerais deficientes na dieta humana. Esta variabilidade pode ser explorada nos programas de melhoramento voltados para a qualidade nutricional, possibilitando o desenvolvimento de variedades com boas características agronômicas e nutritivas.

Diversos trabalhos determinaram a variabilidade para os teores dos macronutrientes P, K, Ca e Mg nos grãos de milho, os quais estão listados na Tabela 1. Os teores de micronutrientes Fe, Zn, Cu e Mn nos grãos de milho são apresentados na Tabela 2.

TABELA 1 Teores (mg/kg) de macronutrientes nos grãos de milho*.

| P | K | Ca | Mg | Referências |
|----------|------|------|------|-------------------------|
| - | 7700 | - | 2300 | Thomas (1963) |
| 6600 | 7700 | - | 2300 | Gorsline et al. (1964) |
| 3100 | 3300 | - | 1300 | Arnold et al. (1977) |
| 3596 | 3903 | 61 | 1224 | Menkir (2008) |
| 2989 | 3379 | 77,7 | 988 | Guimarães et al. (2005) |
| 600-1000 | - | - | - | Halim et al. (1968) |
| 3750 | 4688 | 62,5 | 1562 | Faquin (2005) |

*Os teores dos diferentes trabalhos foram transformados para mg/kg, para melhor comparação dos resultados, pois alguns autores utilizaram unidades de concentração diferentes, como kg/ha ou %.

TABELA 2 Variação dos teores (mg/kg) de micronutrientes em grãos de milho*.

| Fe | Zn | Cu | Mn | Referência |
|-------|-------|-----|----|--------------------------|
| 25 | 28 | 3,9 | 8 | Faquin (2005) |
| - | 15-32 | - | - | Halim et al. (1968) |
| 16-19 | 17-21 | | | Oikeh et al. (2003b) |
| 10-63 | 13-58 | - | - | Banziger & Long (2000) |
| - | 20 | - | - | Massey & Loeffel (1967) |
| - | 22 | - | - | Massey & Loeffel, (1966) |
| 19 | 24 | 1 | 5 | Guimarães et al. (2005) |

...continua...

TABELA 2, Cont.

| | | | | |
|---------|--------|---|-------|----------------------------|
| 14-159 | 12-96 | - | - | Maziya-Dixon et al. (2000) |
| 17-24 | 17-25 | - | - | Oiken et al. (2003a) |
| 16-28 | 18-30 | - | - | Long et al. (2004) |
| 20 | 30 | 3 | 13 | Menkir (2008) |
| - | 69 | 6 | 15 | Gorsline et al. (1964) |
| 16 | 19 | - | - | Arnold et al. (1977) |
| 103-188 | 70-109 | - | 31-45 | Bityutskii et al. (2002) |

*Os teores dos diferentes trabalhos foram transformados para mg/kg, para melhor comparação dos resultados, pois alguns autores utilizaram unidades de concentração diferentes, como kg/ha ou %.

Dentre os minerais relatados na literatura consultada, o ferro foi o que apresentou maior variação, seguido de fósforo, zinco, magnésio, potássio. Isso mostra a grande variação para os minerais em grãos de milho, o que expõe a complexidade desta característica, pois, nela estão contidos fatores genéticos e ambientais, além da possibilidade de contaminação durante a análise e diferenças na concentração de minerais, nas diferentes partes constituintes do grão.

Para elementos acessórios, como Al e BA, não são encontrados muitos trabalhos, mas o que se observa é que ambos apresentam considerável variação em seus teores (Tabela 3).

TABELA 3 Teores (mg/kg) de Al e Ba nos grãos de milho.

| | Guimarães et al. (2005) | | Gorsline et al. (1964) |
|--------|-------------------------|------|------------------------|
| | Al | Ba | Al |
| Média | 11,3 | 11,8 | 44 |
| Máximo | 145,6 | 49,6 | 70 |
| Mínimo | 3,4 | 0,0 | 24 |

*Modificado de Guimarães et al. (2005) e Gorsline et al. (1964).

O fator genético pode ser parte expressiva desta variação, conforme observaram Oikeh et al. (2003a) que, ao analisarem teores de Fe e Zn nos grãos de milho, concluíram que o fator genético foi responsável por 34% e 11%, respectivamente.

Outro fator a ser considerado é o ambiental, como observado nos resultados obtidos por Bänzinger & Long (2000), em que os genótipos de milho que apresentavam variação para Fe de 9,6 a 63,2 mg/kg e para Zn de 12,9 a 57,6 mg/kg, quando reavaliados em seis locais, passaram a apresentar variação de 14,4 a 21,8 mg/kg e 18,5 a 28,6 mg/kg, para Fe e Zn, respectivamente. Dessa maneira, grande parte da variação observada, segundo as autoras, seria, provavelmente, devido aos fatores ambientais.

Uma das causas das variações muito elevadas nos teores de minerais pode ser a contaminação durante a análise dos grãos. O manuseio das amostras e utensílios não higienizados adequadamente durante os procedimentos laboratoriais podem acarretar erros prejudicando a determinação dos reais teores dos minerais nos grãos e interferindo na seleção de cultivares elites para esta característica (Pfeiffer & McClafferty, 2007).

Com relação às diferentes partes dos grãos, nota-se a distinta contribuição de cada uma no teor total de nutrientes. Segundo Bityutskii et al. (2002), a maior concentração de Fe, Mn e Zn é encontrada no envoltório da

semente e nos tecidos embrionários, enquanto a menor parte é encontrada no endosperma. No entanto, como 90% do peso total do grão é constituído pelo endosperma, esta parte seria responsável por 60% a 80% de todo o teor de Fe, Mn e Zn do grão. Outra parte importante na concentração, principalmente de Zn, é o escutelo que, em alguns genótipos de milho, tem mais de 40% do total armazenado na semente. Já o envoltório da semente não armazena mais que 12% do total dos micronutrientes avaliados.

Entretanto, Massey & Loeffel (1967) e Feil et al. (2005) observaram que o gérmen seria um fator dominante na concentração de zinco no grão. Como o gérmen contém cerca de 50% do Zn, então, seria lógico dizer que se um material tivesse maior proporção de gérmen também teria maior teor de Zn no grão.

Outro fator que pode favorecer maior acumulação de minerais nos grãos seria a presença de múltiplas camadas de aleurona. A aleurona é uma reserva proteica que, geralmente na forma de grãos, pode ocorrer em sementes (camada aleurônica) de certas plantas; nesses grãos há um substrato proteináceo com um corpúsculo cristalóide (cristal de proteína) e outro globoide (Ferri et al., 1981).

Em grãos de milho, a maior parte dos minerais é depositada em cristais globóides eletrodensos encontrados em proteínas das membranas das células da aleurona e em células do embrião. Os minerais dos cristais globóides parecem estar ligados ao fitato, que é uma forma primária de estocagem de fósforo em sementes (Welch et al., 1993). Os cátions mais comuns encontrados nesses cristais globóides são Mg e K, mas Ca, Fe, Zn, Mn e Na também podem ser encontrados (Welch et al., 1993).

Esta relação entre aleurona e teores de minerais foi observada por Welch et al. (1993) que concluíram que essas camadas múltiplas são responsáveis pelo acréscimo de 39%, 19%, 87%, 25%, 135% e 6%, nos teores de Zn, Fe, Mn, Cu, Ca e Mg nos grãos, respectivamente. No caso do K, houve redução de 15% em seu teor, quando na presença dessas camadas múltiplas.

Este maior teor de minerais em função da aleurona pode ter a seguinte explicação: sabe-se que a translocação dos minerais para os grãos se dá do floema para as partes reprodutivas das plantas. O movimento dos íons no floema é controlado pelo fluxo de massa criado pelo gradiente de concentração entre as raízes e outras partes da planta e os drenos reprodutivos. Assim, um aumento da demanda no dreno, devido ao desenvolvimento dos grãos, aumenta o fluxo de nutrientes e minerais do floema para os drenos. Múltiplas camadas de aleurona poderiam causar uma demanda maior do dreno em relação àqueles que possuem apenas uma camada. Assim haveria um maior fluxo de minerais para esse tipo especial de grão, aumentando sua concentração de minerais (Welch, 1993).

Outras hipóteses que poderiam estar relacionadas com esta característica são a habilidade de concentração desses elementos durante o crescimento e a habilidade de translocação da parte aérea para o grão.

Os solutos inorgânicos que se movem no floema incluem potássio, magnésio, fosfato e cloreto. Por outro lado, cálcio, enxofre e ferro são pouco móveis no floema (Taiz & Zeiger, 2009), o que pode afetar a sua translocação durante a formação dos grãos. Estudando a relação entre concentração na planta e habilidade de translocação de Zn, Massey & Loeffel (1967) supunham que alta concentração desse mineral nos grãos parece estar relacionada com o grau de deslocamento do mesmo, do colmo e das folhas para o grão. A efetividade dessa transferência está relacionada com o teor total apresentado pela planta, pois, se a planta possui mais zinco em seu sistema, mais zinco estará disponível para ser deslocado para o grão, como demonstrado na Tabela 4. Assim, a habilidade de realocar o zinco parecer ser o que determina o seu teor nos grãos.

O transporte de alguns minerais para os grãos, como ferro, cobre, zinco e manganês, é realizado por meio de um quelante que os transporta complexados em sua molécula, chamada de nicotianamina. Análises de mutantes de ervilha mostraram que não é o ferro disponível nas folhas que determina o seu

deslocamento para os frutos, mas sim a capacidade da planta em sintetizar este quelante (Hell & Stephan, 2003).

Outro exemplo é que a superexpressão de quelantes em plantas de tabaco não só causou o aumento de concentração de Fe nas plantas, como aumentou a resistência à clorose e a produção de biomassa (Hell & Stephan, 2003).

Outro importante ponto a ser observado é que, em áreas deficientes em micronutrientes, sementes com maior concentração destes têm maior taxa de germinação e vigor. Isso permite a emissão de raízes mais profundas, promovendo melhor exploração do solo e tolerância à falta de água nos estágios iniciais da cultura, podendo refletir numa maior produção e incentivo à adoção por parte dos agricultores (Welch & Graham, 2002).

TABELA 4 Relação da concentração de zinco no grão com a sua concentração na planta e sua habilidade de transferência, em linhagens de milho (Massey & Loeffel 1967):

| Linhagem | Teor Zn na planta | Transferência de Zn | Concentração Zn nos grãos |
|----------|-------------------|---------------------|---------------------------|
| Ky211 | Alta | Alta | Alta |
| Ky209 | Média-baixa | Alta | Média |
| Ky122 | Média-alta | Média | Média |
| CI64 | Baixa | Baixa | Baixa |
| Oh07 | Media-alta | baixa | baixa |

2.3 Interação genótipos por ambientes (G x A), para teores de Fe e Zn em grãos de milho

A interação genótipos por ambientes (G x A) é decorrente da variação do desempenho dos genótipos nos vários ambientes, isto é, reflete as diferentes sensibilidades dos genótipos às mudanças ambientais. Em termos genéticos, a interação ocorre quando a contribuição dos genes que controlam o caráter ou o nível de expressão dos mesmos difere entre os ambientes (Falconer, 1981).

Esta interação é, sem dúvida nenhuma, o principal complicador do trabalho do melhorista. Como o valor genotípico pode não ser coincidente nos diferentes ambientes, é necessário que se realize um grande número de avaliações das cultivares nos diferentes ambientes, para se ter segurança na seleção ou em sua recomendação (Ramalho, 1993).

É o que acontece quando se trabalha com teores de minerais nas plantas, pois seus níveis, principalmente nos grãos, dependem do tipo e da sua disponibilidade no solo, da cultivar utilizada e, em menor magnitude, da época de plantio (Rengel et al., 1999).

Com relação à disponibilidade, a adubação tem influência nos teores de Fe e Zn, tanto na planta como no grão, pois o suprimento das necessidades da cultura para o aumento de produção pode resultar, também, no aumento de suas concentrações nos grãos. Marschner (1995) observou que as concentrações de ferro e zinco nos grãos aumentaram com a adição de fertilizantes ricos nesses dois minerais. Há, ainda, outras práticas culturais, como, por exemplo, a rotação de culturas e a calagem, que podem afetar esta disponibilidade (Karlen et al., 1994).

Estudos têm demonstrado significância na interação genótipos por ambientes para os minerais Fe e Zn, em milho (Bänziger & Long, 2000; Oikeh et al., 2003a, 2003b; Massey, 1957; Grunes et al., 1961) e em arroz (Gregório et al., 2000), influenciados, principalmente, pelos seus teores no solo (Graham et al., 1999). Assim, a seleção de cultivares com concentração estável de minerais essenciais para alimentação humana e animal é tão importante quanto o aumento dos seus teores nos grãos.

O conceito de estabilidade pode ser dividido em quatro tipos (Bruzi, 2006):

- o tipo 1 é aquele em que o genótipo será considerado estável se sua variância entre ambientes for pequena. Essa estabilidade foi denominada

de “biológica”, ou seja, caracteriza um genótipo com desempenho constante frente às variações ambientais. Esse comportamento não é desejável, pois o genótipo não acompanha a melhoria nas condições do ambiente com o aumento de produção;

- no tipo 2, a cultivar será considerada estável se sua resposta ao ambiente é paralela ao desempenho médio de todas cultivares avaliadas no experimento. Essa estabilidade foi denominada, por Becker (1981), de “estabilidade agronômica” (conceito dinâmico);
- no tipo 3, as cultivares estáveis apresentam o quadrado médio do desvio da regressão de pequena magnitude, ou seja, cultivares com alta previsibilidade;
- por último, tem-se o tipo 4, no qual as cultivares mais estáveis são aquelas que apresentam menor quadrado médio da interação genótipos x anos, ou seja, indivíduos estáveis frente às variações imprevisíveis.

Vários métodos para avaliar a estabilidade são apresentados na literatura (Becker & Leon, 1988; Cruz & Carneiro, 2003; Cruz et al., 2004; Kang & Gauch Júnior, 1996).

Com o objetivo de estudar a estabilidade de variedades quanto aos teores de Fe e Zn, Oikeh et al. (2004) empregaram o método Additive Main Effect and Multiplicative Interactions (AMMI), em 20 variedades de milho de polinização aberta, tropicais e precoces, em dois anos e em três locais. Apesar da pequena variação para ferro e zinco, a análise de variância demonstrou significância para quase todos os efeitos. Para o teor de ferro, a contribuição dos genótipos, ambientes e da interação G x A para a variação total foi de 15%, 31% e 28%, respectivamente e, para zinco, de 15%, 26% e 35%, respectivamente. A interação genótipos x locais contribuiu com 55% da interação G x A no teor de ferro e com 38% da interação G x A no teor de zinco, sendo estas as maiores contribuições para a interação. Os efeitos de anos e de locais não foram

significativos, sugerindo que os teores desses dois nutrientes no solo de cada local, apesar de serem diferentes, eram suficientes para suprir as demandas fisiológicas dos genótipos avaliados. A contribuição da interação G x A foi o dobro da contribuição dos genótipos, o que enfatiza a necessidade de uma maior exploração da interação e dos seus efeitos principais, possibilitando a seleção de cultivares que tenham uma razoável concentração de minerais e que sejam estáveis ou que tenham uma adaptação mais específica a certas regiões que sejam alvo do programa de melhoramento.

Vários procedimentos vêm sendo utilizados para estudo da estabilidade, principalmente para a produtividade de grãos em várias culturas, mas poucos estudos os utilizaram para teores de minerais em grãos de milho (Oikeh et al., 2004).

A análise de estabilidade e adaptabilidade, juntamente com a determinação da variabilidade para o caráter, permite a identificação de cultivares de comportamento previsível e que sejam responsivas às variações ambientais, em condições específicas ou amplas (Cruz & Regazzi, 1994).

2.4 Correlações entre os teores de minerais nos grãos de milho

A correlação entre caracteres tem, basicamente, duas origens: genética e de ambiente. Segundo Falconer (1981), a correlação genética é ocasionada principalmente pelo pleiotropismo (a propriedade pela qual um gene condiciona mais de um caráter simultaneamente). Ainda de acordo com o mesmo autor, a correlação fenotípica é definida como a associação entre duas variáveis que pode ser observada diretamente.

As correlações entre minerais observadas na literatura (Arnold & Bauman, 1976; Arnold et al., 1977; Maziya-Dixon et al., 2000; Oikeh et al., 2003a; Guimarães et al., 2005 e Banziger & Long 2000) exibem variação considerável, como mostrado na Tabela 5.

TABELA 5 Correlação mínima e máxima estimada entre minerais nos grãos de milho*.

| | Mínima | Máxima |
|---------|----------|--------|
| P x K | 0,23ns | 0,85** |
| P x Mg | 0,69** | 0,91** |
| Mg x K | 0,15ns | 0,81** |
| Fe x P | 0,36** | 0,43ns |
| Fe x K | 0,29ns | 0,68** |
| Fe x Mg | 0,28* | 0,68** |
| Zn x P | -0,25ns | 0,66** |
| Zn x K | -0,08ns | 0,52** |
| Zn x Mg | 0,29** | 0,50** |
| Zn x Fe | -0,002ns | 0,88** |
| Ca x Fe | 0,16** | 0,54** |

ns: não significativo, a 1% de probabilidade; **: significativo, a 1% de probabilidade. (Modificado de: Arnold & Bauman, 1976; Arnold et al., 1977; Maziya-Dixon et al., 2000; Oikeh et al., 2003a; Guimarães et al., 2005; Banziger & Long, 2000).

Como os macronutrientes promovem o crescimento das raízes, há uma maior exploração do solo pelas plantas, o que favorece a absorção de micronutrientes. Desse modo, em culturas como o trigo, soja e milho, em geral há correlação positiva entre micro e macronutrientes nos grãos (Rengel et al., 1999; Verma & Minhas, 1987).

Uma das causas dessas variações nas estimativas de correlações é genética. Foi o que Arnold et al. (1977) observaram, trabalhando com duas populações, uma de endosperma normal e outra contendo o alelo *opaco-2*. As correlações foram de 0,59** e 0,64** (P x K); 0,70** e 0,74** (P x Mg); 0,43** e 0,54** (P x Fe); 0,35** e 0,39** (P x Zn); 0,27* e 0,44** (K x Mg); 0,41** e 0,52** (K x Fe); 0,32** e 0,48** (K x Zn); 0,49** e 0,57** (Mg x Fe); 0,26* e 0,31* (Mg x Zn); 0,41** e 0,52** (Fe x Zn), para a população de endosperma

normal e QPM, respectivamente. Resultados semelhantes foram encontrados por Arnold & Bauman (1976) e Oikeh et al. (2003a).

Outra causa de variação para as correlações é o ambiente. Oikeh et al. (2003a), Banziger & Long (2000) e Menkir (2008) demonstraram que a associação entre minerais varia de acordo com os ambientes onde as cultivares foram testadas, como mostrado na Tabela 6.

TABELA 6 Variação das estimativas das correlações entre minerais em grãos de milho, em avaliações de diferentes ambientes.

| | Oikeh et al. (2003a) | Menkir (2008) |
|---------|----------------------|-------------------|
| P x Zn | 0,48ns a 0,86** | 0,44** a 0,69** |
| P x Fe | 0,47** a 0,75** | 0,42* a 0,57** |
| Fe x Zn | - | 0,23ns a 0,72** |
| Mn x Fe | - | -13ns a 0,34ns |
| Mn x Zn | - | -0,09 a 0,52** |
| Cu x Fe | - | -12ns a 0,48** |
| Cu x Zn | - | 0,10ns a 0,58** |
| Ca x Fe | - | -0,10ns a 0,27ns |
| Ca x Zn | - | -0,10ns a 0,23 ns |
| Mg x Fe | - | 0,12ns a 0,62** |
| Mg x Zn | - | -0,04ns a 0,70** |
| K x Fe | - | 0,23ns a 0,47** |
| K x Zn | - | 0,17ns a 0,67** |

ns: não significativo, a 1% ou a 5% de probabilidade; *: significativo, a 5% de probabilidade; **: significativo, a 1% de probabilidade.

A correlação P x Zn é a mais citada na literatura. Não se chegou a um consenso sobre esta estimativa, pois alguns autores demonstram tanto correlações negativas quanto positivas entre estes dois minerais. Verma &

Minhas (1987), estudando a relação entre P e Zn em diferentes sistemas de cultivo, observaram que a concentração de Zn nos grãos se reduzia com a aplicação de P e que a concentração de P se reduzia com a aplicação de Zn. Eles também observaram a competição entre Zn e Ca pelos mesmos sítios de absorção das plantas em solos com e sem calcário.

Já as correlações entre os teores de minerais e peso dos grãos são de menor magnitude, com variação considerável para algumas associações, como demonstrado na Tabela 7.

TABELA 7 Correlações entre o peso de grãos e minerais, em diferentes ambientes.

| | Mínimo | Máximo |
|--------------------|---------|--------|
| Peso de grãos x P | 0,04ns | 0,63** |
| Peso de grãos x K | -0,03ns | 0,37ns |
| Peso de grãos x Mg | -0,01ns | 0,55** |
| Peso de grãos x Fe | -0,06ns | 0,49ns |
| Peso de grãos x Zn | -0,48** | 0,03ns |

ns: não significativo, a 1% ou a 5% de probabilidade; **: significativo, a 1% de probabilidade. (Modificado de White & Broadley, 2005; Massey & Loeffel, 1966; Arnold et al., 1977; Oikeh et al., 2003a; Menkir, 2008; Banziger & Long, 2000).

Em geral, na literatura, as concentrações de minerais nos grãos, principalmente de Fe e Zn, têm correlações negativas com a produtividade (White & Broadley, 2005; Massey & Loeffel, 1966; Arnold et al., 1977), o que é uma grande dificuldade para o trabalho do melhorista. Essas correlações podem ser o resultado do aumento do conteúdo de carboidrato em genótipos de alto potencial produtivo. Apesar de a correlação entre produtividade e concentração destes minerais (Fe e Zn) ser negativa, mas de baixa magnitude, seria possível a seleção de genótipos com alto potencial produtivo e mais ricos nestes minerais (Bänziger & Long, 2000). Desse modo, o desenvolvimento de cultivares para

alta concentração de ferro e zinco, baseado em materiais elites para produção, pode evitar esta possível e indesejável associação, permitindo a seleção de genótipos que associem essas duas características (Rengel et al., 1999).

2.5 Nutrientes na cultura do milho

Os minerais essenciais ao desenvolvimento de uma planta de milho são os macronutrientes N, P, K, Ca, Mg e S e os micronutrientes B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn.

Os nutrientes requeridos pelo milho serão determinados por sua capacidade de extração total (Tabelas 8 e 9), o que depende da produtividade alcançada e da concentração dos nutrientes em seus grãos e em sua palhada.

É necessário, para uma boa produção de milho, que os nutrientes exigidos estejam disponíveis em quantidades suficientes, desde o início do desenvolvimento das plantas.

O milho apresenta períodos diferentes de intensa absorção. O primeiro ocorre durante a fase de desenvolvimento vegetativo e o segundo, durante a fase reprodutiva ou a formação da espiga.

No caso do potássio, por exemplo, sua máxima absorção se dá durante o período vegetativo. Já no caso do N e P, este período vai desde o desenvolvimento vegetativo até a formação da espiga (Olness & Benoit, 1992).

TABELA 8 Extração média de macronutrientes pela cultura do milho, em diferentes níveis de produtividade.

| Produtividade | Nutrientes extraídos | | | | |
|---------------|----------------------|---|----|----|----|
| | N | P | K | Ca | Mg |
| t/ha | -----kg/ha----- | | | | |
| 3,65 | 77 | 9 | 83 | 10 | 10 |

...continua...

TABELA 8, Cont.

| | | | | | |
|-------|-----|----|-----|----|----|
| 5,80 | 100 | 19 | 95 | 17 | 17 |
| 7,87 | 167 | 33 | 113 | 27 | 25 |
| 9,17 | 187 | 34 | 143 | 30 | 28 |
| 10,15 | 217 | 42 | 157 | 32 | 33 |

Fonte: Coelho & França, (1995).

TABELA 9 Extração de micronutrientes (g/ha) pela cultura do milho através dos grãos.

| B | Cl | Cu | Fe | Mn | Mo | Zn |
|----|-------|----|-----|----|-----|-----|
| 20 | 2.000 | 25 | 160 | 53 | 2,5 | 178 |

Fonte: Faquin (2005).

Após absorvido, considerável percentagem de cada mineral presente nos diferentes tecidos vegetais é translocada para o grão, como o P (80% a 90%), seguindo-se o nitrogênio (75%), o enxofre (60%), o magnésio (50%), o potássio (20% a 30%) e o cálcio (10% a 15%). Isso implica que a incorporação dos restos culturais do milho devolva ao solo parte dos nutrientes, principalmente potássio e cálcio, contidos na palhada (Coelho & França 1995).

2.5.1 Nitrogênio

É o elemento mineral que as plantas exigem em maiores quantidades. Ele serve como constituinte de muitos componentes da célula vegetal, incluindo aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos. Portanto, a deficiência de nitrogênio rapidamente inibe o crescimento vegetal (Taiz & Zeiger, 2009).

A cultura do milho remove grandes quantidades de nitrogênio e usualmente requer o uso de adubação nitrogenada em cobertura para

complementar a quantidade suprida pelo solo, quando se desejam produtividades elevadas (Coelho & França, 1995).

As principais formas de nitrogênio disponíveis para as plantas são o amônio (NH_4^+) e o nitrato (NO_3^-), as quais representam menos de 2% do nitrogênio total do solo. O restante se faz presente na forma orgânica, que é relativamente estável e não diretamente disponível às plantas (Coelho & França, 1995; Taiz & Zeiger, 2009; Below, 2002).

Os íons amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-), gerados pela fixação ou liberados pela decomposição da matéria orgânica do solo, tornam-se objetos de intensa competição entre plantas e microrganismos. Sob concentrações elevadas no solo, que ocorrem após fertilizações, a absorção do amônio e do nitrato pelas raízes pode exceder a capacidade de uma planta em assimilar esses íons, levando ao seu acúmulo nos tecidos vegetais.

Uma vez na planta, o N inorgânico tem que ser assimilado em formas orgânicas, isto é, incorporado em compostos contendo carbono, tipicamente aminoácidos. A vasta maioria (90% ou mais) do N está presente nas proteínas. O impacto do metabolismo do N no crescimento e no rendimento do milho pode ser resumido em duas funções gerais: 1) estabelecimento e manutenção da capacidade fotossintética e 2) desenvolvimento e crescimento dos drenos reprodutivos (Below, 1995).

Para estabelecer a capacidade fotossintética, deve-se assegurar que o fornecimento de N não venha a limitar o desenvolvimento do aparato fotossintético (enzimas, pigmentos e outros compostos necessários à fotossíntese). Dentro de limites, o aumento no suprimento de N aumenta o crescimento e o vigor da planta, enquanto a deficiência resulta em plantas menores e pálidas. Coletivamente, essas diferenças afetam a interceptação solar, a fotossíntese e, em última instância, o rendimento de grãos (Below, 2002).

Para alcançar altos rendimentos, as plantas têm que estabelecer não só a capacidade fotossintética, mas também continuar a fotossíntese durante a formação da semente e durante o período de enchimento dos grãos. Esse fornecimento ideal de N às plantas de milho parece favorecer o acúmulo de outros nutrientes, como observado por Fernandes et al. (1999) que, avaliando o efeito de sistemas de preparo do solo e de doses de nitrogênio na produção e no acúmulo de N, P, K, Ca, Mg, S e Zn em grãos de milho, observaram que, de modo geral, à medida que se aumentou a dose de N aplicada nos diferentes preparos de solo, houve um aumento do teor dos nutrientes estudados nos grãos (Tabela 10).

TABELA 10 Acúmulo de nutrientes nos grãos de plantas de milho submetidas a quatro doses de N. Média de três sistemas de preparo de solo.

| Dose de N | N | P | K | Ca | Mg | Zn |
|-----------|-------|-------|-------|------|------|--------|
| kg/ha | | | | | | |
| 0 | 35,02 | 12,11 | 10,19 | 0,35 | 5,20 | 72,04 |
| 60 | 50,51 | 19,73 | 13,79 | 0,47 | 7,92 | 107,82 |
| 120 | 59,35 | 21,58 | 15,53 | 0,51 | 9,01 | 127,44 |
| 240 | 57,68 | 19,90 | 18,44 | 0,48 | 9,34 | 115,36 |

Modificado de Fernandes et al. (1999).

A maior parte do N na folha de milho está associada ao cloroplasto (ao redor de 60% do N total da folha). Com o envelhecimento das folhas, a capacidade fotossintética diminui e, também, o suprimento de assimilados e o rendimento de grãos. Este declínio ocorre mais rapidamente para as folhas deficientes em N e conduz a espigas menores, com menos grãos (Below, 2002).

O número de grãos por planta está mais relacionado ao rendimento de milho que qualquer outro componente de produção. Por conseguinte, muitos estudos mostram que os aumentos de rendimento induzidos pelo N são

principalmente o do número de grãos por planta (Below, 1995; Uhart & Andrade, 1995). Esse efeito de aumentar o número de grãos por planta é causado, principalmente, pelo menor número de aborto de grãos (Below, 2002).

2.5.2 Fósforo

O fósforo é essencial para o crescimento das plantas. É um componente integral de compostos importantes das células vegetais que atuam na fotossíntese, na respiração, no armazenamento e na transferência de energia, na divisão celular, no crescimento das células e em vários outros processos na planta (Taiz & Zeiger, 2009).

Além de promover a formação e o crescimento das raízes, o fósforo melhora a qualidade de muitas frutas, verduras e culturas graníferas, sendo vital para a formação das sementes (Lopes, 1989).

No milho, esse nutriente é grandemente exigido, na época do florescimento, devido à contribuição para formação dos grãos. Ele é distribuído na planta toda, mas, na sua maior parte, nos grãos, onde perfaz cerca de 42kg/ha, ou seja, 54% de P_2O_5 do total absorvido. O papel do fósforo na semente deve estar ligado ao metabolismo do amido e da matéria graxa, compostos que se acumulam e sofrem armazenamento nos grãos de milho (Malavolta, 2006).

Este nutriente movimenta-se muito pouco na maioria dos solos, permanecendo onde é colocado pela intemperização dos minerais ou pela adubação. Por essa movimentação característica no solo, a sua absorção pelas plântulas de milho decresce à medida que há redução na umidade do solo.

O fosfato (HPO_4^{2-}) na solução do solo é rapidamente absorvido pelas raízes das plantas mediante um transportador de $H^+-HPO_4^{2-}$ e incorporado em uma variedade de compostos orgânicos, incluindo açúcares, fosfatos, fosfolipídeos e nucleotídeos. O principal ponto de entrada do fosfato nas rotas de assimilação ocorre durante a formação do ATP, a molécula de energia da célula.

Uma vez incorporado ao ATP, o grupo fosfato pode ser transferido mediante muitas reações diferentes, formando vários compostos fosforilados encontrados nas células dos vegetais superiores (Taiz & Zeiger, 2009).

De acordo com Lopes (1989), os fatores que afetam a disponibilidade do P são os seguintes:

a) teor de argila: solos com alto teor de argila fixam mais fósforo do que aqueles com baixo teor de argila;

b) aeração: o oxigênio é necessário para o crescimento da planta e para a absorção dos nutrientes. Ele é também essencial para a decomposição biológica da matéria orgânica, que é uma das fontes de fósforo;

c) compactação: a compactação reduz a aeração e o espaço poroso na zona radicular, o que reduz a absorção de fósforo e o crescimento das plantas. A compactação também diminui o volume de solo que as raízes podem penetrar, limitando o acesso delas mesmas ao fósforo nele existente;

d) outros nutrientes: a aplicação de outros nutrientes pode afetar a absorção de fósforo. O cálcio, em solos ácidos e o enxofre, em solos básicos, parecem aumentar a disponibilidade do fósforo, como faz o nitrogênio amoniacal, mas a adubação com zinco tende a restringi-la. A aplicação de potássio tem pouco ou nenhum efeito;

e) pH do solo: as formas mais solúveis e disponíveis de fósforo existem entre pH 5,5 e 7,0. Isto faz com que a calagem seja essencial em solos muito ácidos (Lopes, 1989).

2.5.3 Potássio

Depois do nitrogênio, o potássio é o elemento absorvido em maiores quantidades pelo milho, sendo 20% exportados para os grãos (Coelho & França, 1995).

O potássio é vital para a fotossíntese e a regulação osmótica das células vegetais, sendo acumulado como íon livre no citosol e nos vacúolos (Taiz & Zeiger, 2009). Quando seu teor é deficiente, a fotossíntese diminui e a velocidade de respiração das plantas aumenta. Estas duas condições de deficiência – redução na fotossíntese e aumento na respiração – diminuem o suprimento de carboidratos para as plantas. O potássio é essencial na síntese proteica, além de ajudar a planta a utilizar mais eficientemente a água, promovendo a turgidez para manter a pressão interna nos tecidos (Lopes, 1989).

O potássio aumenta a resistência das plantas às doenças, um dos papéis mais importantes no manejo das culturas. Ele dá maior resistência aos colmos e talos contra a entrada de organismos invasores e o acamamento, fazendo com que as células fiquem mais túrgidas e menos suscetíveis à invasão de certas doenças (Lopes, 1989).

Os sintomas de deficiência de potássio aparecem de várias formas. Um dos mais comuns é a murcha, ou queima, ao longo das margens das folhas. O aspecto queimado aparece primeiro nas folhas mais velhas, na maioria das culturas, especialmente gramíneas. As plantas deficientes em potássio crescem lentamente, apresentam sistema radiculares pouco desenvolvidos, os colmos são fracos e o acamamento é comum. As sementes e os frutos são menores e enrugados e as plantas têm pouca resistência às doenças (Lopes, 1989).

2.5.4 Cálcio e magnésio

A nutrição com cálcio e magnésio não se constitui, geralmente, em grande preocupação nos programas de adubação, tendo em vista que a prática de calagem ainda é a maneira mais usual de fornecimento destes nutrientes às plantas (Coelho & França, 1995). Em geral, cátions como o magnésio (Mg^{2+}) e o cálcio (Ca^{2+}) são assimilados pela formação de complexos e ligações

eletrostáticas com aminoácidos, fosfolípidos e outras moléculas carregadas negativamente (Taiz & Zeiger, 2009).

O cálcio estimula o desenvolvimento das raízes e das folhas. Ele forma compostos que são parte das paredes celulares, em particular a lamela média. Ajuda a ativar vários sistemas enzimáticos e a neutralizar os ácidos orgânicos na planta. Influencia indiretamente a produção pela redução da acidez do solo, reduzindo a solubilidade e a toxidez do manganês, do cobre e do alumínio. Além disso, melhora as condições para o desenvolvimento das raízes, estimulando a atividade microbiana e aumentando a disponibilidade de molibdênio e a absorção de outros nutrientes (Lopes, 1989).

É também utilizado no fuso mitótico durante a divisão celular e tem o papel de mensageiro secundário em várias respostas das plantas, tanto a sinais ambientais quanto a hormonais (White & Broadley, 2005; Taiz & Zeiger, 2009).

No caso do milho, esse nutriente é absorvido até os noventa dias. Sua concentração é maior nas folhas mais velhas, sendo, nos grãos, proporcionalmente às demais partes, muito pequena (Malavolta, 2006).

O pouco crescimento do sistema radicular é um sintoma comum da deficiência de cálcio. Em casos severos, o ponto de crescimento da raiz morre. As raízes deficientes em cálcio geralmente escurecem e apodrecem. As folhas e os outros tecidos jovens desenvolvem sintomas porque o cálcio é pouco translocado dentro da planta.

O magnésio está envolvido ativamente na fotossíntese, pois é parte da estrutura em anel da molécula de clorofila (Taiz & Zeiger, 2009). Assim, a maior parte desse nutriente é encontrada na clorofila, mas as sementes também são relativamente ricas (cerca de 1/3 do total absorvido), apesar de culturas produtoras de grãos, tais como o milho, possuírem baixos níveis desse nutriente na semente. O magnésio também ajuda no metabolismo do fosfato, na respiração da planta e na ativação de vários sistemas enzimáticos (Lopes, 1989).

2.5.5 Micronutrientes

Com relação aos micronutrientes, as quantidades requeridas pelas plantas de milho são muito pequenas. Para a produção de 9 t de grãos /ha, são extraídos 2.100g de ferro, 340g de manganês, 110g de cobre, 400g de zinco, 170g de boro e 90g de molibdênio. Entretanto, a deficiência de um deles pode ter tanto efeito na desorganização de processos metabólicos quanto na deficiência de um macronutriente como, por exemplo, o nitrogênio (Coelho & França, 1995).

Apesar das pequenas quantidades de micronutrientes, estes são fundamentais para o crescimento e o desenvolvimento das plantas, agindo como constituintes das paredes e membranas celulares (B, Zn), de enzimas (Fe, Mn, Cu, e Ni), como ativadores de enzimas (Mn, Zn) e na fotossíntese (Fe, Cu, Mn, Cl) (Kirkby & Romheld, 2007).

A inadequada disponibilidade de micronutrientes não só tem efeito direto no desenvolvimento da cultura, mas também reduz a eficiência no uso de fertilizantes contendo macronutrientes.

Além disso, os micronutrientes (Cu, Mn, Zn, B) estão particularmente envolvidos na fase reprodutiva das plantas e, conseqüentemente, na determinação da produtividade e da qualidade da cultura colhida. Alguns, como Mn, Zn e Mo, conferem resistência contra estresses bióticos e abióticos. Além do mais, há uma conscientização cada vez maior sobre a importância dos micronutrientes para o ecossistema, o solo, as culturas, os seres humanos e os animais (Kirkby & Romheld, 2007).

2.5.5.1 Zinco

No Brasil, o zinco é o micronutriente mais limitante à produção do milho, sendo a sua deficiência muito comum na região central do país, onde predominam os solos sob vegetação de cerrado, os quais, geralmente,

apresentam baixo teor no material de origem (Coelho & França, 1995; Barbosa Filho, 1991).

O milho é uma das plantas que mais respondem à aplicação de Zn no solo, proporcionando ganhos de matéria seca e de grãos.

É ativador enzimático de diversos processos metabólicos, como o da produção do aminoácido triptofano, precursor do ácido indol acético (AIA), responsável pelo crescimento de tecidos vegetais. O zinco auxilia as substâncias que atuam no crescimento e nos sintomas enzimáticos, é essencial para a ativação de certas reações metabólicas e é necessário para a produção da clorofila e a formação dos carbonatos.

O zinco é pouco móvel dentro da planta e, conseqüentemente, os sintomas de deficiência aparecem primeiro nas folhas e em outras partes novas. A deficiência de zinco no milho é caracterizada pela cor amarelo-clara ou branca dos pontos de crescimento e aparece no início do ciclo.

Alguns solos que receberam calcário para elevar o pH acima de 6,0 podem apresentar deficiência de zinco, especialmente nos arenosos ou com altos teores de P (Lopes, 1989).

O zinco é um elemento essencial para a maioria das espécies animais. Muitos precisam ser suplementados com alguma forma concentrada de zinco, em razão da pouca disponibilidade do elemento ou de seu baixo nível na dieta (Rosa, 1991).

O controle homeostático do zinco no organismo se dá, principalmente, à custa da variação do nível de absorção. O elemento é absorvido, principalmente, no abomaso e no intestino delgado nos ruminantes e no intestino delgado das demais espécies. O nível de absorção do zinco aumenta ou diminui à medida que o mesmo se eleva ou decresce na dieta ou nas exigências do animal. O zinco localiza-se no sítio ativo das enzimas e está envolvido em processos catalíticos da maior importância, tais como metabolismo de ácidos nucleicos, carboidratos

e a síntese de proteínas. Sua deficiência dietética é capaz de afetar um grande número de importantes funções orgânicas, principalmente no sistema imunológico (Fraga, 2005; Rosa, 1991).

A deficiência de zinco pode ser responsável pela demora na cicatrização de ferimentos e o aumento da suscetibilidade a infecções. O efeito benéfico do zinco na cicatrização de ferimentos estaria relacionado à sua demanda elevada para a síntese de colágeno, importante no processo de reparação tecidual (Rosa, 1991).

2.5.5.2 Manganês

O manganês vinha se destacando mais pela sua toxicidade do que pela sua deficiência. Entretanto, com a tendência atual em aumentar o uso de calcário e sua incorporação incorreta, muito superficial (0 a 10 cm), a situação está se invertendo e, em algumas lavouras, sua deficiência vem sendo observada (Lopes, 1989).

O manganês atua, principalmente, como parte do sistema enzimático nas plantas, ativa várias reações metabólicas importantes, tem ação direta na fotossíntese ajudando na síntese de clorofila, acelera a germinação e a maturidade de sementes e frutas, além de aumentar a disponibilidade de fósforo e cálcio (Lopes, 1989). A função mais bem definida do manganês é a da reação fotossintética pela qual o oxigênio (O₂) é produzido a partir da água (Marschner, 1995).

Goor, citado por Kabata-pendias & Pendias (1985), relata uma concentração menor de manganês em exsudato do floema que em tecidos das folhas, concluindo que o pequeno transporte do elemento através do floema é responsável pela sua baixa concentração em frutos, sementes e órgãos de reserva das raízes.

No caso do milho, o manganês se encontra em maior quantidade na raiz, sendo igualmente distribuído nas folhas, grãos e sabugo (Malavolta, 2006). Os sintomas de deficiência aparecem primeiro nas folhas jovens, com amarelecimento entre as nervuras. Algumas vezes, aparece uma série de manchas castanho-escuras. As deficiências de manganês ocorrem, com maior frequência, nos solos orgânicos e nos solos com pH neutro a alcalino com baixos teores naturais de manganês. Apesar de as deficiências estarem frequentemente associadas ao pH elevado, também podem ocorrer como consequência de um desequilíbrio com outros nutrientes, tais como o cálcio, o magnésio e o ferro (Lopes, 1989).

O manganês exerce suas funções no organismo animal por meio da ativação de enzimas (cofator) ou por ser parte integrante de sistemas enzimáticos diversos (Rosa, 1991). Está associado também ao desenvolvimento dos ossos e ao metabolismo de aminoácidos, lipídios e carboidratos. Fontes de Mn são grãos integrais, arroz, chá e nozes. Em excesso pode ser tóxico (Ascher, 2000).

As enzimas que encerram manganês são importantes para (Rosa, 1991):

- a) síntese de mucopolissacarídeos, que são componentes da matriz orgânica de ossos e dentes;
- b) síntese do colesterol, que é precursor dos hormônios esteróis;
- c) gliconeogênese, que é a síntese de glicose a partir de precursores, tais como aminoácidos.
- d) utilização da glicose.

Suas deficiências em animais são anormalidades ósseas e efeitos adversos sobre funções reprodutivas. Níveis de até 1.000 ppm na dieta de várias espécies animais não causam toxidez.

2.5.5.3 Cobre

O cobre é necessário para a formação da clorofila nas plantas,; ele catalisa vários processos no metabolismo vegetal e é necessário à promoção de diversas reações, apesar de, geralmente, não fazer parte do(s) produto(s) formado(s) (Lopes, 1989). Esse nutriente influencia a permeabilidade dos vasos do xilema à água, estando também envolvido nos mecanismos de resistência a doenças fúngicas (Dechen et al., 1991). Nas plantas, está associado a enzimas envolvidas em reações redox, sendo reversivelmente oxidado de Cu^+ a Cu^{2+} . Um exemplo dessa enzima é a plastocianina, a qual está envolvida no transporte de elétrons durante as reações dependentes de luz da fotossíntese (Taiz & Zeiger, 2009).

Outros metais no solo (ferro, manganês, alumínio, etc.) afetam sua disponibilidade para o crescimento das plantas, efeito que é independente do tipo do solo. O excesso de cobre diminui a atividade do ferro e causa sintomas de deficiência deste último nas plantas (Lopes, 1989).

Em nutrição animal, o cobre (Cu) costuma ser considerado importante, junto com o ferro, devido às suas propriedades similares e sua associação na formação da hemoglobina. Como acontece com o ferro, o cobre se acumula preferencialmente no fígado. Embora o cobre não faça parte da hemoglobina, a anemia é um dos sintomas comuns da sua deficiência. Sua relação com a hemoglobina parece permitir a mobilização do ferro de seus sítios de estocagem do organismo (fígado, baço e medula óssea) por meio de sua participação na ferroxidase e, ainda, parece promover a maturação e aumentar o período de vida das hemáceas.

As deficiências dietéticas de cobre são de cinco a dez vezes inferiores às de ferro e são consequência de ataxia zoótica, caracterizada por perturbações da locomoção; paralisia posterior, anormalidades ósseas, alterações de cor e forma

dos pelos e da lã, falhas reprodutivas caracterizadas por morte e reabsorção fetal (Rosa, 1991).

O Cu, em humanos, é necessário para o desenvolvimento de tecidos de ligação, cobertura de nervos e ossos. Participa também do metabolismo de Fe e de energia. As principais fontes de cobre são: fígado, nozes e grãos integrais. Tanto a deficiência como a toxidez em humanos são raras (Fraga, 2005).

2.5.5.4 Ferro

O ferro é um catalisador que ajuda na formação da clorofila, age como um carreador de oxigênio e ajuda a formar certos sistemas respiratórios envolvendo enzimas. A deficiência de ferro é evidenciada por meio do amarelecimento das folhas (clorose), criando um forte contraste com as nervuras, que, em geral, permanecem verdes.

O ferro é importante nas proteínas ferro-enxofre e como catalisador em reações redox mediadas por enzimas, como as do metabolismo do nitrogênio. As plantas obtêm o ferro do solo, onde está presente primariamente como ferro férrico (Fe^{3+}), em óxidos como $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Fe}(\text{OH})^3$ e $\text{Fe}(\text{OH})^4$. Em pH neutro, o ferro férrico é altamente insolúvel. Para que quantidades suficientes do ferro sejam absorvidas da solução do solo, as raízes desenvolveram vários mecanismos que aumentam a sua solubilidade e, assim, a sua disponibilidade. São eles:

- aumento da solubilidade do ferro férrico pela acidificação do solo;
- redução do ferro férrico à forma ferrosa (Fe^{2+}) mais solúvel;
- liberação de compostos que formam complexos estáveis e solúveis com o ferro (Marschner, 1995).

Em geral, as raízes acidificam o solo ao seu redor. Elas exsudam prótons durante a absorção e a assimilação dos cátions, em especial o amônio, e liberam compostos orgânicos, como os ácidos málico e cítrico, que aumentam a

disponibilidade do ferro e do fósforo. Vários compostos secretados pelas raízes formam quelatos estáveis com o ferro. As gramíneas produzem uma classe especial de quelantes denominados de sideróforos, os quais são constituídos por aminoácidos. As células das raízes das gramíneas possuem um sistema de transporte que carrega o quelato formado para o interior do citoplasma (Taiz & Zeiger, 2009).

O ferro livre, ou seja, aquele que não está complexado com compostos de carbono pode interagir com o oxigênio para formar ânions superóxidos e estes podem danificar membranas. As células vegetais podem limitar os danos pelo armazenamento do excesso de ferro em complexos de ferro-proteína chamados de fitoferritina (Bienfait & Mark, 1983). Existe grande interesse na fitoferritina porque o ferro, ligado a proteínas dessa forma, pode ser altamente disponível para o homem.

No organismo animal, 65% de todo o ferro está presente na hemoglobina, 3% na mioglobina (pigmento vermelho do músculo) e 30% sob a forma de compostos de reserva de ferro (ferritina, hemossiderina). Estes se acumulam principalmente no fígado, baço e medula óssea, e o remanescente se encontra distribuído em enzimas e proteínas de transporte do elemento (Rosa, 1991).

No organismo animal, este nutriente está envolvido de maneira complexa no transporte e estocagem de oxigênio nos tecidos porque sua presença na hemoglobina e na mioglobina confere a estas moléculas a capacidade de retê-lo. Além disso, várias enzimas do grupo dos citocromos, que contêm ferro, facilitam a utilização do oxigênio a nível celular (Rosa, 1991).

O principal sintoma de deficiência deste nutriente em animais e humanos é a anemia. Este sintoma é caracterizado pela palidez das mucosas visíveis devido à depauperização das reservas de ferro do organismo que reduz a hemoglobina do sangue. Além da anemia, outros sintomas da deficiência de

ferro são a perda de apetite (anorexia), crescimento retardado, apatia e cansaço (Rosa, 1991).

Nas plantas, as concentrações excepcionalmente altas de Ni, Cu, Co, Cr, Zn, Mo e Mn podem causar deficiência de Fe (Malavolta, 2006). Em função de o ferro não ser translocado dentro da planta, os sintomas aparecem primeiro nas folhas jovens. A deficiência severa pode tornar toda a planta amarelada ou esbranquiçada. Outros fatores são aceitos como acelerador do problema, como o excesso de fósforo do solo, uma combinação de pH elevado, altas doses de calcário, baixas temperaturas e altos níveis de bicarbonato (Lopes, 1989).

2.5.5.5 Alumínio e bário

Elementos de ocorrência natural, como Si, Al, Na, Sn, Co, Pb, Ag, Cr, Sr e BA, podem se acumular nos tecidos vegetais, mesmo não sendo essenciais ou requeridos pelas plantas, sendo chamados de elementos acessórios. O alumínio não é considerado um elemento essencial, mas as plantas contêm de 0,1 a 500 ppm (Malavolta, 2006; Taiz & Zeiger, 2009). No caso do milho, Malavolta (2006), citando Latshaw & Miller (1924) e Nelson (1956), afirma que o teor deste elemento nos grãos chega a 0,023%.

O Al é o cátion mais abundante na crosta terrestre, com participação na estrutura de vários minerais primários. A liberação de Al da fase sólida para a fase líquida do solo está diretamente ligada ao processo de acidificação do solo. Quando na solução do solo, os íons Al^{3+} sofrem processo de hidrólise, tornando-se tóxicos às plantas (Faquin, 2005).

Além do efeito fitotóxico das formas catiônicas solúveis, o Al está implicado na redução da disponibilidade e absorção de P do solo e também da inibição competitiva da absorção de nutrientes catiônicos, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} e micronutrientes. O Al torna as raízes mais curtas e grossas; como consequência, há redução de sua proliferação, reduzindo a capacidade de

absorção de água e de nutrientes presentes no solo. O Al apresenta também ação danosa sobre as membranas celulares, reduzindo drasticamente a sua permeabilidade. O elemento concentra-se, preferencialmente, no núcleo e o sítio primário de ligação é o grupo fosfato do DNA, que reduz a atividade de replicação e de transcrição (Faquin, 2005).

Dentre os mecanismos propostos de tolerância, citam-se: alteração do pH induzida na rizosfera, reduzindo a solubilidade e a absorção do Al; sua complexação por mucilagem no sistema radicular e mecanismos de tolerância interna, pela complexação do elemento por compostos orgânicos (Faquin, 2005).

Ca e bário competem pelos mesmos sítios de absorção na planta. Plantas de tabaco acumulam bário predominantemente nas raízes, sendo seguidas por folhas mais velhas, folhas médias e folhas mais novas. A correlação entre Ca x Ba é igual a 0,689, em análise em plantas coletadas no deserto de Mojave. Há a tendência de o Ba se acumular nas raízes (Wallace & Romney 1971).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Ambientes

Os experimentos foram instalados em cinco ambientes, como demonstrado na Tabela 11.

TABELA 11 Caracterização dos ambientes avaliados.

| Amb.* | Localização | Lat. | Long. | Adubação de plantio** (kg/ha de NPK) | Adubação de cobertura (kg/ha de N) |
|-------|--------------------|--------|--------|--------------------------------------|------------------------------------|
| SLF | Sete Lagoas, MG | 19°46' | 49°25' | 300 (8-28-16) | 140 |
| SLBN | Sete Lagoas, MG | | | 400 (4-20-20) | 0 |
| SLAN | Sete Lagoas, MG | | | 400 (4-20-20) | 100 |
| PLANA | Planaltina, GO | 15°47' | 47°55' | 400 (4-30-16) | 400 |
| SAGO | S. A. de Goiás, GO | 16°67' | 49°25' | 400 (4-30-16) | 400 + Zn 0,5 |

* SLF: Sete Lagoas Fértil; SLBN: Sete Lagoas Baixo N; SLAN: Sete Lagoas Alto N; ** adubação de plantio; Abub. Cob: adubação de cobertura.

Estes ambientes fizeram parte do Ensaio Nacional de Variedades, safra 2004/2005 e foram aproveitados para avaliação do potencial dessas variedades para teores de nutrientes, conforme demanda de pesquisa gerada pelo Programa Harvest Plus.

3.2 Variedades

Foram utilizadas 36 variedades: AL Alvorada, AL Bandeirante, AL Bianco, AL Ipiranga, AL Piratininga, AL 34, BR 106, BR 473, BR Sertanejo, BR São Vicente, BRS 2020, sendo este um híbrido duplo usado como testemunha, BRS 4150, BRS Saracura, BRS Eldorado, BRS Planalto, Sindentado, Encapa 202, Missões, SHS 3031, UFVM 100, UFVM 200, BR 473 cIII, Fundacep 34, Fundacep 35, Sintético Nacional, Sintético Elite, BR 451, BR São Francisco, BR Asa Branca, BRS Assum Preto, BRS Caatingueiro, BRS Sol da Manhã, CMS 101, CMS 102, CMS 103 e CMS 104. As já disponíveis no mercado (26 variedades) estão caracterizadas na Tabela 12 e o restante (10 variedades) ainda se encontra em fase de avaliação, não possuindo tais descritores ainda.

TABELA 12 Características agrônômicas das variedades de milho disponíveis no mercado.

| Variedades | Nível Tecnol | Ciclo | Uso | Cor | Textura | Ac | A. E. | A. P. | Região |
|-----------------|--------------|----------|------------|--------|---------|-----|-------|-------|--------------------|
| BR 106 | B/M | SMP | G/SPI | AM | SMDENT | M | 1.4 | 2.4 | BRASIL exc.RS |
| BR 451 | B/M | P | GRÃO | BRANC | SMDENT | M | 1.2 | 2.2 | BRASIL |
| BR 473 | B/M | SMP | GRÃO | AM | SMDURO | M | 1.4 | 2.4 | BRASIL |
| BRS 4150 | B/M | P | GRÃO | AM/AL | SMDURO | M | 1.35 | 2.4 | SUL |
| BRS Saracura | B/M | P | G/SPI | LR | SMDURO | M | 1.15 | 2.2 | Brasil EXC RS SC |
| Sol-da-manhã | B/M | P | G/SPI | AL | DURO | M | 1.2 | 2.3 | BRASIL |
| BRS Sertanejo | B/M | SMP | GRÃO | AM | SMDURO | M | 1.2 | 2.4 | NE |
| BRS S. Francisc | B/M | P | GRÃO | AM/LR | SMDENT | M | 1.1 | 2.2 | NE |
| BRS Asa Branca | B/M | P | GRÃO | AM/LR | SMDURO | M | 1 | 2 | NE |
| BRS Assum Preto | B/M | SP | GRÃO | AM/AL | SMDURO | M | 0.9 | 1.8 | NE |
| Caatingueiro | B/M | SP | GRÃO | AM | SMDURO | B | 0.8 | 1.8 | NE |
| BRS Planalto | B/M | P | GRÃO | AM/LR | SMDURO | M | 1.1 | 1.75 | SUL |
| FUNDACEP 34 | B/M | P | GRÃO | AM/AL | SMDURO | SI | 1.16 | 2.2 | SUL |
| FUNDACEP 35 | B/M | P | GRÃO | AM/AL | SMDURO | SI | 1.15 | 2.2 | SUL |
| SHS 3031 | M e B/M | P | G/SPI | AL | SMDURO | A | 1.3 | 2.4 | SUL,SE,CO,NE,N |
| AL Piratininga | B/M | N | G/SPI | AM/AL | SMDENT | M | 1,25 | 2,3 | BRASIL |
| UFV M 100 | B/M | N | G/SPI/M.V* | AM/AL | DENTADO | A | - | - | SE |
| AL 25 | SMP | G/SPI | AM/AL | SMDENT | M | B/M | 1,30 | 2,30 | BRASIL |
| AL 34 | SMP | G/SPI | AL | SMDURO | M | B/M | 1,35 | 2,35 | BRASIL |
| BRS 2020 | M | N/SG/SPI | LR | SMDURO | A | B/M | 1,14 | 2,16 | BRASIL |
| BRS MISSÕES | SI | P | GRÃO | AM | DENTADO | SI | SI | SI | RS, SC e Sul do PR |
| AL Bandeirante | N | G/SPI | AL | SMDURO | M | B/M | 1,25 | 2,25 | BRASIL |
| AL Bianco | SMP | GRÃOS | BRANCO | SMDURO | M | B/M | 1,30 | 2,30 | BRASIL |
| FUNDACEP 35 | P | GRÃOS | AM/AL | SMDURO | M | B/M | 1,08 | 2,2 | SUL |

Nível de tecnologia : A - alto; M - média; B - baixa; Ciclo : HP - hiperprecoce; SP - superprecoce; P - precoce; SMP - semiprecoce; N - normal; Uso : G - grãos; SPI - silagem da planta inteira; SGU - silagem de grãos úmidos; MV - milho verde; Cor do Grão : AL - alaranjado; LR - laranja; AV - avermelhado; AM - amarela; textura do grão : SMDENT - semidentado; SMDURO - semiduro; resistência ao acamamento : A - alta; M - média; MA - média a alta; SI - sem informação. Fonte: Cruz & Pereira Filho (2010).

3.3 Análise do solo

Os resultados das análises de solo, em cada ambiente, encontram-se na Tabela 13. Para interpretação das análises, foram seguidos os critérios da Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, segundo Alvarez et al. (1999). Para SLF e PLAN, não foi possível a análise para micronutrientes, comprometendo a discussão destes teores para estes dois ambientes.

TABELA 13 Resultados das análises de solos em cada ambiente.

| Característica* | Unidade | Ambientes** | | | | |
|------------------|----------------------|-------------|------|------|-------|-------|
| | | SLF | SLBN | SLAN | PLAN | SAGO |
| pH | - | 6,4 | 6,1 | 6,0 | 5,5 | 5,8 |
| H+Al | cmol/dm ³ | 3,03 | 4,08 | 4,41 | 3,9 | 5,06 |
| Al ³⁺ | | 0,0 | 0,10 | 0,15 | 0,2 | 0,00 |
| Ca ²⁺ | | 8,7 | 4,21 | 4,27 | 2,4 | 2,88 |
| Mg ²⁺ | | 0,86 | 0,84 | 0,81 | 0,5 | 1,07 |
| SB | | 9,82 | 5,37 | 5,38 | 3,11 | 4,25 |
| CTC | | 12,85 | 9,45 | 9,79 | 7,01 | 9,31 |
| K | mg/dm ³ | 105 | 124 | 116 | 85 | 120 |
| P | | 47 | 7 | 11 | 12,5 | 6,7 |
| M.O. | dag/kg | 4,07 | 3,61 | 3,35 | 3,2 | 2,1 |
| V | % | 76,42 | 57 | 55 | 44,36 | 45,65 |
| m | | 0 | 2 | 3 | 6,04 | 0 |
| Zn | mg/dm ³ | - | 3,0 | 3,0 | - | 4,80 |
| Cu | | - | 1,0 | 0,80 | - | 2,10 |
| Mn | | - | 24,5 | 24,5 | - | 62 |
| Fe | | - | 47,5 | 49,0 | - | 41 |

*Característica: pH em água, P – K – Fe – Zn – Mn – Cu – Extrator Melich 1; Ca²⁺ – Mg²⁺ – Al³⁺ – Extrator : KCl 1N; H + Al – Extrator: SMP; SB = soma de bases trocáveis; CTC: capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V = índice de saturação de bases; m: saturação de alumínio; Mat. Org. (MO) – oxidação: Na₂Cr₂O₇ 4N + H₂SO₄ 10N. Ambientes**: SLFE – Sete Lagoas Fértil; SLBN – Sete Lagoas Baixo N; SLAN – Sete Lagoas Alto N; PLAN – Planaltina, DF; SAGO – Santo Antônio de Goiás, GO.

3.4 Análise de minerais

As amostras analisadas foram obtidas com a retirada de alguns grãos por espiga para a composição de uma amostra composta de cada parcela. Esse procedimento foi necessário pelo fato de 35 das que foram avaliadas serem variedades e apenas um híbrido duplo (BRS 2020).

A análise dos grãos de milho por espectrometria de plasma foi utilizada para a determinação das concentrações totais dos elementos ferro, zinco, cobre, manganês, alumínio, potássio, cálcio, magnésio, fósforo e bário.

Todo o procedimento utilizado na análise foi descrito por Silva (1999): as amostras dos grãos foram lavadas com água deionizada em uma peneira de plástico e secas com papel toalha. Logo após, as amostras foram secadas em estufa com circulação de ar, a 80°C, por 3 a 4 dias. Depois, foram moídas em moinho ciclone de aço inoxidável, com peneira de 0,5 mm.

Após esses procedimentos, foi realizada a digestão das amostras: foram transferidos 0,500 g dos grãos moídos para tubos de 100 ml, sendo adicionados 5 ml de mistura de ácido nítrico e ácido perclórico concentrados (4:1). Foi também preparada uma prova em branco (o mesmo procedimento, sem adicionar amostra), para a verificação de possíveis contaminações.

Aguardaram-se, no mínimo, 5 horas para se fazer a digestão. O bloco digestor foi ligado à temperatura de 150°C. O tempo de digestão, à temperatura de 150°C, foi de 40 minutos. Após este tempo, a temperatura do bloco digestor foi aumentada para 200°C, até clareamento total das amostras (aproximadamente 30 minutos), devido à destruição de matéria orgânica, ficando os elementos presentes dissolvidos em meio ácido. As amostras foram retiradas do bloco. Depois de frias, as soluções foram transferidas para tubos tipo Falcon e o volume foi completado para 15 ml, com água deionizada, seguindo-se homogeneização e vedamento dos frascos. Logo após, foi realizada leitura dos espectros em espectrômetro de plasma da seguinte maneira: preparo dos padrões

multielementares seguindo as faixas de trabalho: ferro, zinco, manganês, cobre, alumínio, bário: 0,100; 0,500; 1,00; 2,00; 5,00 mg/L; potássio, cálcio, magnésio, fósforo, 0,500; 2,50; 5,00; 10,0; 25,0 mg/L. A leitura foi efetuada em espectrômetro de plasma de acordo com os procedimentos padrões do equipamento, fazendo as diluições necessárias das amostras. Após a leitura, foi descontado o valor da prova em branco.

Para o cálculo da concentração dos elementos, em mg.L^{-1} , na solução ácida, foi feita a curva padrão de cada um na faixa de trabalho e as correções de diluição das amostras. Utilizando a massa de amostra pesada, foi definida a concentração do elemento na amostra seca a 80°C , em mg/kg .

3.5 Planejamento experimental e análise dos dados

Os experimentos foram conduzidos no delineamento em látice simples 6×6 , sendo a parcela constituída de duas fileiras de 4 m, com 20 plantas/fileira, com espaçamento entre fileiras de 80 cm e entre plantas de 20 cm.

Os dados dos teores de minerais, como também da produtividade de grãos (kg/ha), foram submetidos à análise de variância individual e conjunta, seguindo a metodologia apresentada por Ramalho et al. (2000).

Para o estudo da adaptabilidade e estabilidade das variedades de milho empregaram-se as metodologias propostas por Annichiarico (1992), com base no índice de confiabilidade e por Wricke (1965), baseada na ecovalência.

O método de Annichiarico (1992) estima o índice de confiança na adoção de cada variedade, ou seja, avaliar o risco de cultivar uma determinada variedade em função dos ambientes em que foi avaliada. O índice de confiança (I_i) foi obtido pelo seguinte estimador (Annichiarico, 1992):

$$I_i = \bar{Y}_i - Z_{(1-\alpha)} S_i$$

em que

I_i : índice de confiança (%);

\bar{Y}_i : média geral da variedade i , em porcentagem, em relação ao ambiente;

Z : percentil $(1-\alpha)$ da função de distribuição normal acumulada;

α : nível de significância. Foi adotado o nível de 0,25.

S_i : desvio padrão dos valores percentuais associados a cada variedade i .

A contribuição de cada variedade para a interação GxA foi obtida pela estimativa da ecovalência (Wricke, 1965), expressa por:

$$W_i^2 = \sum (Y_{ij} - \bar{Y}_i - \bar{Y}_{.j} + \bar{Y}_{..})^2,$$

em que

W_i^2 : ecovalência associada à variedade i ;

Y_{ij} : média fenotípica observada da variedade i no ambiente j ;

\bar{Y}_i : média da variedade i ;

$\bar{Y}_{.j}$: média do ambiente j ;

$\bar{Y}_{..}$: média geral.

Foram estimados, também, os coeficientes de correlação de Pearson entre os caracteres estudados (teores de minerais nos grãos e produtividade de grãos).

As análises estatísticas foram realizadas no Programa Genes (Cruz, 2006).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Características do solo

Com relação à acidez ativa ou pH, observou-se variação entre os ambientes, com pH variando de 5,5, em PLAN a 6,4, em SLF, sendo classificados agronomicamente como de bom a alto, respectivamente.

A acidez potencial (H+Al), aquela que abrange a acidez trocável ou Al trocável e a acidez não trocável (H⁺), variou de 3,03, em SLF a 5,06, em SAGO, ficando dentro da amplitude classificada como média; acima disso, seria classificada como nível crítico. Já a acidez trocável, representada por Al³⁺, foi muito baixa em todos os ambientes. Esta acidez se refere ao alumínio trocável e adsorvido nos coloides minerais e orgânicos do solo, sendo nociva ao desenvolvimento das culturas.

O Ca trocável variou de 2,4 a 8,7, sendo classificado de bom a muito bom e, assim como na acidez, os ambientes PLAN e SAGO apresentaram os níveis mais baixos. O que chama a atenção é o elevado nível apresentado por SLF. Já o magnésio trocável teve nível variando de médio a bom.

Tanto a SB (3,11 a 9,82 cmol/dm³) como a CTC (7,01 a 12,85 cmol/dm³) variaram de médio a muito bom. Estes dois parâmetros refletem a soma de cálcio, magnésio e potássio no complexo de troca de cátions do solo e a capacidade do solo em reter cátions próximos do pH 7,0, respectivamente. Assim, um solo com capacidade mais alta de troca de cátions, em geral, tem maior reserva de nutrientes minerais (Taiz & Zeiger, 2009).

O potássio variou de 85 (PLAN) a 124 mg/dm³ (SLBN), sendo classificado como bom. Enquanto isso, a saturação por Al (m) foi muito baixa em todos os ambientes avaliados.

O fósforo teve grande amplitude, variando de 6,7 mg/dm³, em SAGO a 47 mg/dm³, em SLF, sendo classificado como muito baixo a bom, respectivamente.

Com relação à matéria orgânica, todos os ambientes tiveram teor médio. Em contrapartida, os ambientes apresentaram grande variação na saturação por base (V), de 44,36% em PLAN a 76,42% em SLF. Esta característica indica qual a porcentagem das cargas negativas, passíveis de troca a pH 7,0, estão ocupadas por Ca, Mg e K, em comparação com aquelas ocupadas por H⁺ e Al³⁺. Este parâmetro é utilizado para comparar solos considerados férteis (V>50%) e solos de menor fertilidade (V<50%). Assim, com relação à fertilidade do solo, os ambientes SLF, SLBN e SLAN foram mais favoráveis às variedades, se comparados com SAGO e PLAN. Nota-se que, apesar de SLBN, SLAN e SLF serem localizados na região do cerrado, assim como SAGO e PLAN, eles foram quimicamente bem distintos entre si, demonstrando como os diferentes manejos das áreas experimentais propiciou um efeito considerável na fertilidade dos solos de mesmo bioma.

Com relação aos teores de micronutrientes, os ambientes amostrados de Sete Lagoas, MG (SLBN, SLAN) e SAGO apresentaram níveis muito altos.

Vale ressaltar que, apesar de três dos cinco ambientes estudados estarem situados em Sete Lagoas, MG, a análise de solo mostrou acentuada discrepância nos atributos químicos de cada um, justificando o uso desses ambientes no estudo dos teores, correlações e estabilidade de minerais nos grãos de milho.

4.2 Características agronômicas

Os resumos das análises de variância por ambiente para a produtividade de grãos estão apresentados na Tabela 14. Nota-se que a precisão experimental, avaliada pelo coeficiente de variação (CV), variou de 5,0% a 20,5%. É expressiva também a variação na produtividade média de cada ambiente, devido

às diferenças na fertilidade do solo e, principalmente, às diferentes adubações realizadas.

TABELA 14 Resumo da análise de variância da produtividade de grãos (kg/ha), por ambiente do Ensaio Nacional de Variedades, safra 2004/2005.

| Ambientes | PG (kg/ha) | CV (%) | QM Erro |
|-----------|------------|--------|--------------|
| SLF | 7.976 | 14,4 | 1.319.295,74 |
| SLBN | 4.782 | 20,5 | 960.877,45 |
| SLAN | 6.079 | 17,6 | 1.144.645,75 |
| PLAN | 10.770 | 5,0 | 289.957,57 |
| SAGO | 9.179 | 8,9 | 667.398,47 |

O resumo da análise de variância conjunta envolvendo as fontes de variação ambientes, variedades, interação variedades x ambientes é apresentada na Tabela 15. Observa-se a significância, pelo teste de F ($P < 0,01$), para todas essas fontes de variação.

A significância para ambientes (A) pode ser atribuída, em grande parte, às diferenças nos níveis de fertilidade nos solos de cada local e, sobretudo, aos diferentes manejos de adubação aplicados. Com relação às variedades, sua significância pode ser explicada pelo fato de serem bem distintas agronomicamente e recomendadas para diferentes regiões do país.

A significância da interação variedades x ambientes indica que o comportamento das variedades não foi coincidente nos diferentes ambientes. Essa é a principal dificuldade encontrada pelos melhoristas na recomendação de cultivares.

Como a interação variedades x ambientes foi significativa, uma primeira alternativa que poderia ser ventilada para atenuar seu efeito seria identificar variedades específicas para cada local ou tipo de adubação utilizada. Contudo, em se tratando da cultura do milho, uma alternativa mais interessante é o

emprego de métodos quantitativos que propiciem a identificação de variedades adaptadas e de comportamento estável.

TABELA 15 Resumo da análise de variância conjunta da produtividade de grãos (kg/ha) dos experimentos do Ensaio Nacional de Variedades, safra 2004/2005.

| FV | GL | QM |
|----------------|-----|-----------------|
| Ambientes (A) | 4 | 1850202698,19** |
| Cultivares (C) | 35 | 84461157,98** |
| A x C | 140 | 7788312,25** |
| Erro médio | 175 | 876435,00 |
| Média (kg/ha) | | 7.181,91 |
| CV (%) | | 9,78 |

** significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste F.

Para a produtividade de grãos (Tabela 16), observou-se, pelas estimativas de W_i^2 , que, em geral, as variedades mais produtivas contribuíram pouco para a interação. A variedade BR São Vicente destacou-se como a mais instável ($W_i^2 = 19,3\%$), além de possuir a menor produtividade absoluta média, evidenciando que o seu desempenho agrônômico não acompanhou o desempenho médio de todas as variedades, nos diferentes ambientes avaliados.

Observa-se, pelos dados da Tabela 16, que o maior índice de confiança foi o da variedade AL Piratininga. Considerando o nível de 75% de probabilidade ($\alpha = 0,25$), essa variedade, na pior das hipóteses, terá desempenho de 25,2% acima da média dos ambientes testados. Esta variedade, além de possuir tal desempenho, contribuiu pouco para a interação, pois sua ecovalência foi de apenas 2,4%. Seu desempenho não diferiu estatisticamente do BRS 2020, híbrido duplo comercial que produziu, em média, 23,3% acima da média dos ambientes e contribuiu apenas com 1,1% para a interação. Isso demonstra o alto potencial de algumas variedades frente a alguns tipos de híbridos, aliando produtividade e estabilidade no sentido agrônômico.

TABELA 16 Produção média de grãos (kg/ha) de cada variedade com respectivos índices de confiança (I_i) e ecovalências (W_i^2).

| Variedade | Produção grãos (kg/ha)* | I_i (%) | W_i^2 | W_i^2 (%) |
|--------------------|-------------------------|-----------|--------------|-------------|
| AL Piratininga | 9.102 a | 125,2 | 16739117,0 | 2,4 |
| BRS 2020 | 8.916 a | 123,3 | 7667637,9 | 1,1 |
| CMS 103 | 8.742 a | 119,6 | 20537646,8 | 3,0 |
| BR 106 | 8.707 a | 120,4 | 5525000,0 | 0,8 |
| AL Bianco | 8.499 a | 116,8 | 10728153,9 | 1,6 |
| Fundacep 35 | 8.275 a | 114,3 | 6095326,8 | 0,9 |
| AL Ipiranga | 8.232 a | 111,5 | 25095181,7 | 3,6 |
| CMS 102 | 8.123 a | 110,0 | 35008274,8 | 5,1 |
| BRS Eldorado | 8.016 a | 108,4 | 15455956,1 | 2,2 |
| CMS 101 | 7.897 a | 108,1 | 12661910,0 | 1,8 |
| Fundacep 34 | 7.864 a | 107,2 | 8388877,2 | 1,2 |
| SHS 3031 | 7.776 a | 105,2 | 15328854,0 | 2,2 |
| UFVM 100 | 7.636 a | 102,3 | 19792298,4 | 2,9 |
| Encapa 202 | 7.608 a | 103,1 | 16390452,8 | 2,4 |
| Missões | 7.553 a | 101,8 | 12326163,5 | 1,8 |
| AL Alvorada | 7.531 a | 101,3 | 28738436,5 | 4,2 |
| BRS 4150 | 7.530 a | 102,9 | 24746034,2 | 3,6 |
| CMS 104 | 7.497 a | 102,6 | 4678756,7 | 0,7 |
| Sintético Nacional | 7.274 a | 98,4 | 13453580,0 | 1,9 |
| BRS Sol da Manhã | 7.261 a | 98,9 | 8319505,0 | 1,2 |
| BR Sertanejo | 7.225 a | 94,3 | 32081922,4 | 4,6 |
| Sindentado | 7.173 a | 98,7 | 2727385,7 | 0,4 |
| AL Bandeirante | 7.130 a | 95,7 | 19151386,7 | 2,8 |
| BRS Planalto | 6.907 a | 92,0 | 15332562,2 | 2,2 |
| UFVM 200 | 6.696 b | 90,2 | 28713618,4 | 4,2 |
| BR 451 | 6.600 b | 89,6 | 3997518,1 | 0,6 |
| BR São Francisco | 6.553 b | 89,2 | 28518035,1 | 4,1 |
| BR 473 | 6.550 b | 88,5 | 6719018,5 | 1,0 |
| BR Asa Branca | 6.521 b | 89,2 | 5833917,2 | 0,8 |
| BR 473 CIII | 6.489 b | 88,9 | 24478286,1 | 3,5 |
| BRS Saracura | 6.013 b | 80,9 | 5897992,8 | 0,9 |
| BRS Assum Preto | 5.935 b | 80,9 | 2077793,5 | 0,3 |
| BRS Caatingueiro | 5.814 b | 80,3 | 28142163,1 | 4,1 |
| AL 34 | 5.574 b | 74,2 | 12444223,9 | 1,8 |
| Sintético Elite | 5.218 b | 71,6 | 34672432,4 | 5,0 |
| BR São Vicente | 2.114 c | 28,1 | 133324735,7 | 19,3 |
| Total | - | - | 691790155,22 | 100,0 |

*Médias seguidas de mesma letra na coluna pertencem ao mesmo grupo, pelo teste de Scott-Knott (1974), a 5% de probabilidade.

Observou-se que, embora tenha ocorrido interação das cultivares x ambientes, algumas se destacaram na maioria dos ambientes (Tabela 17). Cita-se como exemplo o comportamento da variedade AL Piratininga que esteve no grupo das mais produtivas nos cinco ambientes analisados. Esta variedade está no mercado desde 1999, sendo uma versão melhorada da variedade AL 25, lançada pela Coordenadoria de Assistência Técnica Integral do Estado de São Paulo (CATI-SP) (Coordenadoria de Assistência Técnica Integral - CATI, 2009).

Outras cultivares que também se destacaram foram: BRS 2020, CMS 103, BR 106, AL Bianco, Fundacep 35, AL Ipiranga e CMS 102. Dentre as cultivares mais produtivas encontra-se o híbrido duplo BRS 2020, sendo a segunda no ranking, destacando-se na maioria dos ambientes. Outra variedade de relevante desempenho é a BR 106, uma variedade expressiva no mercado de sementes pelas suas características de rusticidade e adaptabilidade aos mais diferentes ambientes em todo o território nacional (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa, 2009). Esse fato foi comprovado pela sua baixa contribuição relativa para a interação ($W_i^2 = 0,8\%$) e concomitante baixo risco de adoção ($I_i = 120,4$), conforme dados da Tabela 16.

TABELA 17 Produtividades médias (kg/ha) de cada variedade nos ambientes testados, com os respectivos testes de médias.

| Variedades | Ambientes* | | | | |
|--------------------|------------|--------|--------|----------|--------|
| | SLF | SLBN | SLAN | PLANA | SAGO |
| AL Alvorada | 5.999d | 6.065a | 5.729c | 11.849e | 8.012c |
| AL Bandeirante | 6.330c | 4.230b | 7.059a | 11.077f | 6.952d |
| AL Bianco | 7.820b | 6.129a | 6.620b | 12.351c | 9.575a |
| AL Ipiranga | 7.139c | 6.073a | 6.060b | 12.680c | 9.206a |
| AL Piratininga | 9.191a | 6.011a | 7.797a | 13.421a | 9.089a |
| AL 34 | 4.251d | 3.898b | 4.501d | 9.408h | 5.810e |
| BR 106 | 8.440a | 6.368a | 7.338a | 12.705c | 8.682b |
| BR 473 | 6.648c | 3.997b | 5.040c | 9.912g | 7.155d |
| BR Sertanejo | 6.360c | 3.990b | 5.476c | 11.788e | 8.612b |
| BR São Vicente | 1.846e | 1.709c | 2.361e | 3.219l | 1.437f |
| BRS 2020 | 8.799a | 6.448a | 7.648a | 12.925 b | 8.761b |
| BRS 4150 | 7.734b | 4.649b | 7.315a | 10.201g | 7.750c |
| BRS Saracura | 5.462d | 3.932b | 4.377d | 9.411 h | 6.881d |
| BRS Eldorado | 7.483c | 4.591b | 7.242a | 11.671e | 9.093a |
| BRS Planalto | 6.408c | 4.380b | 4.952c | 11.382e | 7.413c |
| Sindentado | 6.561c | 5.045b | 5.658c | 10.898f | 7.704c |
| Encapa 202 | 6.872c | 4.487b | 7.491a | 10.928f | 8.262c |
| Missões | 7.697b | 4.323b | 6.343b | 11.388e | 8.016c |
| SHS 3031 | 7.015c | 4.707b | 6.390b | 11.580e | 9.189a |
| UFVM 100 | 7.218c | 4.300b | 7.054a | 11.991d | 7.617c |
| UFVM 200 | 5.233d | 4.763b | 6.660b | 10.466f | 6.358e |
| BR 473 CIII | 6.959c | 4.167b | 5.541c | 8.899i | 6.877d |
| Fundacep 34 | 7.390c | 4.676b | 7.142a | 11.542e | 8.568b |
| Fundacep 35 | 7.451c | 5.966a | 6.891a | 12.506c | 8.562b |
| Sintético Nacional | 6.138d | 4.419b | 6.534b | 10.744f | 8.533b |
| Sintético Elite | 5.180d | 3.977b | 3.962d | 7.457k | 5.515e |
| BR 451 | 5.870d | 4.190b | 5.227c | 10.118g | 7.594c |
| BR São Francisco | 6.887c | 3.908b | 6.162b | 8.915i | 6.894d |
| BR Asa Branca | 5.762d | 4.684b | 5.065c | 9.893g | 7.199d |
| BRS Assum Preto | 5.287d | 3.657b | 5.072c | 9.181h | 6.479d |
| BRS Caatingueiro | 5.465d | 4.557b | 4.796d | 8.216j | 6.035e |
| BRS Sol da Manhã | 6.425c | 4.417b | 6.691b | 10.600f | 8.170c |
| CMS 101 | 8.050b | 5.180b | 6.802b | 11.842e | 7.611c |
| CMS 102 | 7.768b | 6.717a | 6.161b | 12.467c | 7.501c |
| CMS 103 | 6.968c | 6.854a | 7.619a | 12.675c | 9.595a |
| CMS 104 | 6.904c | 4.774b | 6.062b | 11.401e | 8.344c |
| Média | 7.976 | 4.782 | 6.079 | 10.770 | 9.179 |

*SLFER: Sete Lagoas Fértil; SLBN: Sete Lagoas Baixo N; SLAN: Sete Lagoas Alto N; PLANA: Planaltina, DF; SAGO: Santo Antônio de Goiás, GO. Médias seguidas de mesma letra na coluna pertencem ao mesmo grupo, pelo teste de Scott-Knott (1974), a 5% de probabilidade.

4.3 Teores de minerais em grãos de milho

Em grãos de milho constatou-se diferença significativa ($P < 0,05$) nos teores de minerais, entre as variedades, para cinco dos dez elementos analisados (Tabela 18). Dentre os elementos que não apresentaram significância, é importante ressaltar a falta de variabilidade para o Fe, por se tratar de um dos elementos-alvo do programa Harvest Plus.

TABELA 18 Resumo da análise de variância conjunta dos teores de minerais em grãos de milho.

| F.V. | Al | Ca | Mg | P | K | Cu | Fe | Mn | Zn | Ba |
|----------------|------|------|--------|--------|--------|------|------|-----|------|------|
| Variedades (V) | ns | ** | ** | ** | ns | ns | ns | ** | ** | ns |
| Ambientes (A) | * | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** |
| V x A | ns | ns | ns | * | ns | ns | ns | ** | * | ns |
| CV médio (%) | 30,1 | 15,3 | 10,4 | 9,6 | 18,8 | 18,7 | 17,6 | 9,9 | 8,1 | 32,3 |
| Média (mg/kg) | 15,4 | 60,5 | 984,4 | 2316,7 | 2425,2 | 2,4 | 17,3 | 6,1 | 18,3 | 6,7 |
| Máximo (mg/kg) | 46,2 | 71,1 | 1138,1 | 2637,2 | 2808,6 | 4,41 | 19,2 | 7,3 | 20,6 | 13,7 |
| Mínimo(mg/kg) | 6,54 | 48,8 | 886,8 | 2084,9 | 1998,3 | 1,3 | 14,8 | 5,3 | 16,1 | 2,9 |

Os ambientes apresentaram diferenças significativas para todos os teores de minerais estudados (Tabela 18), indicando que o efeito ambiental exerceu influência sobre estes elementos devido, provavelmente, às diferenças nos atributos químicos do solo e às adubações aplicadas.

O Al apresentou teor mínimo, máximo e médio de 6,54 mg/kg, 46,2 mg/kg e 15,4 mg/kg, respectivamente. O que chama a atenção é a alta magnitude de seu CV, devido, provavelmente, a problemas de contaminação de amostras comuns em análises de minerais.

O macronutriente Ca variou de 48,8 mg/kg a 71,1 mg/kg, com média de 60,5 mg/kg. Estes teores foram semelhantes aos observados por Feil et al. (2005), Menkir (2008), Guimarães et al. (2005) e Faquim (2005).

Para o Mg, obteve-se teor mínimo de 886,8 mg/kg, máximo de 1.138,1 mg/kg e médio de 984,4 mg/kg. Estes teores ficaram dentro da variação observada por Guimarães et al. (2005); Thomas (1963) e Gorsline et al. (1964).

Com relação ao P, sua variação foi de 2.084,9 a 2.637,2 mg/kg, tendo média de 2.316,7 mg/kg. Na literatura, encontra-se ampla variação, indo de 600 a 6.600 mg/kg (Arnold et al., 1977; Faquim, 2005; Gorsline et al., 1967; Halim et al., 1968; Menkir, 2008; Thomas, 1963). Assim, é grande a variabilidade do teor de P nos grãos de milho, sendo este um dos principais minerais constituintes e um dos mais estudados.

O K apresentou teor mínimo, médio e máximo de 1.998,3 mg/kg, 2.425,2 mg/kg e 2.808,6 mg/kg, respectivamente, sendo estes valores consideravelmente menores que aqueles já divulgados na literatura, os quais variaram de 3.300 a 7.700 mg/kg (Arnold et al., 1977; Faquim, 2005; Gorsline et al., 1967; Halim et al., 1968; Menkir, 2008; Thomas, 1963).

Os micronutrientes Cu e Mn variaram de 1,3 a 4,4 mg/kg e de 5,3 a 7,3mg/kg, respectivamente. Os valores de Mn ficaram, em geral, menores que os observados por Faquim (2005), Guimarães et al. (2005), Menkir (2008), Gorsline et al. (1964) e Bityutskii et al. (2002).

O teor mínimo de Fe foi de 14,8mg/kg, máximo de 19,2 mg/kg e médio de 17,25 mg/kg. Na literatura, a variação apresentada é bem ampla, indo de 10 a 188 mg/kg (Faquim, 2005; Banziger & Long, 2000; Oikeh et al., 2003b; Guimarães et al., 2005; Maziya-Dixon et al., 2000; Oikeh et al., 2003a; Long et al., 2004; Menkir, 2008; Arnold et al., 1977; Bityutskii et al., 2002).

Os teores de Zn apresentaram variação de 12 a 109 mg/kg, de acordo com Faquim (2005), Halim et al. (1968), Banziger & Long (2000), Oikeh et al. (2003b), Massey & Loeffel (1967), Massey & Loeffel (1966), Guimarães et al. (2005), Maziya-Dixon et al. (2000), Oikeh et al. (2003a), Long et al. (2004), Menkir (2008), Gorsline et al. (1964), Arnold et al. (1977) e Bityutskii et al.

(2002). Neste trabalho, foi detectado teor mínimo de 16,1 e máximo de 20,6 mg/kg, com média de 18,31 mg/kg.

A grande magnitude do CV para o mineral Ba pode ser uma indicação de contaminação durante a sua análise. Os teores mínimo, máximo e médio foram de 2,93; 13,66 e 6,66 mg/kg, respectivamente. Guimarães et al. (2005), analisando dois grupos de linhagens, encontraram variação de 0,0 a 234,9 mg/kg. Os autores comentaram que o problema de contaminação durante a análise poderia ser uma das causas de tamanha variação e de valores tão expressivos.

Na Tabela 19 observam-se os teores médios de Ca e Mg nos grãos das variedades de milho estudadas. Dentre as vinte variedades de maior concentração de Ca nos grãos, a BR Sertanejo se destacou, com teor de 71,1 mg/kg. Já a variedade BR 473 CIII foi a que menos concentrou este elemento em seus grãos, atingindo 48,8 mg/kg.

Para o MG, a variedade que mais se destacou, dentre as de maior concentração, foi a BRS Caatingueiro, com 1.138 mg/kg e a que menos concentrou Mg em seus grãos foi a variedade AL Ipiranga, com 887 mg/kg.

TABELA 19 Teores médios de Ca e Mg nos grãos de variedades de milho.

| Variedades | Ca (mg/kg)* | Mg (mg/kg) |
|--------------------|-------------|------------|
| AL Alvorada | 62,3a | 998b |
| AL Bandeirante | 60,4a | 1.006a |
| AL Bianco | 54,1b | 970b |
| AL Ipiranga | 50,1b | 887b |
| AL Piratininga | 54,3b | 932b |
| AL 34 | 59,2b | 910b |
| BR 106 | 69,0a | 961b |
| BR 473 | 68,3a | 1.027a |
| BR Sertanejo | 71,1a | 1.057a |
| BR São Vicente | 65,6a | 1.034a |
| BRS 2020 | 55,3b | 990b |
| BRS 4150 | 56,3b | 980b |
| BRS Saracura | 62,7a | 1.049a |
| BRS Eldorado | 64,2a | 942b |
| BRS Planalto | 62,6a | 966b |
| Sindentado | 57,4b | 902b |
| Encapa 202 | 59,1b | 956b |
| Missões | 60,9a | 927b |
| SHS 3031 | 56,9b | 972b |
| UFVM 100 | 57,9b | 935b |
| UFVM 200 | 62,1a | 942b |
| BR 473 CIII | 48,8b | 972b |
| Fundacep 34 | 66,2a | 1.037a |
| Fundacep 35 | 58,9b | 929b |
| Sintético Nacional | 65,0a | 967b |
| Sintético Elite | 61,0a | 917b |
| BR 451 | 64,2a | 1.129a |
| BR São Francisco | 61,9a | 954b |
| BR Asa Branca | 56,6b | 1.011a |
| BRS Assum Preto | 58,8b | 1.099a |
| BRS Caatingueiro | 66,5a | 1.138a |
| BRS Sol da Manhã | 62,6a | 1.086a |
| CMS 101 | 62,1a | 1.045a |
| CMS 102 | 56,4b | 940b |
| CMS 103 | 50,3b | 910b |
| CMS 104 | 67,2a | 963b |

*Médias seguidas de mesma letra na coluna pertencem ao mesmo grupo, pelo teste de Scott-Knott (1974), a 5% de probabilidade.

Para Al, Ca, Mg, K, Cu, Fe e BA, a interação genótipos x ambientes não foi significativa (Tabela 18), indicando que não houve mudança significativa na posição relativa das variedades quanto às concentrações desses minerais nos diversos ambientes testados. Para P, Mn e Zn, esta interação foi significativa, indicando que, para esses minerais, será mais difícil o desenvolvimento de variedades que apresentem altos teores em diversas condições ambientais.

No caso do P, os destaques, dentre as onze variedades que mais concentraram esse elemento em seus grãos, foi a BRS Assum Preto, com 2.637,2 mg/kg, seguida da BRS Caatingueiro e BR São Vicente, que, coincidentemente, apresentaram baixo desempenho na produção de grãos.

Estas variedades, segundo o índice de confiança, concentraram em seus grãos 11,8%, 10,6% e 7,7%, em média, a mais de P em seus grãos que a média ambiental. Ao mesmo tempo, essas variedades contribuíram pouco para a interação, como demonstrado pelos seus valores de ecovalência (W_i^2) de 2,6%, 1,35 e 4,1%, respectivamente.

A variedade que mais contribuiu para a interação foi a Fundacep 34, com $W_i^2 = 10,2\%$ e teor médio de 2.274,1 mg/kg ficando, em média, 5,4% a menos que a média ambiental.

TABELA 20 Teores médios de P (mg/kg) de cada variedade com os respectivos índices de confiança (I_i) e ecovalências (W_i).

| Variedade | P (mg/kg)* | I_i (%) | W_i^2 | W_i^2 (%) |
|--------------------|------------|-----------|------------|-------------|
| BRS Assum Preto | 2637,2 a | 111,8 | 1236530,0 | 2,6 |
| BRS Caatingueiro | 2595,0 a | 110,6 | 617575,6 | 1,3 |
| BR São Vicente | 2563,0 a | 107,7 | 1908576,5 | 4,1 |
| BRS Sol da Manhã | 2535,5 a | 107,8 | 759821,6 | 1,6 |
| BRS Saracura | 2533,3 a | 106,4 | 2586188,9 | 5,5 |
| BR Sertanejo | 2490,1 a | 105,1 | 1538444,7 | 3,3 |
| BR Asa Branca | 2486,0 a | 105,3 | 1266104,2 | 2,7 |
| BRS 2020 | 2477,9 a | 105,0 | 960312,4 | 2,1 |
| CMS 104 | 2461,3 a | 104,7 | 819396,1 | 1,8 |
| BR 451 | 2444,7 a | 103,2 | 1556091,5 | 3,3 |
| BR 473 | 2416,6 a | 102,7 | 750131,2 | 1,6 |
| CMS 102 | 2361,6 b | 100,5 | 587069,1 | 1,3 |
| SHS 3031 | 2350,7 b | 100,3 | 478063,1 | 1,0 |
| BR 106 | 2328,4 b | 97,9 | 1875216,8 | 4,0 |
| AL Piratininga | 2322,7 b | 98,7 | 774005,8 | 1,7 |
| CMS 103 | 2317,4 b | 98,1 | 1425048,3 | 3,0 |
| BR São Francisco | 2316,6 b | 97,3 | 2182498,7 | 4,7 |
| CMS 101 | 2304,8 b | 97,9 | 693324,9 | 1,5 |
| BR 473 CIII | 2289,5 b | 97,9 | 289954,2 | 0,6 |
| AL Bianco | 2280,8 b | 95,7 | 1809854,6 | 3,9 |
| BRS 4150 | 2277,4 b | 96,3 | 880716,0 | 1,9 |
| Fundacep 34 | 2274,1 b | 94,6 | 4794205,6 | 10,2 |
| Sindentado | 2228,7 b | 93,6 | 1898011,1 | 4,1 |
| AL 34 | 2226,1 b | 94,9 | 506666,1 | 1,1 |
| AL Alvorada | 2210,0 b | 92,8 | 1713934,6 | 3,7 |
| BRS Planalto | 2208,6 b | 93,3 | 1001885,6 | 2,1 |
| Encapa 202 | 2201,0 b | 92,9 | 849708,5 | 1,8 |
| AL Bandeirante | 2186,9 b | 91,7 | 1980011,2 | 4,2 |
| UFVM 200 | 2179,0 b | 93,4 | 157228,2 | 0,3 |
| Missões | 2170,5 b | 91,8 | 1412579,2 | 3,0 |
| UFVM 100 | 2155,6 b | 92,0 | 459759,7 | 1,0 |
| Fundacep 35 | 2139,6 b | 90,3 | 1568852,1 | 3,4 |
| Sintético Nacional | 2136,7 b | 90,1 | 1977083,6 | 4,2 |
| AL Ipiranga | 2121,4 b | 88,7 | 2145923,0 | 4,6 |
| BRS Eldorado | 2087,2 b | 88,7 | 404969,1 | 0,9 |
| Sintético Elite | 2084,9 b | 88,1 | 937140,3 | 2,0 |
| Total | - | - | 46802882,3 | 100,0 |

*Médias seguidas de mesma letra na coluna pertencem ao mesmo grupo, pelo teste de Scott-Knott (1974), a 5% de probabilidade.

As variedades que mais concentraram Mn nos grãos foram: BR 451, BRS 2020 e BRS Sol da Manhã, com 7,3; 7,2 e 6,7 mg/kg, sendo superiores, estatisticamente, ao restante das variedades (Tabela 21). Estas três variedades apresentaram índice de confiança de 118,2%, 114,9% e 106,9%, respectivamente e pequena contribuição para a interação com reduzida ecovalência de 1,0%, 3,8% e 3,0%, respectivamente.

As variedades que mais contribuíram para a interação relativa ao teor de Mn foram: BRS Eldorado e BR São Vicente, com $W_i^2 = 8,9$ e $W_i^2 = 9,8\%$, respectivamente. É interessante notar que a BR São Vicente foi uma das que mais concentraram P em seus grãos e que contribuíram pouco para a interação deste elemento. Isso demonstra a considerável diferença nas concentrações de minerais nos grãos e da complexa relação entre eles.

TABELA 21 Teores médios de Mn (mg/kg) de cada variedade com respectivos índices de confiança (I_i) e ecovalências (W_i^2).

| Variedade | Mn (mg/kg)* | I_i (%) | W_i^2 | W_i^2 (%) |
|--------------------|-------------|-----------|---------|-------------|
| BR 451 | 7,3 a | 118,2 | 4,9 | 1,0 |
| BRS 2020 | 7,2 a | 114,9 | 17,9 | 3,8 |
| BRS Sol da Manhã | 6,7 a | 106,9 | 14,1 | 3,0 |
| AL Alvorada | 6,4 b | 102,8 | 11,1 | 2,3 |
| BR São Francisco | 6,4 b | 102,3 | 11,8 | 2,5 |
| AL Bandeirante | 6,3 b | 99,4 | 23,8 | 5,0 |
| BR Asa Branca | 6,3 b | 101,1 | 12,1 | 2,6 |
| BRS Eldorado | 6,3 b | 99,0 | 42,2 | 8,9 |
| BR 473 | 6,2 b | 100,1 | 13,4 | 2,8 |
| BR 106 | 6,2 b | 100,7 | 4,4 | 0,9 |
| Fundacep 34 | 6,2 b | 100,6 | 3,3 | 0,7 |
| BR São Vicente | 6,2 b | 96,1 | 46,3 | 9,8 |
| Fundacep 35 | 6,1 b | 98,2 | 19,9 | 4,2 |
| SHS 3031 | 6,1 b | 98,7 | 8,3 | 1,8 |
| CMS 101 | 6,1 b | 98,9 | 4,7 | 1,0 |
| BRS 4150 | 6,1 b | 98,8 | 3,0 | 0,6 |
| BRS Saracura | 6,1 b | 97,8 | 16,9 | 3,6 |
| Sintético Nacional | 6,1 b | 98,0 | 8,4 | 1,8 |
| BRS Caatingueiro | 6,1 b | 97,8 | 11,2 | 2,4 |
| Sintético Elite | 6,0 b | 95,5 | 20,0 | 4,2 |
| AL Branco | 6,0 b | 96,2 | 4,4 | 0,9 |
| CMS 103 | 5,9 b | 95,9 | 6,1 | 1,3 |
| Encapa 202 | 5,9 b | 94,5 | 17,2 | 3,6 |
| AL Piratininga | 5,9 b | 95,3 | 4,9 | 1,0 |
| BRS Planalto | 5,9 b | 95,6 | 4,8 | 1,0 |
| UFVM 200 | 5,9 b | 94,1 | 13,9 | 2,9 |
| Sindentado | 5,8 b | 92,5 | 19,6 | 4,2 |
| UFVM 100 | 5,8 b | 94,6 | 1,9 | 0,4 |
| Missões | 5,8 b | 93,3 | 15,7 | 3,3 |
| AL Ipiranga | 5,8 b | 91,8 | 7,7 | 1,6 |
| BR 473 CIII | 5,8 b | 92,9 | 7,2 | 1,5 |
| BRS Assum Preto | 5,7 b | 92,7 | 8,3 | 1,8 |
| AL 34 | 5,7 b | 89,7 | 40,0 | 8,5 |
| CMS 102 | 5,7 b | 91,7 | 6,0 | 1,3 |
| BR Sertanejo | 5,6 b | 90,6 | 11,7 | 2,5 |
| CMS 104 | 5,3 b | 86,2 | 5,2 | 1,1 |
| Tabela | - | - | 471,9 | 100,0 |

*Médias seguidas de mesma letra na coluna pertencem ao mesmo grupo, pelo teste de Scott-Knott (1974), a 5% de probabilidade.

Dentre as doze variedades de maior concentração de zinco nos grãos, a BRS Assum Preto se destacou, com 20,6 mg/kg (Tabela 22). Estas também apresentaram índice de confiança acima de 100%, concentrando Zn acima da média dos ambientes. A BRS Assum Preto também foi a de maior índice, com 110,2%.

Em geral, as variedades avaliadas contribuíram pouco para a interação com magnitudes reduzidas de suas ecovalências. A variedade que mais contribuiu foi a Missões, com 9,0% e com teor de Zn de 17,7 mg/kg.

É interessante notar que as variedades de maior concentração de Zn apresentaram produtividades de grãos pouco relevantes, ficando abaixo no ranking geral.

Isso pode ser um indicativo do fenômeno da diluição em que variedades mais produtivas têm menores teores de minerais em seus grãos, devido à maior contribuição do seu endosperma para o peso de seus grãos, reduzindo a concentração de minerais, o que desfavorece a seleção de variedades produtivas e de altos teores de nutrientes.

TABELA 22 Teores médios de Zn (mg/kg) de cada variedade, com respectivos índices de confiança (I_i) e ecovalências (W_i).

| Variedade | Zn (mg/kg) | I_i (%) | W_i^2 | W_i^2 (%) |
|--------------------|------------|-----------|---------|-------------|
| BRS Assum Preto | 20,6 a | 110,2 | 87,1 | 4,0 |
| BRS Sol da Manhã | 20,2 a | 108,7 | 48,2 | 2,2 |
| BRS Saracura | 19,8 a | 105,4 | 133,5 | 6,1 |
| BR São Vicente | 19,6 a | 104,9 | 70,5 | 3,2 |
| BR 473 | 19,2 a | 103,1 | 77,4 | 3,5 |
| BR 451 | 19,1 a | 103,7 | 11,1 | 0,5 |
| BR Asa Branca | 19,1 a | 102,1 | 75,9 | 3,4 |
| SHS 3031 | 19,0 a | 102,9 | 25,5 | 1,2 |
| AL Alvorada | 18,9 a | 100,4 | 120,3 | 5,5 |
| Fundacep 34 | 18,8 a | 101,1 | 41,8 | 1,9 |
| BR Sertanejo | 18,7 a | 100,5 | 52,1 | 2,4 |
| BR 473 CIII | 18,6 a | 100,5 | 12,5 | 0,6 |
| CMS 104 | 18,5 b | 100,0 | 29,1 | 1,3 |
| BRS 2020 | 18,4 b | 98,7 | 44,9 | 2,0 |
| BR São Francisco | 18,4 b | 97,6 | 122,1 | 5,5 |
| BRS Caatingueiro | 18,3 b | 97,9 | 86,8 | 3,9 |
| UFVM 200 | 18,2 b | 98,0 | 37,8 | 1,7 |
| BRS 4150 | 18,2 b | 97,8 | 39,0 | 1,8 |
| BRS Planalto | 18,2 b | 97,7 | 38,1 | 1,7 |
| CMS 103 | 18,2 b | 97,6 | 52,8 | 2,4 |
| Sindentado | 18,2 b | 97,4 | 63,0 | 2,9 |
| BRS Eldorado | 18,1 b | 97,1 | 50,4 | 2,3 |
| UFVM 100 | 18,0 b | 97,7 | 12,4 | 0,6 |
| CMS 101 | 17,9 b | 96,9 | 16,3 | 0,7 |
| AL 34 | 17,7 b | 94,4 | 100,5 | 4,6 |
| Missões | 17,7 b | 93,7 | 199,3 | 9,0 |
| Fundacep 35 | 17,7 b | 95,0 | 76,8 | 3,5 |
| AL Piratininga | 17,7 b | 95,6 | 20,4 | 0,9 |
| Encapa 202 | 17,7 b | 94,8 | 63,5 | 2,9 |
| Sintético Nacional | 17,7 b | 94,8 | 61,4 | 2,8 |
| AL Bandeirante | 17,7 b | 94,4 | 63,9 | 2,9 |
| AL Bianco | 17,4 b | 92,8 | 75,2 | 3,4 |
| CMS 102 | 17,4 b | 94,4 | 7,4 | 0,3 |
| BR 106 | 17,1 b | 92,1 | 46,7 | 2,1 |
| AL Ipiranga | 17,0 b | 89,7 | 116,9 | 5,3 |
| Sintético Elite | 16,1 b | 86,4 | 23,7 | 1,1 |
| Total | - | - | 2204,0 | 100,0 |

Médias seguidas de mesma letra na coluna pertencem ao mesmo grupo, pelo teste de Scott-Knott (1974), a 5% de probabilidade.

Em geral, observa-se que, apesar da significância do efeito de variedade para cinco dos minerais estudados, foi pequena a variação dos seus teores, o que seria limitante para utilizá-las como populações-base em programas de seleção recorrente. As médias apresentadas pelas variedades para Fe e Zn ficaram muito abaixo dos valores-alvo (70 mg/kg para Fe e 40 mg/kg para Zn) estabelecidos pelo Harvest Plus. O desenvolvimento de variedades sintéticas, baseado em linhagens parentais com maior capacidade combinatória para os teores de Fe e Zn, poderá ser alternativa viável para o desenvolvimento de variedades biofortificadas.

4.4 Correlações entre caracteres

A maior parte das correlações estimadas entre os minerais e produção, apresentadas na Tabela 23, não apresentaram significância, exceto em alguns ambientes. O Al apresentou correlação de -0,46**, em SLF e de 0,35**, em SLBN, sendo ambas de baixa magnitude. Observou-se grande variação dessa estimativa nos ambientes avaliados.

TABELA 23 Estimativa dos coeficientes de correlação entre produção e teores de minerais em cada um dos cinco ambientes testados: Sete Lagoas Fértil (SLF), Sete Lagoas Baixo N (SLBN), Sete Lagoas Alto N (SLAN), Planaltina (PLA) e S. A. de Goiás (SAGO).

| | SLF | SLBN | SLAN | PLAN | SAGO |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Prod x Al | -0,46** | 0,35* | -0,09ns | -0,27ns | -0,07ns |
| Prod x Ca | -0,16ns | -0,44** | -0,29ns | 0,08ns | -0,13ns |
| Prod x Mg | -0,28ns | -0,27ns | -0,17ns | -0,06ns | -0,45** |
| Prod x P | -0,23ns | 0,01ns | -0,14ns | -0,31ns | -0,36* |
| Prod x K | -0,20ns | 0,24ns | 0,19ns | -0,34* | 0,07ns |
| Prod x Cu | 0,08ns | 0,01ns | -0,29ns | -0,04ns | 0,06ns |
| Prod x Fe | 0,04ns | 0,03ns | -0,13ns | 0,09ns | 0,06ns |
| Prod x Mn | 0,06ns | 0,00ns | -0,11ns | 0,27ns | -0,36* |
| Prod x Zn | -0,20ns | -0,22ns | -0,13ns | -0,22ns | -0,39* |
| Prod x Ba | -0,15ns | 0,07ns | 0,15ns | 0,30ns | -0,14ns |

O único ambiente que apresentou correlação significativa entre o teor de Ca e a produção foi SLBN (-0,44**), que também apresentou uma das maiores concentrações de Ca no solo, segundo análise.

O Mg apresentou correlação de -0,45**, com a produção em SAGO, tendo, nos demais ambientes, as estimativas das correlações sido não significativas.

O P, assim como o MG, só apresentou correlação significativa em SAGO no valor de -0,36**. Este ambiente também foi o que apresentou uma das maiores concentrações de P no solo. Na literatura consultada, a variação da correlação entre P e produtividade variou de 0,004ns a 0,63** (White & Broadley, 2005; Massey & Loeffel, 1966; Arnold et al., 1977), apesar de baixa magnitude da correlação estimada de -0,36**, não tinha sido observada correlação negativa entre este mineral e a produtividade.

O K só apresentou correlação significativa em PLAN de -0,34**; nos demais, a não significância das estimativas foi o que prevaleceu. A correlação do teor de K com a produtividade foi semelhante à relatada para o teor de P, com a diferença da significância da correlação estimada, apesar da reduzida grandeza.

Os minerais Cu, Fe e Ba foram os únicos que não apresentaram correlação significativa com a produtividade em nenhum dos ambientes estudados, concordando com o observado na literatura.

Os teores de Zn e Mn somente apresentaram correlação significativa com a produtividade em SAGO, com -0,39** e -0,36**, respectivamente, com valores próximos aos observados na literatura (White & Broadley, 2005; Massey & Loeffel, 1966, Arnold et al., 1977).

No geral, as correlações estimadas entre os minerais estudados e a produtividade foram de baixa magnitude. Dentre as significativas, apenas a correlação produtividade x Al foi positiva. Esta situação pode ser uma indicação de que o efeito da diluição é comum na relação entre produtividade e teor de

minerais. Apesar disso, como, em geral, todas as correlações foram de baixa magnitude, isso poderia ser uma indicação da possibilidade de melhoria nos teores de minerais, sem prejudicar os ganhos de produção.

A maioria das correlações entre Al e os demais minerais foi não significativa (Tabela 24). Chamam a atenção as estimativas em Planaltina (PLAN), ambiente que mais apresentou correlações significativas dos minerais com o Al. Neste, as estimativas de Al com P, K, Cu e Zn foram de 0,63**; 0,49**; 0,43 e 0,52**, respectivamente. Este fato se deve, provavelmente, à maior acidez do local, o que disponibilizaria mais micronutrientes às plantas e maiores disponibilidades de Al ($0,2 \text{ cmol/dm}^3$) e P ($12,5 \text{ cmol/dm}^3$) no solo.

Na maioria dos ambientes, a correlação Ca x Mg foi positiva e significativa, variando de 0,37** a 0,65**. Planaltina (PLAN) foi o único lugar em que a relação entre eles não foi significativa.

TABELA 24 Estimativa dos coeficientes de correlação entre Al, Ca, Mg e P com os demais minerais, em cada um dos cinco ambientes testados: Sete Lagoas Fértil (SLF), Sete Lagoas Baixo N (SLBN), Sete Lagoas Alto N (SLAN), Planaltina (PLA) e S. A. de Goiás (SAGO).

| | SLF | SLBN | SLAN | PLAN | SAGO |
|---------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Al x Ca | -0,13 | -0,12 | 0,04 | -0,28 | 0,01 |
| Al x Mg | 0,14 | -0,09 | -0,25 | 0,25 | 0,19 |
| Al x P | 0,08 | 0,22 | -0,03 | 0,63** | 0,19 |
| Al x K | 0,04 | 0,35* | 0,30 | 0,49** | 0,08 |
| Al x Cu | 0,10 | 0,17 | 0,28 | 0,43** | 0,48** |
| Al x Fe | -0,09 | -0,13 | 0,33* | 0,11 | 0,28 |
| Al x Mn | 0,01 | -0,13 | -0,07 | 0,22 | 0,14 |
| Al x Zn | 0,19 | -0,06 | 0,16 | 0,52** | 0,28 |
| Al x Ba | 0,32 | -0,08 | 0,14 | 0,22 | 0,13 |
| Ca x Mg | 0,56** | 0,65** | 0,45** | 0,14 | 0,37* |
| Ca x P | 0,29 | 0,38* | 0,30 | -0,20 | -0,14 |
| Ca x K | 0,14 | 0,07 | 0,18 | -0,06 | -0,45** |
| Ca x Cu | 0,18 | 0,36* | 0,30 | 0,10 | 0,01 |
| Ca x Fe | 0,29 | -0,05 | 0,33* | -0,03 | 0,03 |
| Ca x Mn | 0,37* | 0,15 | 0,31 | -0,10 | 0,20 |
| Ca x Zn | 0,27 | 0,31 | 0,37* | -0,07 | 0,11 |
| Ca x Ba | 0,15 | 0,34* | 0,03 | -0,12 | -0,06 |
| Mg x P | 0,70** | 0,49** | 0,72** | 0,53** | 0,48** |
| Mg x K | 0,38* | 0,00 | 0,08 | 0,34* | -0,36* |
| Mg x Cu | 0,61** | 0,37* | 0,15 | 0,37* | 0,07 |
| Mg x Fe | 0,54** | 0,13 | 0,36* | 0,38* | 0,14 |
| Mg x Mn | 0,54** | 0,45** | 0,54** | 0,50** | 0,72** |
| Mg x Zn | 0,70** | 0,36* | 0,45** | 0,56** | 0,67** |
| Mg x Ba | 0,01 | 0,22 | -0,08 | 0,12 | 0,02 |
| P x K | 0,83** | 0,71** | 0,46** | 0,89** | 0,44** |
| P x Cu | 0,57** | 0,53** | 0,47** | 0,52** | 0,37* |
| P x Fe | 0,53** | -0,15 | 0,21 | 0,39* | 0,07 |
| P x Mn | 0,25 | 0,06 | 0,34* | 0,19 | 0,26 |
| P x Zn | 0,87** | 0,53** | 0,65** | 0,83* | 0,64** |
| P x Ba | -0,28 | -0,06 | -0,01 | 0,16 | 0,11 |

PLAN também foi o ambiente que apresentou os menores teores de Ca e MG. Assim, essa não significância pode ser devido aos seus baixos teores no solo.

Nos demais ambientes, chama a atenção a correlação de $-0,45^{**}$ entre Ca e K, em Santo Antônio de Goiás (SAGO). Neste local também foi baixo o teor de Ca^{2+} , em contrapartida, foi o que apresentou o maior teor de K no solo, o que pode ter influenciado esta estimativa.

O magnésio foi o nutriente que mais apresentou correlações significativas com os demais minerais, especialmente com P em SLF ($0,70^{**}$) e SLAN ($0,72^{**}$). As demais correlações de maiores magnitudes foram entre Ca e Mn, em SAGO, com $0,72^{**}$ e, com Zn, em SLF, de $0,70^{**}$.

Conforme análise de solos, em SLF, tanto os teores de Mg como os de P eram altos, o que pode explicar a alta correlação entre estes dois nutrientes neste ambiente ($0,56^{**}$).

Santo Antônio de Goiás (SAGO), local onde houve uma das maiores estimativas da correlação entre Mg e Mn, apresentou, em seu solo, os teores mais elevados destes minerais, o que pode ser a explicação dessa considerável estimativa, neste ambiente. Como estes elementos estão em alta concentração, eles estariam mais disponíveis para absorção pela planta, estando também mais disponíveis para translocação para os grãos, o que influenciaria esta maior estimativa.

As correlações entre Mg e Zn ($0,36^*$ a $0,70^{**}$) foram significativas em todos os ambientes, não variando tanto, como $-0,04ns$ a $0,70^{**}$, relatada por Menkir (2008), mas apresentando considerável magnitude na maioria deles.

O fósforo foi o elemento que apresentou correlações de maiores magnitudes, dentre os analisados. Nota-se que a estimativa P x K foi expressiva em três dos cinco ambientes avaliados. Dentre estes três, dois deles (SLF e PLAN) apresentaram altos teores destes dois nutrientes no solo. Já é conhecido

que K e P são os elementos mais abundantes nos grãos de milho, apresentando, em geral, consideráveis correlações como 0,85** (Arnold & Bauman, 1976).

A correlação entre P e Zn também se destaca. Suas estimativas variaram de 0,53** a 0,87**, sendo superiores às encontradas na literatura, que vão de -0,25ns a 0,66** (Arnold & Bauman, 1976; Arnold et al., 1977; Maziya-Dixon et al., 2000; Oikeh et al., 2003a; Guimarães et al., 2005; Banziger & Long, 2000). Em trabalhos de Oikeh et al. (2003a) e Menkir (2008), foi relatada grande variação da correlação entre estes dois nutrientes em relação ao ambiente, o mesmo acontecendo neste trabalho.

As correlações de K com Cu, Fe, Mn, Zn e BA, em geral, foram de baixa magnitude, apenas se destacando a estimativa com o Zn nos ambientes SLF e PLAN, nos quais alcançaram valores de 0,63** e 0,67**, respectivamente (Tabela 25). Estes valores acompanharam a variação que vinha sendo observada na literatura.

TABELA 25 Estimativa dos coeficientes de correlação entre K, Cu, Fe, Mn e Zn com os demais minerais, em cada um dos cinco ambientes testados: Sete Lagoas Fértil (SLF), Sete Lagoas Baixo N (SLBN), Sete Lagoas Alto N (SLAN), Planaltina (PLA) e S. A. de Goiás (SAGO).

| | SLF | SLBN | SLAN | PLAN | SAGO |
|---------|--------|-------|--------|--------|--------|
| K x Cu | 0,38* | 0,29 | 0,47** | 0,53** | 0,23 |
| K x Fe | 0,35* | -0,28 | 0,03 | 0,31 | -0,13 |
| K x Mn | 0,03 | -0,23 | -0,15 | 0,04 | -0,41* |
| K x Zn | 0,63** | 0,19 | 0,58** | 0,67** | -0,05 |
| K x Ba | -0,28 | -0,30 | 0,10 | 0,11 | -0,07 |
| Cu x Fe | 0,43** | -0,05 | 0,09 | 0,04 | 0,34* |
| Cu x Mn | 0,29 | 0,08 | -0,02 | 0,10 | 0,10 |
| Cu x Zn | 0,68** | 0,29 | 0,38* | 0,32 | 0,38* |
| Cu x Ba | -0,08 | 0,21 | 0,15 | 0,42** | 0,22 |
| Fe x Mn | 0,31 | 0,22 | 0,23 | 0,25 | 0,28 |
| Fe x Zn | 0,51** | 0,42* | 0,28 | 0,46** | 0,25 |
| Fe x Ba | -0,26 | 0,42* | -0,13 | 0,06 | -0,13 |
| Mn x Zn | 0,45** | 0,04 | 0,15 | 0,27 | 0,52** |
| Mn x Ba | 0,08 | 0,05 | -0,19 | -0,09 | -0,15 |
| Zn x Ba | -0,09 | 0,16 | -0,03 | 0,09 | 0,16 |

A correlação de 0,68** do teor de Cu com o de Zn, observada em SLF, foi de maior magnitude, em comparação com aquelas já citadas.

A correlação Fe x Zn apresentou, em geral, baixa magnitude nos ambientes estudados, confirmando que vem sendo de -0,002ns a 0,88** (Arnold & Bauman, 1976; Arnold et al., 1977; Maziya-Dixon et al., 2000; Oikeh et al., 2003a; Guimarães et al., 2005; Banziger & Long 2000). Essa baixa magnitude demonstra uma provável independência dos teores desses minerais nos grãos de milho o que possibilita o aumento desses via melhoramento, de forma independente e simultânea.

Os dados das Tabelas 24 e 25 demonstram que as correlações entre minerais nos grãos de milho apresentaram variação de acordo com o ambiente avaliado. Algumas relações são mais consistentes, como a de P x K e Ca x Mg, que possuem magnitude considerável através dos ambientes. Outras, no entanto, são bem instáveis.

Uma das causas dessas variações pode ser de origem genética, pois cada cultivar tem diferentes capacidades de translocação de minerais para os grãos. Outro motivo pode ser ambiental, devido aos diferentes atributos químicos do solo e do manejo nutricional utilizado com grande variação na dose de adubo aplicado, o que influi nas relações entre nutrientes, alterando sua absorção e translocação para o grão.

Quando se confrontam os dados de produtividade de grãos com os teores de minerais, nota-se que nenhuma das oito variedades mais produtivas tem teores altos de minerais, exceto o híbrido BRS 2020 (11) que, além de ser a segunda em produtividade média de grãos, obteve teores elevados de P, Mn e Zn.

Esta dissociação entre produtividade e concentração de minerais na maioria das cultivares deve-se, provavelmente, a um fenômeno, já relatado na literatura, chamado de diluição (White & Broadley, 2005; Massey & Loeffel,

1966; Arnold et al., 1977). Este efeito é comum, pois as cultivares mais produtivas teriam menores teores nos seus grãos pela maior contribuição dos carboidratos e outros constituintes para a produtividade de grãos.

5 CONCLUSÕES

Houve variabilidade genética significativa apenas para produtividade de grãos e teores de Ca, Mg, P, Mn e Zn.

A interação variedades x ambientes foi significativa apenas para produtividade de grãos e teores de P, Mn e Zn.

Os graus de associação entre os teores de minerais e a produção foram, em geral, de baixa magnitude.

Os graus de associação entre os minerais variam de acordo com o ambiente testado.

A baixa magnitude das correlações estimadas entre Fe e Zn indica a possibilidade de seleção de genótipos que aliem bons teores desses dois minerais alvos do Programa Harvest Plus.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ, V. H.; NOVAIS, R. F. de; BARROS, N. F. de; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H.; NOVAIS, R. F. de; BARROS, N. F. de; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 25-32.

ANNICHIARICO, P. Variety adaptation and recommendation from alfalfa trials in Northern Italy. **Journal of Genetics of Breeding**, Rome, v. 46, n. 1, p. 269-278, Mar. 1992.

ARNOLD, J. M.; BAUMAN, L. F. Inheritance and interrelationships among maize kernel traits and elemental contents. **Crop Science**, Madison, v. 16, n. 3, p. 339-440, May 1976.

ARNOLD, J. M.; BAUMAN, L. F.; AYCOCK, H. S. Interrelations among protein, lysine, oil, certain mineral element concentrations and physical kernel characteristics in two maize populations. **Crop Science**, Madison, v. 17, n. 3, p. 421- 425, May 1977.

ASCHNER, M. Manganese: brain transport and emerging research needs. **Environmental Health Perspectives**, Research Triangle Park, v. 108, n. 33, p. 429-432, June 2000. Supplement.

BÄNZIGER, M.; LONG, J. K. The potential for increasing the iron and zinc density of maize through plant-breeding. **Food and Nutrition Bulletin**, Tokyo, v. 21, n. 4, p. 397- 400, Oct./Dec. 2000.

BARBOSA FILHO, M. P. Cereais. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: POTAFOS/CNPq, 1991. 734 p.

BECKER, H. C.; LÉON, J. Stability analysis in plant breeding. **Plant Breeding**, Berlin, v. 101, n. 1, p. 1-23, Apr. 1988.

BELOW, F. E. **Fisiologia, nutrição e adubação nitrogenada do milho**. Piracicaba: Potafos, 2002. p. 7-12. (Informações Agronômicas, 99).

BELOW, F. E. Nitrogen metabolism and crop productivity. In: PRESSARAKLI, M. (Ed.). **Handbook of plant and crop physiology**. New York: Marcel Dekkar, 1995. p. 275-301.

BIENFAIT, H. F.; VAN DER MARK, F. Phytoferritin and its role in iron metabolism. In: ROBB; D. A.; PIERPOINT, W. S. (Ed.). **Metals and micronutrientes**: uptake and utilization by plants. New York: Academic, 1985. p. 111-123.

BITYUTSKII, N. P.; MAGNITSKIY, S. V.; KOROBAYNIKOVA, L. P.; LUKINA, E. I.; SOLOVIOVA, A. N.; PATSEVITCH, V. G.; LAPSHINA, I. N.; MATVEEVA, G. V. Distribution of iron, manganese, and zinc in mature grain and their mobilization during germination and early seedling development in maize. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 25, n. 3, p. 635-653, Mar. 2002.

BOUIS, H. E.; WELCH, R. M. Biofortification: a sustainable agricultural strategy for reducing micronutrient malnutrition in the global south. **Crop Science**, Madison, v. 50, n. 1, p. 20-32, Jan. 2010.

BRUZI, A. T. **Homeostase de populações de feijoeiro com diferentes estruturas genéticas**. 2006. 69 p. Dissertação (Genética e Melhoramento de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

COELHO, A. M.; FRANÇA, G. E. de. **Seja doutor do seu milho**. Piracicaba: INPI, 1995. (Informações Agronômicas, 17).

COORDENADORIA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA INTEGRAL. São Paulo, 2009. Disponível em: <http://www.cati.sp.gov.br/Cati/_produtos/SementesMudas/cultivares/milho_al25.php>. Acesso em: 22 maio 2009.

CRUZ, C. D. **Programa genes**: biometria. Viçosa, MG: UFV, 1981. 279 p.

CRUZ, C. D. **Programa genes**: biometria. Viçosa, MG: UFV, 2006. 382 p.

CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa, MG: UFV, 2003. 585 p.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa, MG: UFV, 1994. 390 p.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 3. ed. Viçosa, MG: UFV, 2004. 480 p.

CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. **325 cultivares de milho convencionais e 104 transgênicas são disponibilizadas no mercado de sementes do Brasil para a safra 2009/10**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. Disponível em: <<http://www.cnpm.embrapa.br/milho/cultivares/TABELA1.html>>. Acesso em: 15 mar. 2010.

DECHEN, A. R.; HAAG, H. P.; CARMELLO, Q. A. de C. Funções dos micronutrientes nas plantas. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: POTAFOS/CNPq, 1991. 734 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Brasília, 2009. Disponível em: <<http://www.embrapa.br>>. Acesso em: 5 maio 2009.

FALCONER, D. S. **Introdução à genética quantitativa**. Viçosa, MG: Imprensa Universitária UFV, 1981. 279 p.

FAQUIM, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005. 183p.

FEIL, B.; MOSER, S. B.; JAMPATONG, S.; STAMP, P. Mineral composition of grains of tropical maize varieties as affected by pre-anthesis drought and rate of nitrogen fertilization. **Crop Science**, Madison, v. 45, n. 2, p. 516-523, Mar. 2005.

FERNANDES, L. A.; VASCONCELLOS, C. A.; FURTINI NETO, A. E.; ROSCOE, R.; GUEDES, G. A. Preparo de solo e adubação nitrogenada na produção de grãos e matéria seca e acúmulo de nutrientes pelo milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 9, p. 1691-1698, set. 1999.

FERREIRA, D. F. **Programa estabilidade**. Lavras: UFV, 2000. Disponível em: <<http://www.dex.ufla.br/danielff/df02.htm>>. Acesso em: 15 set. 2009.

FERRI, M. G.; MENEZES, N. L. de; MONTEIRO, W. R. **Glossário ilustrado de botânica**. São Paulo: Nobel, 1981. 197 p.

FRAGA, C. G. Relevance, essentiality and toxicity of trace elements in human health. **Molecular Aspects of Medicine**, Elmsford, v. 26, n. 4/5, p. 235-244, Aug./Oct. 2005.

GAUCH, H. C. J.; ZOBEL, R. W. Predictive and postdictive success of statistical analysis of yield trials. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 76, n. 1, p. 1-10, Jan. 1988.

GENC, Y.; HUMPHRIES, J. M.; LYONS, G. H.; GRAHAM, R. D. Exploiting genotypic variation in plant nutrient accumulation to alleviate micronutrient deficiency in populations. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, New York, v. 18, n. 4, p. 319-324, June 2005.

GORSLINE, G. W.; THOMAS, W. I.; BAKER, D. E. Inheritance of P, K, Mg, Cu, B, Zn, Mn, Al and Fe concentrations by corn (*Zea mays* L.) leaves and grain. **Crop Science**, Madison, v. 4, n. 2, p. 207-210, Mar. 1964.

GRAHAM, R. D. Breeding for nutritional characteristics in cereals. Advances in plant nutrition: breeding for nutritional characteristics. In: TINKER, P. B.; LAUCHLI, A. (Ed.). **Advances in plant nutrition**. New York: Praeger, 1984. p. 57-102.

GRAHAM, R.; SENADHIRA, D.; BEEBE, S.; IGLESIAS, C.; MONASTERIO, I. Breeding for micronutrient density in edible portions of staple food crops: conventional approaches. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 60, n. 1/2, p. 57-80, Jan. 1999.

GREGORIO, G. B.; SENADHIRA, D.; HTUT, T.; GRAHAM, R. D. Breeding for trace mineral in rice. **Food and Nutrition Bulletin**, Tokyo, v. 21, n. 1, p. 382-386, Jan./Mar. 2000.

GRUNES, D. L.; BOAWN, L. C.; CARLSON, C. W.; VEITS JÚNIOR, F. G. Zinc deficiency of corn and potatoes as related to soil and plant analyses. **Agronomy Journal**, Madison, v. 53, n. 2, p. 68-71, Mar. 1961.

GUIMARÃES, P. E. de O.; RIBEIRO, P. E. de A.; PAES, M. C. D.; SCHAFFERT, R. E.; ALVES, V. M. C.; COELHO, A. M.; NUTTI, M.; VIANA, J. L. C.; NOGUEIRA, A. R. de A.; SOUZA, G. B. de. **Caracterização de linhagens de milho quanto aos teores de minerais nos grãos**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005. (Circular Técnica, 64).

HALIM, A. H.; WASSOM, C. E. ; ELLIS JÚNIOR, R. Zinc deficiency symptoms and zinc and phosphorus interactions in several strains of corn (*Zea mays* L.). **Agronomy Journal**, Madison, v. 60, n. 3, p. 267-271, May 1968.

HELL, R.; STEPHAN, U. W. Iron uptake, trafficking and homeostasis in plants. **Planta**, Berlin, v. 216, n. 4, p. 541-551, Feb. 2003.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. 3. ed. Boca Raton: CRC, 1985. 315 p.

KANG, M. S.; GAUCH JÚNIOR, H. G. **Genotype by environment interaction**. New York: CRC, 1996. 416 p.

KARLEN, D.L.; VARVEL, G.E.; BULLOCK, D.G.; CRUSE, R.M. Crop rotations for the 21st century. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 53, p. 1-45, Dec. 1994.

KIRKBY, E. A.; ROMHELD, V. **Micronutrientes na fisiologia de plantas: funções, absorção e mobilidade**. Piracicaba: IPNI, 2007. 24 p. (Informações Agronômicas, 118).

LONG, J. K.; BANZIGER, M.; SMITH, M. E. Diallel analysis of grain iron and zinc density in southern african-adapted maize inbreds. **Crop Science**, Madison, vol. 44, n. 6, p. 2019-2026, Nov. 2004.

LOPES, A. S. **Manual de fertilidade do solo**. São Paulo: ANDA/POTAFOS, 1989. 153 p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. v. 1. 638 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1995. 902 p.

MASSEY, H. F. Zinc deficient corn in Kentucky. **Kentucky Farm and Home Science**, Lexington, v. 3, n. 1, p. 4-5, Jan. 1957.

MASSEY, H. F.; LOEFFEL, F. A. Factors in interstrain variation in zinc content of maize (*Zea mays* L.) kernels. **Agronomy Journal**, Madison, v. 59, n. 3, p. 214-217, May 1967.

MASSEY, H. F.; LOEFFEL, F. A. Variation in zinc content of grain inbred lines of corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 58, n. 2, p. 143-144, Mar. 1966.

MAZIYA-DIXON, B.; KLING, J. G.; MENKIR, A.; DIXON, A. Genetic variation in total carotene, iron, and zinc contents of maize and cassava genotypes. **Food and Nutrition Bulletin**, Tokyo, v. 21, n. 4, p. 419-422, Oct./Dec. 2000.

MENKIR, A. Genetic variation for grain mineral content in tropical-adapted maize inbred lines. **Food chemistry**, London, v. 110, n. 2, p. 454-464, Sept. 2008.

MORRISON, E. **Enhancing the consumer's perception of wheat and wheat product, especially with regard to essential trace minerals.** 1995. 201 p. Thesis (Master of Applied Science) - Queensland University of Technology, Brisbane.

OIKEH, S. O.; MENKIR, A.; MAZIYA-DIXON, B.; WELCH, R.; GLAHN, R. P. Genotypic differences in concentration and bioavailability of kernel-iron in tropical maize varieties grown under field conditions. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 26, n. 11, p. 2307-2319, Oct. 2003a.

OIKEH, S. O.; MENKIR, A.; MAZIYA-DIXON, B.; WELCH, R.; GLAHN, R. P. Assessment of concentrations of iron and zinc and bioavailable iron in grains of early-maturing tropical maize varieties. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 51, n. 13, p. 3688-3694, June 2003b.

OIKEH, S. O.; MENKIR, A.; MAZIYA-DIXON, B.; WELCH, R. M.; GLAHN, R. P.; GAUCH, G. Environment stability of iron and zinc concentrations in grain of elite early-maturing tropical maize genotypes grown under field conditions. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 142, n. 5, p. 543-551, Oct. 2004.

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

PETERSON, C. J.; JOHNSON, V. A.; MATTERN, P. J. Influence of cultivar and environment on mineral and protein concentrations of wheat flour, bran and grain. **Cereal Chemistry**, Saint Paul, v. 63, n. 1, p. 183-186, Feb. 1986.

PFEIFFER, W. H.; McCLAFFERTY, B. Harvest plus: breeding crops for better nutrition. **Crop Science**, Madison, v. 47, n. 2, p. 88-105, July 2007. Supplement.

POLETTI, S.; GRUISSEM, W.; SAUTTER, C. The nutritional fortification of cereals. **Current Opinion in Biotechnology**, London, v. 15, n. 2, p. 162-165, Apr. 2004.

RAMALHO, M. A. P.; FERREIRA, D. F.; OLIVEIRA, A. C. de **Experimentação em genética e melhoramento de plantas.** Lavras: UFLA, 2000. 326 p.

RAMALHO, M. A. P.; SANTOS, J. B.; ZIMMERMANN, M. J. O. **Genética quantitativa em plantas autógamas aplicações ao melhoramento do feijoeiro.** Goiânia: UFG, 1993. 271 p.

RENGEL, Z.; BATTEN, G. D.; CROWLEY, D. E. Agronomic approaches for improving the micronutrient density in edible portions of field crops. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 60, n. 1/2, p. 27-40, Jan. 1999.

ROSA, I. V. Micronutrientes no animal: funções no metabolismo e conseqüências de carências e excessos. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: POTAFOS/CNPq, 1991. 734 p.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. 370 p.

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

THOMAS, W. I. Chemical element accumulation in corn. In: HYBRID CORN INDUSTRY-RESEARCH CONFERENCE, 18., 1963, Chicago. **Anais...** Chicago: [s.n.], 1963. p. 53-61.

UHART, S. A.; ANDRADE, F. H. Nitrogen deficiency in maize: (II) carbon-nitrogen interaction effects on kernel number and grain yield. **Crop science**, Madison, v. 35, n. 5, p. 1384-1389, Sept. 1995.

VERMA, T. S.; MINHAS, R. S. Zinc and phosphorus interaction in a wheat-maize cropping system. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 13, n. 1, p. 77-86, Feb. 1987.

WALLACE, A.; ROMNEY, E. M. Some interactions of Ca, Sr and Ba in plants. **Agronomy Journal**, Madison, v. 63, n. 2, p. 248-254, Mar. 1971.

WELCH, R. M.; GRAHAM, R. D. Breeding crops for enhanced micronutrient content. **Plant and Soil**, The Hague, v. 245, n. 1, p. 205-214, Aug. 2002.

WELCH, R. M.; SMITH, M. E.; CAMPEN, D. R. van; SCHAEFER, S. C. Improving the mineral reserves and protein quality of maize (*Zea mays* L.) kernels using unique genes. **Plant and Soil**, The Hague, v. 155/156, n. 1, p. 215-218, Oct. 1993.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Biofortifying crops with essential mineral elements. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 10, n. 12, p. 586-593, Dec. 2005.

WOLTZ, S.; TOTH, S. J.; BEAR, F. E. Zinc status of New Jersey soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 76, n. 1, p. 115-121, Jan. 1953.

WRICKE, G. Die erfassung der wechelwirkungen zwischen genotype und umwelt bie quantitativen eigenschaften. **Zeistcherif fur Pflanzenzüchtg**, Berlin, v. 53, p. 266-343, 1965.