

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
TROPICAL

INTERFERÊNCIA DE DOSES CRESCENTES DE SILÍCIO NA
ABSORÇÃO DE NUTRIENTES E NA MATÉRIA SECA DE
Brachiaria decumbens Stapf

ANA MARTA DE LIMA NUNES CAVALCANTE

MANAUS
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
TROPICAL

ANA MARTA DE LIMA NUNES CAVALCANTE

INTERFERÊNCIA DE DOSES CRESCENTES DE SILÍCIO NA
ABSORÇÃO DE NUTRIENTES E NA MATÉRIA SECA DE
Brachiaria decumbens Stapf

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-graduação em Agronomia
Tropical da Universidade Federal do
Amazonas, como requisito parcial
para a obtenção do título de Mestre
em Agronomia Tropical, área de
concentração em Produção vegetal.

Orientador: Prof. Dr. José Ferreira da Silva

Co-orientador: Liovando Marciano da Costa

MANAUS

2013

Ficha Catalográfica
(Catalogação realizada pela Biblioteca Central da UFAM)

C377i

Cavalcante, Ana Marta de Lima Nunes.

Interferência de doses crescentes de silício na absorção de nutrientes e na matéria seca de *Brachiaria decumbens* Stapf / Ana Marta de Lima Nunes Cavalcante. - 2013.

44 f. : il..

Orientador: Prof Dr José Ferreira da Silva

Dissertação (Mestrado em Agronomia Tropical) — Universidade Federal do Amazonas.

1. Gramínea 2. Plantas - Análise 3. Plantas – efeito do magnésio I. Silva, José Ferreira da, orientador II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

CDU (1997): 633.21(043.3)

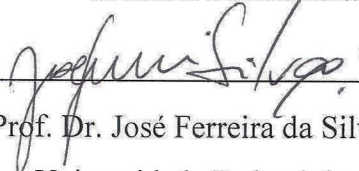
ANA MARTA DE LIMA NUNES CAVALCANTE

INTERFERÊNCIA DE DOSES CRESCENTES DE SILÍCIO NA
ABSORÇÃO DE NUTRIENTES E NA MATÉRIA SECA DE
Brachiaria decumbens Stapf

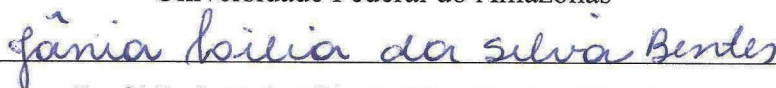
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia Tropical da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Agronomia Tropical, área de concentração em Produção vegetal.

Aprovada em 19 de julho de 2013.

Banca Examinadora


Prof. Dr. José Ferreira da Silva, Presidente
Universidade Federal do Amazonas


Prof.^a Dr.^a Sônia Maria Figueiredo Albertino, Membro
Universidade Federal do Amazonas


Prof.^a Dr.^a Jânia Lília da Silva Bentes, Membro
Universidade Federal do Amazonas

AGRADECIMENTOS

A Deus que sempre esteve presente me guiando pelos melhores caminhos, e que permitiu que todas as pessoas abaixo fizessem parte da minha vida;

À minha família pelo amor, sacrifício e incentivo;

Ao meu companheiro Jeffson Cavalcante de Souza por estar sempre ao meu lado me ajudado a enfrentar dias difíceis sempre com um incentivo e um sorriso, e por ter me ajudado a não desistir;

Ao meu orientador Prof. Dr. José Ferreira da Silva pelos ensinamentos, orientações e principalmente por sua amizade;

A dois “anjos amigos” sem os quais esse trabalho não seria possível: Gerlândio Suassuna Gonçalves e Anselmo Ferreira dos Santos à vocês meu muito obrigada.

A todos os amigos pelas palavras de incentivo quando tudo parecia impossível.

Ao prof. Dr. Liovando Marciano da Costa da Universidade Federal de Viçosa por ter cedido seu laboratório para análise do material, e pelos conhecimentos passados;

À equipe do laboratório de solos da Universidade Federal de Viçosa, em especial ao aluno de doutorado Evair Antônio Siebeneichler pela gentileza em me ajudar a interpretar os dados.

À UFAM por fazer parte da minha história e permitir que eu faça parte da dela;

Ao CNPq pela bolsa de estudos;

A todos que de forma direta ou indireta contribuíram para que isto acontecesse, o meu mais sincero obrigada!

RESUMO

Interferência de doses crescentes de silício na absorção de nutrientes e na matéria seca de *Brachiaria decumbens* Stapf

O silício (Si) vem despertando interesse em diversas áreas de pesquisa, e isto se deve aos inúmeros benefícios que este elemento traz às plantas, incluindo aumento na produtividade e na resistência a estresses bióticos e abióticos. Muitos destes benefícios são atribuídos à deposição de Si junto à epiderme das folhas, funcionando como uma barreira de proteção das plantas, principalmente em gramíneas que são tidas como acumuladoras deste elemento. O objetivo deste estudo foi avaliar o crescimento das plantas de *Brachiaria decumbens* em função de cinco doses de silicato de cálcio e magnésio. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos da espécie braquiária (*B. decumbens*) e cinco doses de silicato de Ca e Mg (0, 300, 600, 1200, 2400 kg ha⁻¹). Posteriormente, foi verificado altura, peso de matéria seca e as concentrações de elementos nas cinzas. Amostras do substrato também foram coletadas para verificar os efeitos do produto sobre as características químicas do Neossolo quartzarênico hidromórfico. Os tratamentos com silicato de cálcio e magnésio causaram aumento do pH do solo, neutralizando o alumínio presente. Ao comparar as plantas controle com as submetidas ao tratamento de 2400 kg ha⁻¹ de silicato constatou-se que houve redução de 38% na altura das plantas e que a produção de matéria seca da parte aérea foi cinco vezes menor. Plantas de *B. decumbens* submetidas a altas doses de silicato de cálcio e magnésio apresentam redução do crescimento.

Palavras- chave: Silicato, produção, gramíneas.

ABSTRACT

Interference of increasing doses of silicon in nutrient absorption and dry matter of *Brachiaria decumbens* Stapf

Silicon (Si) have attracted interest in various areas of research, and this is due to the numerous benefits it brings this element to plants , including increased productivity and resistance to biotic and abiotic stresses. Many of these benefits are attributed to the deposition of Si adjacent to the epidermis of the leaves, functioning as a barrier to protect plants , especially grasses that are considered Silicon accumulators . The aim of this study was to evaluate *Brachiaria decumbens* Stapf growth within five doses of calcium silicate and magnesium . The experiment was conducted in a completely randomized design with four replications. The treatments consisted of Brachiaria species (*B. decumbens*) and five levels of Ca and Mg silicate (0 , 300 , 600 , 1200 , 2400 kg ha⁻¹). It was later verified height , dry weight and elements concentrations in the ashes . Substrate samples were also collected to verify the product effects on the chemical characteristics of hydromorphic quartzarenic neosoil . The treatments with calcium silicate and magnesium caused an increase in soil pH, neutralizing the present aluminum . When comparing with the control plants under treatment of 2400 kg ha⁻¹ of silicate, it was found that there was a 38% reduction in plant height and dry matter production of aerial parts was five times smaller. The *B. decumbens* plants subjected to high doses of calcium and magnesium silicate feature slowdown in growth .

Key Words: Silicate, production, grasses.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1- Valores médios de pH em água ao final do experimento, após o cultivo com *B. decumbens*, em função de doses de silicato de cálcio e magnésio. Manaus, AM, 2012/2013.....23
- Figura 2- Valores médios de fósforo (a), potássio (b), sódio (c), cálcio (d) e magnésio (e) no solo, ao final do experimento, após o cultivo com *B. decumbens*, em função de doses de silicato de cálcio e magnésio. Manaus, AM, 2012/2013.....27
- Figura 3- Valores médios de zinco (a), ferro (b), manganês (c) cobre (d) no solo, ao final do experimento, após o cultivo com *B. decumbens*, em função de doses de silicato de cálcio e magnésio. Manaus, AM, 2012/2013.....28
- Figura 4- Valores médios de cromo (a), níquel (b), cádmio (c) e chumbo (d) no solo, ao final do experimento, após o cultivo com *B. decumbens*, em função de doses de silicato de cálcio e magnésio. Manaus, AM, 2012/2013.....29
- Figura 5- Valores médios de altura das plantas (a), matéria seca da parte aérea (b), matéria seca das raízes (c) e matéria seca total (d) das plantas de *B. decumbens*, ao final do experimento, após o cultivo em função de doses de silicato de cálcio e magnésio. Manaus, AM, 2012/2013.....32
- Figura 6- Plantas de *B. decumbens* aos 31 dias submetidas à doses crescentes de silicato de cálcio e Magnésio. Manaus, AM, 2012/2013 33
- Figura 7- Valores médios de Ca (a), Mg (b) e Si (c) nas cinzas de *B. decumbens* em função das doses de silicato de cálcio e magnésio. Manaus, AM, 2012/2013.....35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Atributos químicos do Neossolo Quartzarênico antes da incubação com silicato de cálcio e magnésio.....	22
Tabela 2- Atributos físicos do Neossolo Quartzarênico antes da incubação com silicato de cálcio e magnésio.....	22
Tabela 3- Valores médios de Al ao final do experimento, após o cultivo com <i>B. decumbens</i> , em função de doses de silicato de cálcio e magnésio. Manaus, AM, 2012/2013	25
Tabela 4- Análise química do extrato obtido após tratamento da cinza do capim braquiária.....	33

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	09
2. OBJETIVOS.....	11
2.1. Objetivo geral.....	11
2.2. Objetivos específicos.....	11
4. REVISÃO DE LITERATURA.....	12
3.1. Silício.....	12
3.2. Comportamento do silício no solo.....	13
3.3. Absorção do silício pela planta.....	14
3.4. Distribuição do silício na planta.....	15
3.5. Silício e benefícios para as plantas.....	16
3.6. Fontes de silício.....	17
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
4.1. Local, espécies e fonte de silício.....	19
4.2. Instalação e condução do experimento.....	19
4.3. Avaliação das características fisiológicas.....	20
4.4. Análises laboratoriais	20
4.4.1 Teor de macronutrientes e micronutrientes.....	20
4.4.2 Análises químicas dos tecidos vegetais	20
4.5 Análises estatísticas.....	21
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5.1 Efeito das doses de Aplicação do silicato de cálcio e magnésio nos atributos químicos do solo	22
5.1.1 Efeito no pH em água	22
5.1.2 Efeito no teor de Alumínio e nutrientes.....	24
5.1.3 Efeito no teor de metais pesados	29
5.2 Parâmetros fenológicos e nutricionais das plantas de <i>B. decumbens</i>	30
6 CONCLUSÕES	36
7. REFERÊNCIAS.....	37

INTRODUÇÃO

O silício (Si) é um elemento extremamente abundante na natureza correspondendo a 27,7% em massa, superado apenas pelo oxigênio. A relação entre a absorção do silício e o crescimento vegetal foi investigado pela primeira vez há mais de 100 anos e sua essencialidade para as plantas vasculares foi demonstrada apenas para a família Equisetaceae, apesar de ser um constituinte majoritário dos vegetais (CHEN e LEWIN, 1969; EPSTEIN, 1994; MARSCHNER, 1995). No entanto, muitas outras espécies acumulam quantidades substanciais de silício em seus tecidos e apresentam melhoria no crescimento, quando supridas com quantidades adequadas desse elemento (EPSTEIN, 1999).

Na solução do solo o Si ocorre principalmente como ácido monossilícico (H_4SiO_4) e sua absorção nas raízes é por meio do fluxo de massa ou difusão (MITANI e MA, 2005). Depois de absorvido é transportado pelo xilema e depositado na parede celular como sílica amorfa hidratada ($\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$) ou pela biogênica na forma de corpos silicosos ou fitólitos. Uma vez depositado, o silício torna-se imóvel e não mais se redistribui na planta (BALASTRA et al., 1989).

A faixa de concentração do silício nas plantas é bastante ampla, inclusive entre cultivares da mesma espécie, variando de 0,1 a 10% do peso matéria seca, embora ocorram percentuais tanto menores como maiores (MA e TAKAHASHI, 2002; HODSON et al., 2005; EPSTEIN e BLOOM, 2006). Essa variação no acúmulo de silício permite classificar as plantas em três grupos: as acumuladoras de silício, em geral as monocotiledôneas (gramíneas), que têm processo ativo de absorção de Si, possuindo teor foliar acima de $10,0 \text{ g kg}^{-1}$ de silício na matéria seca; as intermediárias cujo teor é menor que $10,0 \text{ g kg}^{-1}$; e as não acumuladoras, em geral leguminosas, que são exclusoras na absorção de silício e têm teor foliar menor que $5,0 \text{ g kg}^{-1}$; (TAKAHASHI et al., 1990).

Apesar de não ser considerado um elemento essencial, os benefícios que esse propicia já foram comprovados em diversas pesquisas tais como: a redução do estresse hídrico por facilitar a planta melhor regular a transpiração; aumento da eficiência na fotossíntese por manter folhas mais eretas e rígidas e com maior interceptação da luz; atraso na senescência da planta; aumento da resistência à doenças, à pragas, ao frio, e à salinidade; menor toxidez por alumínio (Al), manganês (Mn), ferro(Fe) e boro (B) (ADATIA e BESFORD, 1986; EPSTEIN, 1999; MA et al., 2001; LUX et al., 2002; GUNES et al., 2007). Muitos destes benefícios são atribuídos à deposição de Si junto à epiderme das folhas, funcionando como uma barreira de proteção às plantas (EPSTEIN, 1999).

Diversos produtos de origem natural ou proveniente da indústria siderúrgica apresentam potencial para serem usados como fonte de silício para as plantas e em especial para as gramíneas. Um deles, são os silicatos que assim como os carbonatos podem elevar o pH do solo, fornecer Ca e Mg e aumentar a saturação por bases, neutralizando o Al trocável (ALCARDE, 1992).

Aumentos de produtividade com a adubação silicatada já foram constatados em poáceas, como cana-de-açúcar (KORNDÖRFER et al. 2001) e arroz (PEREIRA et al. 2004, RAMOS et al. 2008).

A pesquisa agrônômica tem buscado amenizar os custos de produção e o impacto da agricultura no meio ambiente, usando, para isso, produtos menos poluentes e de baixo custo para o agricultor. Neste sentido, o uso de Si pode se constituir em uma alternativa importante para o manejo de pragas e doenças, com reflexos interessantes para o aumento da produtividade das culturas (KORNDÖRFER et al. 2010).

Nesse sentido, objetivou-se avaliar os efeitos de doses de silicato de cálcio e magnésio sobre a produção de massa seca e absorção de nutrientes de *B. decumbens*, bem como as alterações nas características químicas do solo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o crescimento das plantas de *B. decumbens* Stapf em função de cinco doses de silicato de cálcio e magnésio.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Avaliar a influência do silicato de cálcio e magnésio nos atributos químicos do solo;
- ✓ Avaliar o crescimento das plantas de *B. decumbens* em função das doses aplicadas.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Silício

O Si é o segundo elemento em abundância na crosta terrestre superado apenas pelo oxigênio, apresenta número atômico 14 e massa atômica 28,0855. Possui três isótopos naturais, $^{28}\text{Si}=92,3\%$, $^{29}\text{Si}=4,7\%$, $^{30}\text{Si}=3,1\%$ (GREENWOOD e EARNSHAW, 1997).

Devido ao seu elevado grau de reação com o oxigênio, o silício não é encontrado em sua forma elementar na natureza, mas em formas combinadas com cátions. Esse elemento pode formar longas cadeias ou estruturas mais complexas, juntamente com o oxigênio, assumindo grande importância na química inorgânica (REDDI e INYANG, 2000).

Os minerais silicatados podem ser representados pela fórmula geral $\text{Si}_a\text{O}_b\text{X}_c$, no qual X pode ser um ou mais cátions, tais como alumínio (aluminossilicatos), magnésio (talco), cálcio (wollastonita), magnésio e ferro (olivina), zinco (calamina), sódio e alumínio (albita) e outros. Silicatos como, o vidro e areia, contém apenas hidrogênio como cátion acompanhante (SRIPANYAKORN, et al., 2005). A sílica (dióxido de silício) ocorre na natureza na forma cristalina como quartzo, cristobalita e tridimita; e na forma amorfa como vários tipos de opala.

Como fertilizante o silício já é utilizado no Japão há seis décadas no cultivo do arroz. Em outros países como Estados Unidos e Maurício, o uso também já está consolidado e análises de silício no solo é rotina nos laboratórios de fertilidade. No Brasil, somente em 2004 por meio do decreto lei número 4.954, que regulamenta a lei 6.894 de 16/01/1980, aprovada em 14 de janeiro de 2004, e que dispõe sobre a produção e comercialização de fertilizantes é que o silício foi incluído na lista de micronutrientes benéficos que podem ser comercializados (BRASIL, 2004).

3.2 Comportamento do silício no solo

Nos solos, o silício solúvel ou disponível para as plantas (H_4SiO_4 - ácido monossilícico, ácido ortossilícico ou simplesmente ácido silícico) pode ter origem nos processos de intemperização dos minerais primários e particularmente dos minerais secundários como os argilo-silicatos. A faixa de concentração típica desse ácido na concentração dos solos é de 0,1 a 0,6 mmol L^{-1} (EPSTEIN e BLOOM, 2006). Esse silício solúvel pode ser proveniente da decomposição de restos vegetais, dissociação do ácido silícico polimérico, liberação de silício dos óxidos de Fe e Al, dissolução de minerais cristalinos e não cristalinos, água de irrigação e adição de fertilizantes. Em pH acima de 9,0 e concentração superior a 2,0 mmol L^{-1} Si ocorre precipitação, pois há combinação de polímeros e de monômeros solúveis de H_4SiO_4 (MCKEAGUE e CLINE, 1963) que formam ácidos polissilícicos, os quais possuem dois ou mais átomos de Si e são dificilmente absorvidos pelas plantas. Para que o ácido monossilícico permaneça disponível para a planta, em solução, é necessário controle do pH e da concentração de Si. Em estudos da nutrição mineral de plantas envolvendo Si em solução nutritiva, recomenda-se a dose máxima de 1,8 mmol L^{-1} de Si, acima desse valor ocorre polimerização, tornando-o indisponível para absorção pelas plantas (KNIGHT e KINRADE, 2001).

De acordo com Lima Filho (2010), a maioria dos solos contém consideráveis quantidades de silício, mas os cultivos consecutivos podem diminuir a concentração deste elemento até o ponto em que a aplicação de silício tenha contribuição na obtenção de mais elevadas produções das plantas. Os solos de clima tropical, de modo geral, têm baixa disponibilidade desse elemento e devem responder à aplicação de silicato. Estes solos, normalmente apresentam baixo pH, alto teor de alumínio, baixa saturação em bases e alta capacidade de fixação de fósforo, além de uma atividade microbiológica reduzida. Solos

arenosos são particularmente pobres em silício assimilável pelas plantas, pois a forma predominante é o quartzo.

3.3 Absorção do silício pela planta

O processo de absorção do ácido monossilícico, que possui carga neutra, ocorre pela membrana das células epidérmicas, de um local de alta concentração para baixa concentração, pela dissolução através da membrana, podendo ocorrer por apoplasto ou por simplasto. Como a membrana hidrofóbica não permite entrada de água e consequente carregamento do soluto, a passagem do ácido monossilícico para dentro da célula da raiz pode ocorrer por difusão ativa ou por canais de entrada de água (RAVEN, 2001). A absorção ativa já foi demonstrada para algumas Poaceae, Cyperaceae e até mesmo para o gênero *Phaseolus* (leguminosa) (RAVEN, 2001). A absorção pode ocorrer ainda por proteínas (transportadores) específicas para o ácido monossilícico (MA et al., 2004; 2006; 2007). O ácido monossilícico pode passar da solução externa da raiz para dentro das células da epiderme por canais de água ou pelos espaços livres aparentes da membrana, atingindo os espaços intercelulares por simplasto.

O transporte e acúmulo de silício podem ser regulados pela transpiração, sendo esta a teoria considerada por alguns estudiosos da nutrição de silício em plantas (JONES e HANDRECK, 1967; EPSTEIN, 1999). Porém, tanto nas gramíneas quanto nas dicotiledôneas, inibidores respiratórios como azida sódica ou desacopladores do transporte eletrônico e da fosforilação oxidativa como dinitrofenol causam uma redução na absorção de silício sem nenhuma diminuição correspondente na transpiração (RUSSEL, 1971 apud MALAVOLTA; 2006). Assim, o transporte de silício pode, em parte, ocorrer sem relação alguma com a transpiração. O transporte e acúmulo de silício podem ser regulados por um processo ativo, que é desencadeado pelo estímulo à proteção contra doenças, pragas e outras condições de estresse, sugerindo que o acúmulo de silício na forma de $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ depende das

exigências das plantas para resistirem a uma condição de estresse (MARSCHNER, 1995; BÉLANGER et al., 2003; CURRIE e PERRY, 2007).

Atualmente, os mecanismos de absorção são mais bem compreendidos, sendo já caracterizados nas culturas de trigo, de arroz, de milho e de cevada onde o silício é absorvido de forma ativa através de proteínas de membranas específicas para o ácido monossilícico.

3.4 Distribuição do silício na planta

Após ser absorvido e transportado até a parte aérea o ácido monossilícico passa por transformações e deposita-se, na forma de sílica amorfa hidratada inicialmente nos tecidos mais jovens e posteriormente vai acumulando-se rapidamente nas células senescentes, sob a forma de sílica, também chamada de opala biogênica, fitólitos ou simplesmente corpos silicosos (DAYANANDAM et al., 1983). A deposição foliar de silício ocorre de forma rápida para as gramíneas (RAFI e EPSTEIN, 1999) com a sílica amorfa ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) depositada para 99% do silício total absorvido e menos de 1% fica na forma coloidal ou iônica (MA et al., 2001). Estes depósitos de sílica ocorrem com maior frequência na epiderme foliar com a sílica combinada às frações de polissacarídeos (celulose e hemicelulose) da parede celular, lúmen e espaços intercelulares (EPSTEIN, 1999).

Na epiderme foliar a sílica é incorporada à matriz celular, principalmente nas paredes exteriores da epiderme adaxial e abaxial e, dentro do lúmen de algumas células, tricomas e nas células buliformes (KAUFMAN et al., 1985). Os depósitos na parede exterior da epiderme fazem com seja formado uma dupla camada com cutícula, o que ajuda na defesa contra insetos e adversidades ambientais (EPSTEIN, 1999; KIM et al., 2002).

A concentração de sílica é maior na parte aérea do que na raiz, com maior concentração nas folhas velhas do que nas novas e maiores na parte basal (mais velha) do que na apical (mais nova) em folhas de gramíneas (WIESE et al., 2007). Na planta, o silício

concentra-se nos tecidos de suporte, do caule e nas folhas, podendo ser encontrado em pequenas quantidades nos grãos.

As plantas diferem quanto à capacidade de absorver e acumular silício e podem ser classificadas em três grupos: as acumuladoras de silício, em geral as monocotiledôneas (Poaceae), que tem processo ativo de absorção de silício, possuindo teor foliar acima de $10,0 \text{ g kg}^{-1}$ de silício na matéria seca; as intermediárias na acumulação de silício, têm absorção de silício por simplasto na mesma velocidade que a absorção de água e teor menor que $10,0 \text{ g kg}^{-1}$; e as não acumuladoras, em geral leguminosas, que absorvem silício a favor de um fluxo de transpiração de forma mais lenta que a absorção de água e discriminam o silício na absorção por simplasto, estas são exclusoras na absorção de silício com um teor foliar menor que $5,0 \text{ g kg}^{-1}$ de silício na matéria seca; (TAKAHASHI et al., 1990). Uma vez depositado nas folhas, o silício se torna imóvel e não há redistribuição das folhas velhas para as folhas novas.

3.5 Silício e benefícios para as plantas

Os benefícios do silício incluem melhor absorção de fósforo e aumento da tolerância à toxidez por Al, Mn, Fe, entre outros (TISDALE et al., 1993). Estes benefícios contribuem para o incremento da produtividade das culturas.

Existem alguns mecanismos propostos para a ação do silício na defesa das plantas contra a infestação de pragas e doenças e contra condições de adversidades ambientais. Um destes, é que o silício age como uma barreira física. É depositado junto da cutícula e forma uma camada dupla de sílica e cutícula (KIM et al., 2002) a qual mecanicamente pode impedir a penetração por fungos e, assim, obstrui o processo de infecção.

Outro mecanismo proposto é a defesa química induzida pelo silício solúvel, o qual age como ativador de resistência ao patógeno na produção de fenóis e fitoalexinas (FAWE et al., 2001; RODRIGUES et al., 2004). O silício, nesse caso, age como ativador de genes e sinalização na biossíntese de compostos de defesa, num processo denominado de resistência

sistêmica adquirida (RSA), que sintetiza compostos como as fitoalexinas, fenóis, fenilpropanóides, dentre outros (FAWE et al., 2001).

3.6 Fontes de silício

O silício não está no grupo de elementos essenciais para o crescimento das plantas. No entanto, o crescimento e a produtividade de muitas gramíneas, como arroz (*Oryza sativa*), cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), sorgo (*Sorghum bicolor*), milheto (*Pennisetum americanum*), aveia (*Avena sativa*), trigo (*Triticum aestivum*), milho (*Zea mays*), capim-quicuí (*Brachiaria humidicola*), grama-bermuda (*Cynodon dactylon*) e algumas espécies não gramíneas como alfafa (*Medicago sativa*), feijão (*Phaseolus vulgaris*), tomate (*Lycopersicon esculentum*), alface (*Lactuca sativa*) e repolho (*Brassica oleracea*), têm apresentado aumento com a disponibilidade de silício no solo (MARSCHNER, 1995).

Para fornecer esse elemento a estas culturas, diversas fontes de silício já estão disponíveis no mercado, sendo os silicatos as principais fontes para a agricultura. As características consideradas ideais para uma boa fonte de silício para fins agrícolas são: alta concentração de silício solúvel, boas propriedades físicas, facilidade para a aplicação mecanizada, pronta disponibilidade para as plantas, boa relação e quantidades de cálcio e magnésio, baixa concentração de metais pesados e baixo custo. Os silicatos possuem efeito corretivo e a sua aplicação ao solo aumenta o pH, reduz os teores de Al^{+3} , eleva a saturação por bases e a saturação por Al diminui (KORNDÖRFER e GASCHO, 1999). A aplicação ocorre principalmente na forma sólida (pó ou granulado), mas também podem ser aplicados na forma líquida (via solo ou foliar).

Muitos materiais têm sido usados como fonte de silício para as plantas: escórias de siderurgia, wollastonita, subprodutos da produção de fósforo elementar, silicato de cálcio,

silicato de sódio, cimento, termofosfato, silicato de magnésio, silicato de cálcio e magnésio, silicato de potássio e ácido silícico.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Local, espécies e fonte de silício

O experimento foi realizado em casa de vegetação da Faculdade de Ciências Agrárias/UFAM. A espécie selecionada foi a braquiária (*B. decumbens* Stapf) e utilizado como substrato o Neossolo Quartzarênico hidromórfico (RQg), devido ao baixo teor de silício ($0,5 \text{ mg dm}^{-3}$).

A fonte de silício incorporado ao substrato foi o AgroSilício[®] em pó, formulado à base de silicato de cálcio e magnésio e composto por: 34,9% de CaO, 9,9% de MgO e 22,4% de SiO₂ (KORNDÖRFER et al. 2004b).

4.2 Instalação e condução do experimento

A unidade experimental constou de um vaso plástico com capacidade para 4 L, contendo 3 kg do substrato. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado com quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos de braquiária com cinco doses de silicato (0; 300; 600; 1200 e 2400 kg ha⁻¹).

A adubação foi conforme análise do solo : 0,2 g kg⁻¹ de sulfato de amônio e super fosfato triplo (SFT); 0,12 g kg⁻¹ de cloreto de potássio (KCl); e como fonte de micronutrientes 0,1 g kg⁻¹ FTE BR 12 (9% de Zn, 1,8% B, 2% Mn, 0,8% Cu, 0,1% Mo e 3% de Fe), juntamente com carbonato de cálcio e carbonato de magnésio p.a., utilizado para balancear os teores de Ca e Mg. Todos os vasos receberam a mesma quantidade de nutrientes, com exceção do nutriente Si, permanecendo incubados pelo período de 15 dias com umidade na capacidade de campo, controlada por pesagem diária. Os vasos foram cobertos com lona plástica, para reduzir a perda de água, e sempre que necessário irrigados com água destilada.

Em cada vaso foram semeadas sete sementes da espécie, e após sete dias foi feito o desbaste ficando apenas cinco plantas por vaso.

4.3 Avaliação das características fisiológicas

A altura das plantas foi medida trinta dias após o semeio. Em seguida, separadas em parte aérea (colmo+folhas) e raiz. O peso da matéria da parte aérea e radicular foram obtidas após serem lavadas e acondicionadas em sacos de papel e colocadas em estufa de circulação forçada de ar a 60° C até atingirem peso constante (BENICASA, 2003). Em seguida o material foi pesado, e as folhas trituradas e acondicionado em sacos plásticos para análises laboratoriais.

4.4 Análises laboratoriais

4.4.1 Teor de macronutrientes e micronutrientes

Ao final do experimento, amostras do substrato foram analisadas no laboratório de Análise de Solos da Universidade Federal de Viçosa, a fim de determinar o teor de macro e micronutrientes. Para o P, Na, K, Fe, Zn, Mn, e Cu, Cr e Ni foi utilizado o extrator Mehlich-1; Ca, Mg e Al foi o extrator em KCl-1mol/L; e o pH em água- relação 1:2,5 (UFV, 2005).

4.4.2 Análises químicas dos tecidos vegetais

A análise do tecido vegetal também foi realizada na UFV. As amostras foram colocadas para queimar em forno mufla durante 1 hora a 300 °C (abertura da porta por 10 min para oxigenação) mais 1 h a 300 °C (abertura da porta por 10 min para oxigenação) e por fim 2 horas a 500 ° C. Para extração foi pesado 0,1g de amostra (cinzas) e adicionado 10 mL de

HCl 2 mol L⁻¹. Em seguida, as amostras foram agitadas por 1 hora na velocidade de 180 RPM feita a leitura no espectrofotômetro de absorção atômica.

4.5 Análises estatísticas

Os dados coletados foram submetidos à análise de variância e as médias comparando-pelo teste de Scott-knott a 5% de probabilidade. Para seleção das equações, com o auxílio do *software Table Curve*, foram consideradas: a equação que proporcionasse explicação biológica do tratamento, a mais simples e de considerável ajuste aos dados originais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Efeito das doses de aplicação do silicato de cálcio e magnésio nos atributos químicos do solo

Os atributos químicos e físicos do Neossolo Quartzarênico, nas condições iniciais antes da aplicação do silicato encontram-se nas tabelas 1 e 2. Estes dados mostram que este solo apresenta uma baixa fertilidade e uma elevada acidez.

Tabela 1- Atributos químicos do Neossolo Quartzarênico antes da incubação com silicato de cálcio e magnésio.

pH	MO	Si	P	K	Na	Ca	Mg	Al	H + Al	Fe	Zn	Mn	Cu
H ₂ O	g Kg ⁻¹	mg dm ⁻³				cmol _c dm ⁻³				mg dm ⁻³			
5,23	1,54	0,5	1,00	2,00	1,00	0,10	0,03	0,40	1,57	5,00	0,09	0,02	0,13

Tabela 2- Atributos físicos do Neossolo Quartzarênico antes da incubação com silicato de cálcio e magnésio.

Areia grossa	Areia fina	Areia total	Silte	Argila	Classificação textural do solo(*)
2,00 - 0,20 mm	0,20 - 0,05 mm	2,00 - 0,05 mm	0,05 - 0,002 mm	< 0,002 mm	
g kg ⁻¹					
778,95	190,23	969,18	14,32	16,50	Areia

(*) Embrapa, 1997

5.1.1 Efeito no pH em água

A partir das análises de solo realizadas ao final do experimento, após a colheita da massa fresca, constatou mudanças nas características químicas do solo (Figura 1).

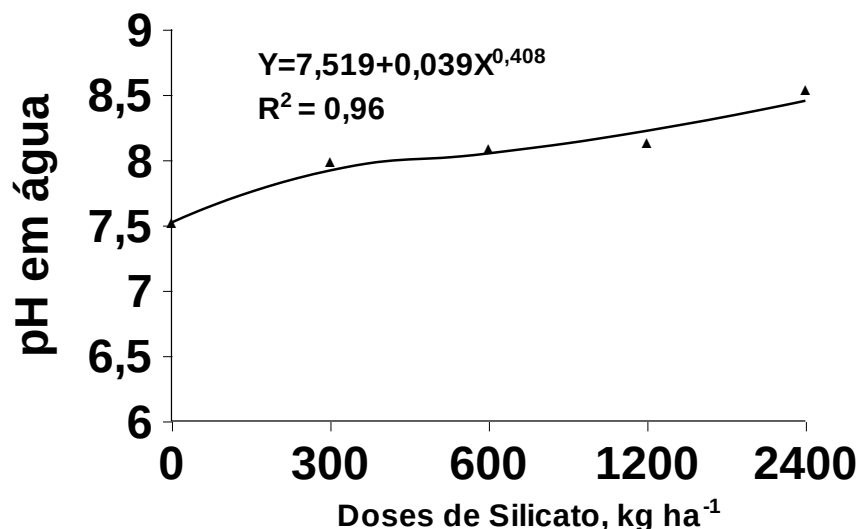


Figura 1-Valores médios de pH em água ao final do experimento, após o cultivo com *B. decumbens*, em função de doses de silicato de cálcio e magnésio. Manaus, AM, 2012/2013.

À medida que aumentou as doses de silicato, o pH respondeu linearmente. Isto corrobora resultados encontrados por Faria (2000) ao observar aumento linear nos valores de pH do solo após aplicação de silicato de cálcio, variando de 4,6 para 5,1 em um LVA, com as doses de silício de 0 a 600 kg ha⁻¹. Este comportamento pode ser explicado pela capacidade que o silicato tem de neutralizar prótons presentes no meio (ALCARDE, 1992).

Apesar de não receber doses de silicato, o tratamento zero também apresentou aumento no pH de 5,23 para 7,5. Este aumento é consequência da adição de carbonato de cálcio e carbonato de magnésio p.a. com o objetivo de equilibrar a quantidade desses nutrientes nos tratamentos, para que houvesse variação apenas do Si entre os tratamentos.

Uma das principais limitações da aplicação de altas doses de Si ao solo é baixa de teor de Si solúvel e um alto poder neutralizante. Logo o poder neutralizante pode ser limitante, principalmente pelo aumento no pH do solo, a níveis tais que possam causar sérios impedimentos químicos e nutricionais para o crescimento dos cultivos. Neste sentido Carvalho Filho, et al., (2007) avaliaram a agressividade da adubação com agrossilício em

plantas de milho, e concluíram que valores de silício maior que 200 kg ha⁻¹ podem ser tóxicos para o crescimento das raízes, porque além de aumentarem o pH, podem causar salinidade do fertilizante afetando assim o potencial osmótico

A maioria das plantas apresentam crescimento favorável na faixa de pH do solo entre 5,5 a 6,5. Valores de pH abaixo de 5,5 podem ocasionar danos ao crescimento em razão de elevadas concentrações de elementos tóxicos como Al e Mn. Porém o pH alto afeta a disponibilidade de nutrientes essenciais ao metabolismo das plantas (MALAVOLTA, 2006).

Pereira e Korndörfer (2003), em estudo sobre fontes de silício para plantas, concluíram que o efeito positivo dos silicatos está normalmente associado ao aumento do silício disponível e do pH em solos com valores de pH baixos.

5.1.2 Efeito no teor de Alumínio e nutrientes

Em solos ácidos, o elemento que mais tem efeito fitotóxico é o Al na forma de cátion trivalente hidratado ou parcialmente hidrolisado (FOY, 1974). Sem dúvida o principal fator de controle deste elemento na solução do solo é o pH, pois a sua solubilidade é muito baixa ou nula em pH superior a 5,5 e sua toxidez é severa em pH abaixo de 5,0 (FAGERIA,1998).

A neutralização do Al trocável do solo pela adição de materiais corretivos pode ocorrer devido a formação de hidróxidos complexos provenientes da hidrólise do alumínio trivalente livre na solução do solo que transformam-se em formas precipitadas e não tóxicas para os vegetais (QUAGGIO, 1986).

Em solos com altos teores de matéria orgânica, a adição de corretivos pode estimular a microbiota, que promove a decomposição da matéria orgânica e favorece a formação de ácidos orgânicos. Estes podem neutralizar o alumínio trocável formando complexo orgânico mais forte que complexação inorgânica (ZONTA, 2003).

Devido ao baixo teor de matéria orgânica ($1,54 \text{ g kg}^{-1}$) do Neossolo quartzarênico (Tabela 3) sugere-se que o Al foi complexado de forma inorgânica.

Tabela 3- Valores médios de Al ao final do experimento, após o cultivo com *B. decumbens*, em função de doses de silicato de cálcio e magnésio. Manaus, AM, 2012/2013.

DOSE DE SILICATO kg ha^{-1}	TEOR de Al cmolc dm^{-3}
0	0,4
300	0
600	0
1200	0
2400	0

Com a elevação do pH ocorre aumento da solubilidade dos fosfatos de ferro e alumínio e redução da adsorção do ânion fosfato à fase sólida do solo. Como técnica alternativa para correção de acidez do solo, pode-se utilizar o silicato de cálcio e magnésio, com reações semelhantes as do calcário, que além de elevar o pH, disponibiliza o ânion silicato (H_3SiO_4^-) e este concorre com o ânion fosfato, pelo mesmo sítio de adsorção, saturando dessa forma o ponto onde possivelmente seria adsorvido o fósforo (CARVALHO, 2009).

A fertilização silicatada não alterou significativamente os teores de P no solo entre os tratamentos (Figura 2a). Também houve aumento do teor de K e Na com a suplementação de silicato (Figura 2b e 2c). O solo do tratamento com 2400 kg ha^{-1} de silicato apresentou teores de Na 2,7 vezes maior do que o tratamento com a dose 0 kg ha^{-1} .

O Na reage bem em solos com pH acima de 8,5 podendo contribuir com 25% ou mais do total de cátions trocáveis e, nestas condições, as plantas cultivadas poderão apresentar problemas pelo excesso desse elemento (toxidez). Essa toxidez é demonstrada pela redução no crescimento e produção, além da clorose e murcha das plantas.

A função do Na nas plantas é similar a do potássio: ativador de uma ampla gama de enzimas; ativador da ATPase que está envolvido na osmose da membrana; facilita absorção de N, P, K em algumas plantas devido permeabilidade das células aos sais (TAIZ e ZEIGER, 2004).

Para o Ca não houve praticamente aumento com o aumento das doses de Si. Já o Mg houve significativo aumento para todos os tratamentos (Figura 2d e 2e).

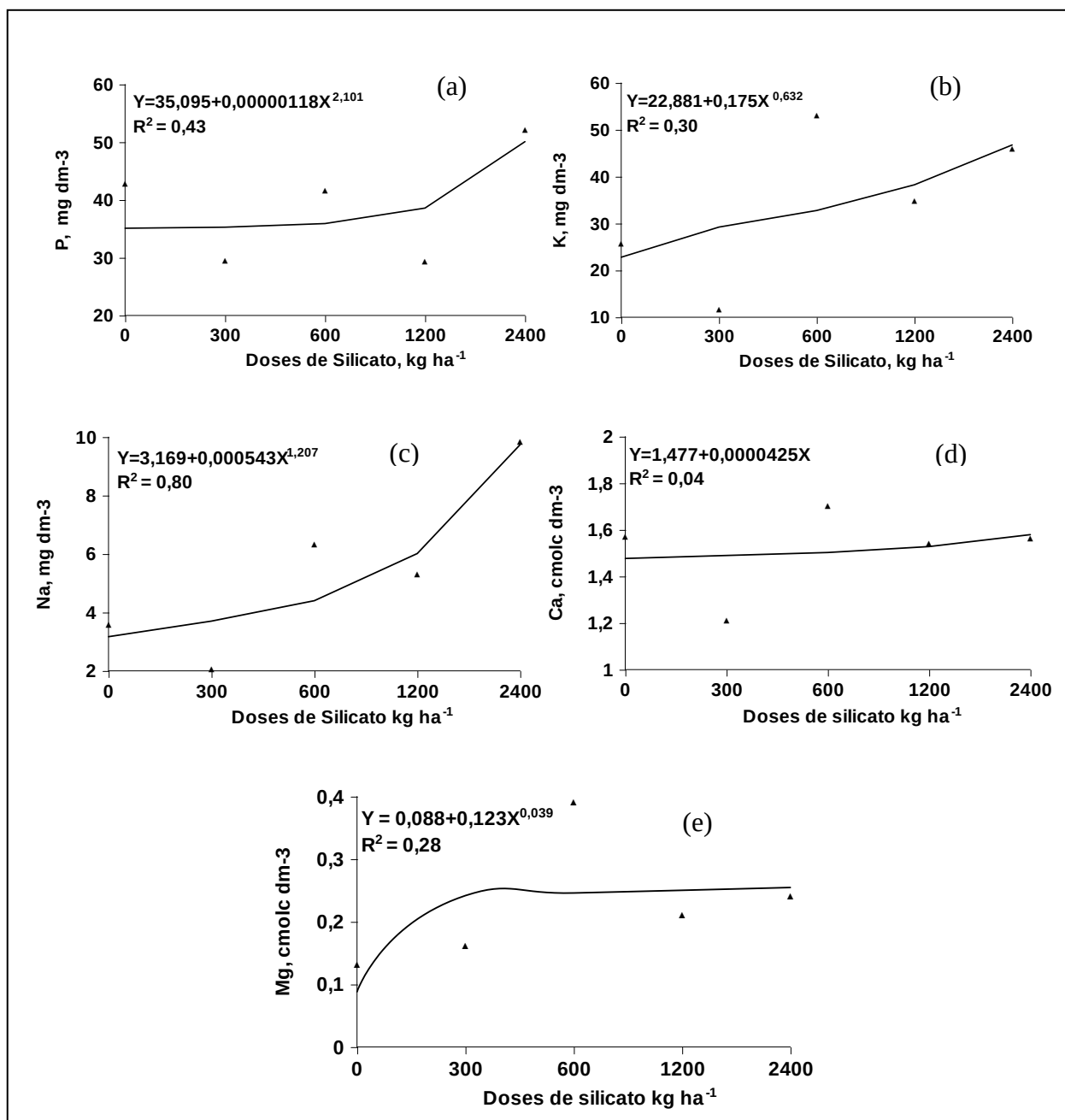


Figura 2- Valores médios de fósforo (a), potássio (b), sódio (c), cálcio (d) e magnésio (e) no solo, ao final do experimento, após o cultivo com *B. decumbens*, em função de doses de silicato de cálcio e magnésio. Manaus, AM, 2012/2013.

Na Figura 3 observa-se o comportamento dos micronutrientes em função das doses de silicato aplicadas no solo.

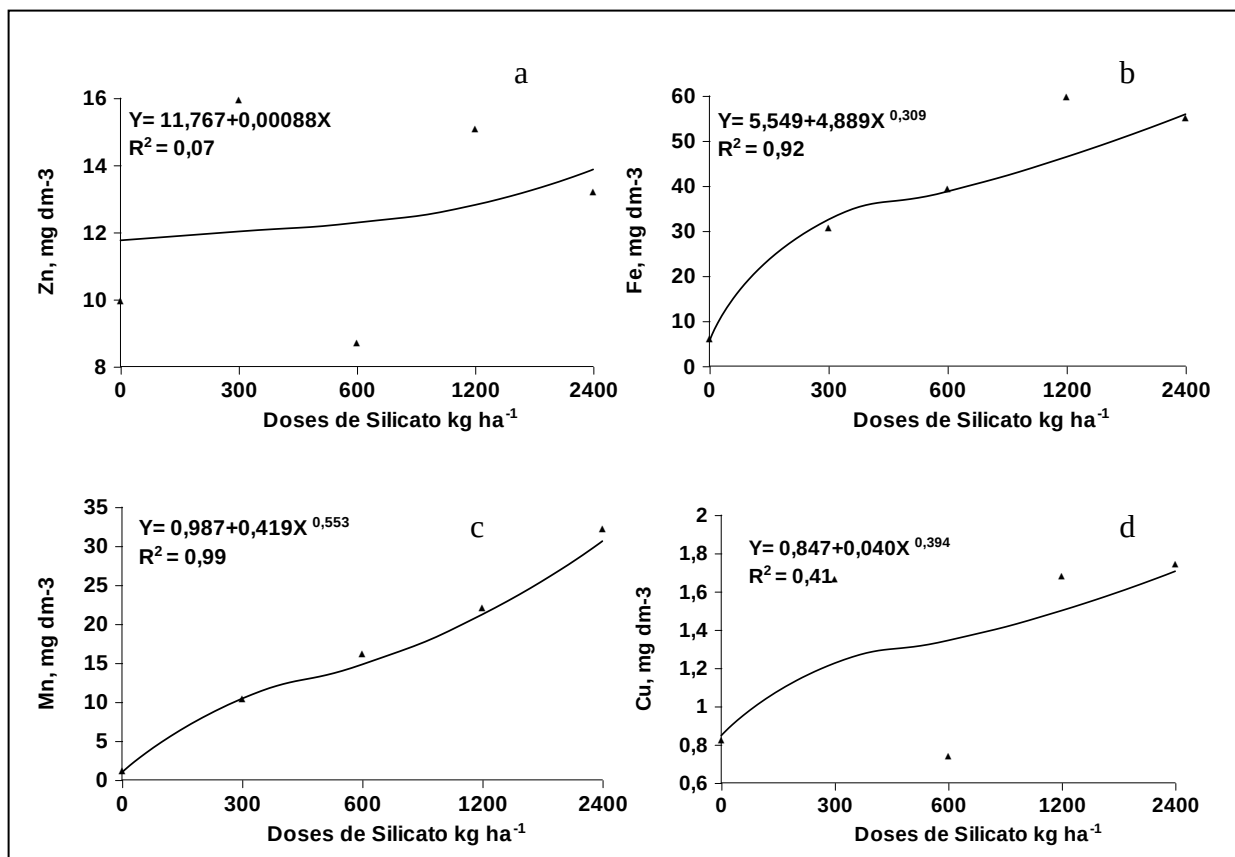


Figura 3- Valores médios de zinco (a), ferro (b), manganês (c) cobre (d) no solo, ao final do experimento, após o cultivo com *B. decumbens*, em função de doses de silicato de cálcio e magnésio. Manaus, AM, 2012/2013.

Os micronutrientes Zn e Cu não diferiram estatisticamente. Enquanto o Fe e Mn apresentaram forte crescimento linear em função das doses de silicatos que promoveram aumento no pH do solo. Apesar do aumento no teor desses dois últimos micronutrientes no solo, isto não quer dizer que estejam disponíveis para as plantas. Tanto o Fe quanto o Mn, a presença nas formas disponíveis ocorre em pH baixo (MALAVOLTA, 2006).

5.1.3 Efeito no teor de metais pesados

Para todos os metais pesados houve aumento com as doses de silicato (Figura 4). O aumento entre a dose 0 kg ha⁻¹ e 2400 kg ha⁻¹ foi de 8,21 vezes para Cr; 12,64 para Ni; 5,75 para Cd; e 1,35 vezes para Pb. Mesmo com esses aumentos, os valores ficaram abaixo dos níveis considerados críticos pela resolução CONAMA 420/2009.

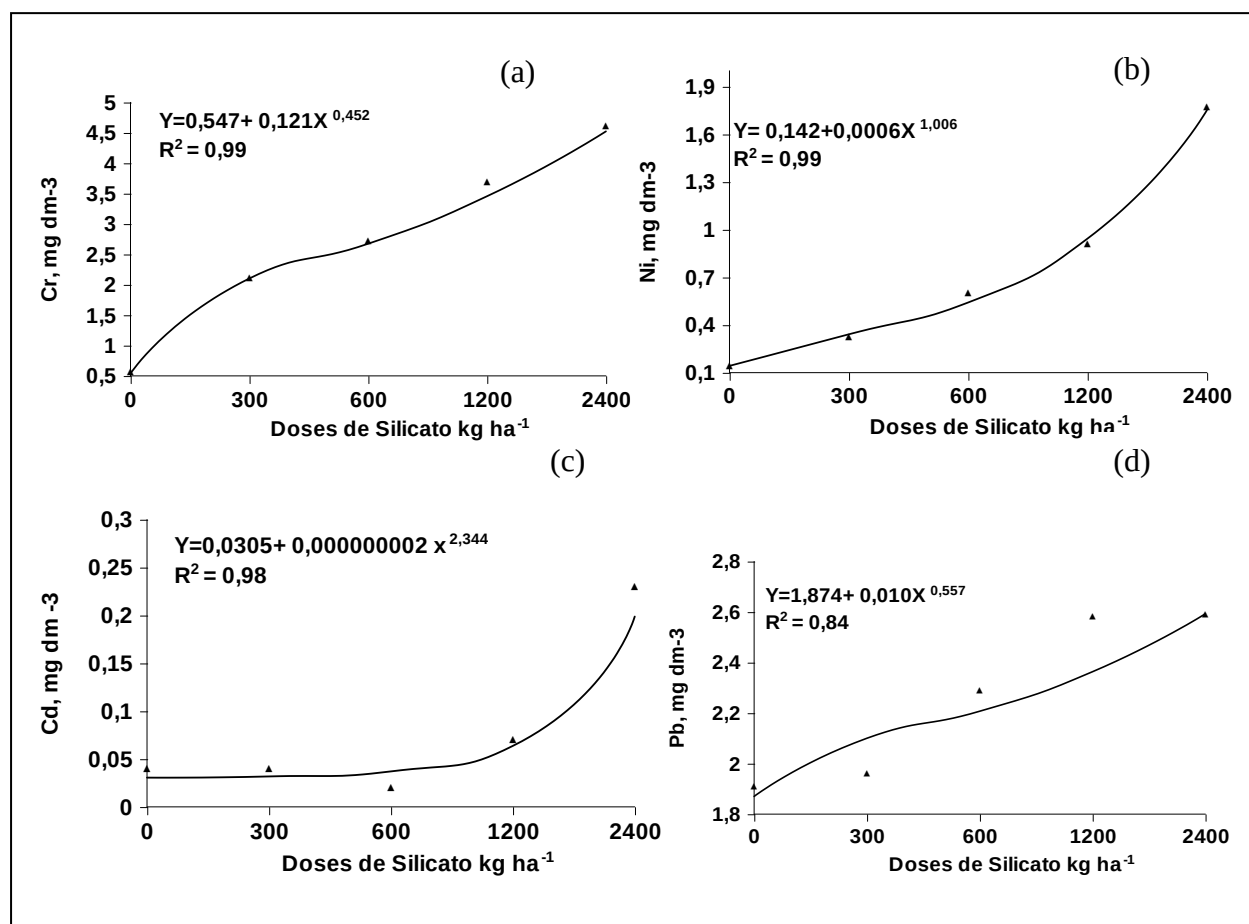


Figura 4- Valores médios de cromo (a), níquel (b), cádmio (c) e chumbo (d) no solo, ao final do experimento, após o cultivo com *B. decumbens*, em função de doses de silicato de cálcio e magnésio Manaus, AM, 2012/2013.

O aumento desses metais pesados é um agravante no uso de silicato como corretivo da acidez do solo, principalmente as escórias de siderurgia, por ser um resíduo de um processo

industrial. É referenciado algumas vezes por falta de esclarecimentos, como um poluente, tóxico, perigoso e a aplicação de doses elevadas, na ordem de t. ha⁻¹, seria a contaminação com metais pesados, mas este é um inconveniente que qualquer outro corretivo pode conter.

Esta questão está intimamente ligada à composição do material, sendo, portanto, necessário a utilização de materiais de composição conhecida que se enquadre dentro da legislação vigente (BRASIL, 2006).

Trabalho de Amaral et al. (1994) avaliaram a liberação de zinco, ferro, manganês e cádmio de quatro corretivos de acidez para a cultura da alface e concluíram que a composição e a dose do corretivo influenciaram a absorção destes elementos pela alface. Já a escória de alto-forno em comparação ao carbonato de cálcio puro (CaCO₃ p.a.) aumentou o teor na parte aérea da alface de Fe e Mn quando se aplicou o dobro da dose indicada pela necessidade de calagem.

Os resultados nas alterações químicas do solo, promovidas pela aplicação do silicato, corroboram os relatos de Savant et al. (1997), os quais salientam que o uso desta fonte poderia ser aplicado como corretivo de solo, com a vantagem de possuir Si em sua composição, o que tornaria as plantas menos suscetíveis a estresse, especialmente as poáceas forrageiras.

5.2 Parâmetros fenológicos e nutricionais das plantas de *B. decumbens*

Em relação ao crescimento das plantas, o modelo linear foi o que melhor se ajustou aos dados originais (Figura 5).

Esse resultado diverge do encontrado por Melo et al. (2003) ao trabalhar em *B. decumbens* e *Brachiaria brizantha* cuja aplicação de Si ao solo não alterou as características da planta; e por Korndörfer et al. (2001) que constataram aumento de 17% na produção de massa seca de *B. decumbens*, utilizando Latossolo Vermelho-Amarelo com aplicação superficial 2000 kg ha⁻¹ de silicato de cálcio.

Ao comparar as plantas controle com as submetidas ao tratamento de 2400 kg ha⁻¹ de silicato (Figuras 5 e 6), constatou-se que houve redução de 38% na altura das plantas e que a produção de matéria seca da parte aérea foi cinco vezes menor. A redução também foi observada para matéria seca da raiz e total.

Embora haja relato de que plantas suplementadas com Si são menos afetadas por estresses de origem biótica ou abiótica e, ou, apresentam melhor crescimento (MA e TAKAHASHI, 2002). Entretanto, os resultados desta pesquisa demonstrou que a adubação com silicato de cálcio e magnésio causou restrição no crescimento das plantas de braquiária.

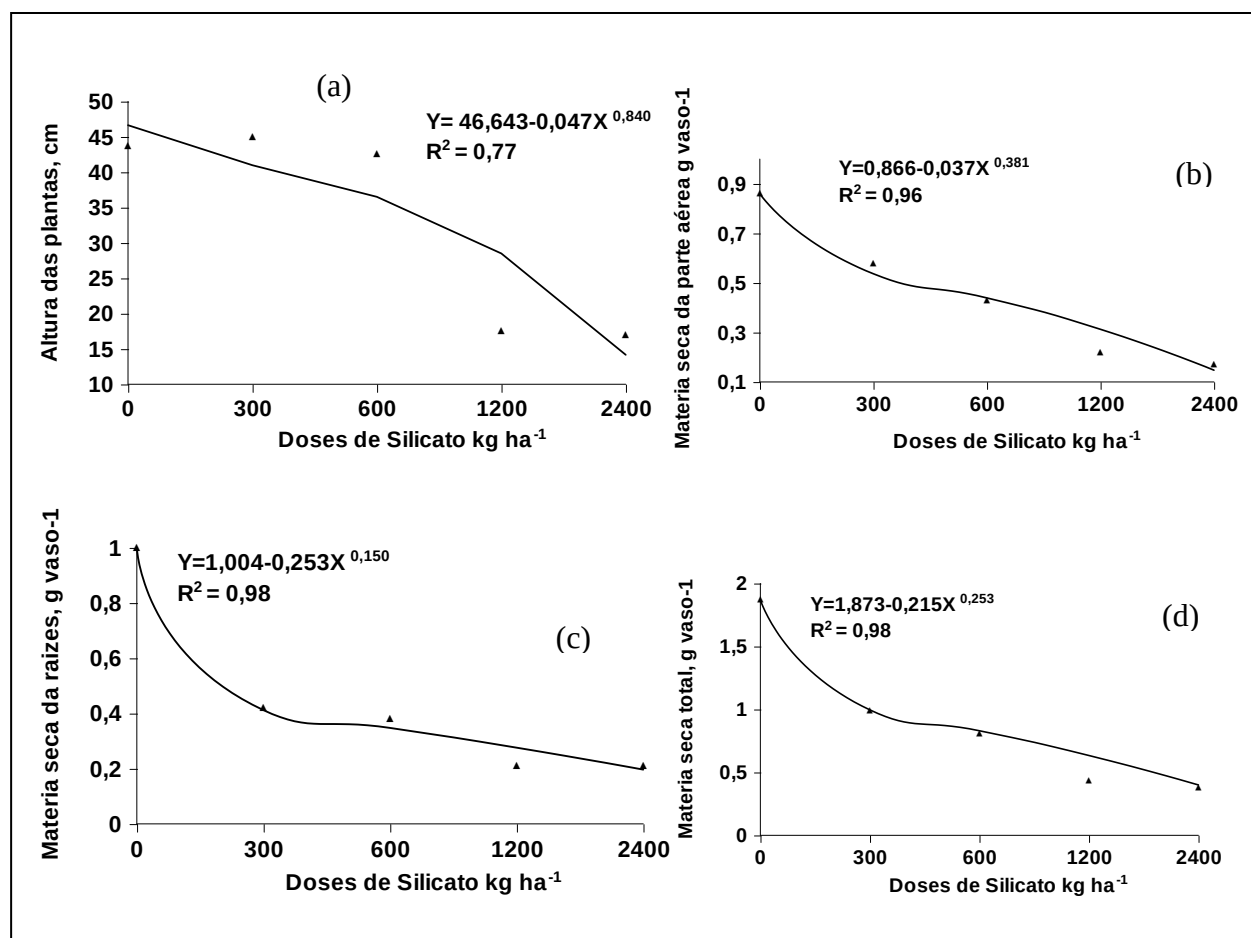


Figura 5- Valores médios de altura das plantas (a), matéria seca da parte aérea (b), matéria seca das raízes (c) e matéria seca total (d) das plantas de *B. decumbens*, ao final do experimento, após o cultivo em função de doses de silicato de cálcio e magnésio. Manaus, AM, 2012/2013.

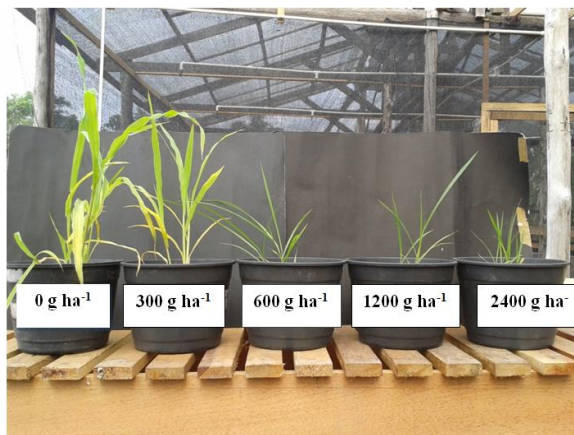


Figura 6- Plantas de *B. decumbens* aos 31 dias submetidas às doses crescentes de silicato de cálcio e Magnésio. Manaus, AM, 2012/2013.

Com o pH fora da faixa considerada adequada, a deficiência ou toxidez nutricional poderá ocorrer e a produção das culturas ser prejudicada e, conseqüentemente, a eficiência nutricional diminuir (MALAVOLTA, 2006). Os elementos químicos presentes nas cinzas do capim braquiária estão registrados na Tabela 4 e Figura 7.

Tabela 4- Análise química do extrato obtido após tratamento da cinza do capim braquiária.

Doses de silicato	Teores no extrato					
	Fe	Cr	Cu	Mn	Ni	Zn
kg ha ⁻¹	mg kg ⁻¹					
0	332,80b	8,80c	37,25a	323,07a	3,45a	661,05ns
300	291,55b	9,55c	35,65a	363,35a	3,72a	531,22ns
600	274,87b	7,17c	31,20a	317,90a	0,60b	579,45ns
1200	493,70a	11,75b	34,32a	208,82b	4,70a	593,65ns
2400	521,62a	14,77a	24,22b	309,20a	2,20b	584,15ns
CV(%)	26,68	18,62	11,19	20,21	53,63	17,40

Letras iguais na mesma coluna não representam diferenças significativas pelo teste de Scott-Knott ao nível de significância de 5%; ns-não significativo.

Os principais constituintes da cinza foram Ca, Mg e Si que aumentaram significativamente com as doses de silicato aplicadas ao solo (Figura 7). Apesar das concentrações do Ca e Mg acima da faixa considerada adequada ($10-50 \text{ g kg}^{-1}$ e $3-5 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente) para um crescimento normal das plantas, não há relatos na literatura de toxidez por estes elementos.

Para o silício, o teor encontrado nas cinzas comprova que a braquiária é uma acumuladora de Si, respondendo proporcionalmente às doses aplicadas ao solo (Figura 7).

O que chama atenção nos dados apresentados na tabela 3, é a ausência de traços de P nas cinzas das plantas. De acordo com Werner (1986), o fósforo é um nutriente muito importante para as braquiárias, sobretudo nos períodos iniciais de desenvolvimento da planta e com grande influência no perfilhamento. O mesmo autor também especificou com base em dados de parte aérea e de raízes, que entre os três macronutrientes, o P é o nutriente mais limitante no crescimento dessas culturas. Em quantidades adequadas, o P estimula o desenvolvimento radicular, o que certamente está relacionado à absorção de nutrientes e, conseqüentemente, à eficiência nutricional.

Com o aumento nas doses de silicato de cálcio e magnésio e conseqüentemente do pH, o P presente na solução transformou-se em uma forma indisponível para as plantas prejudicando seu crescimento.

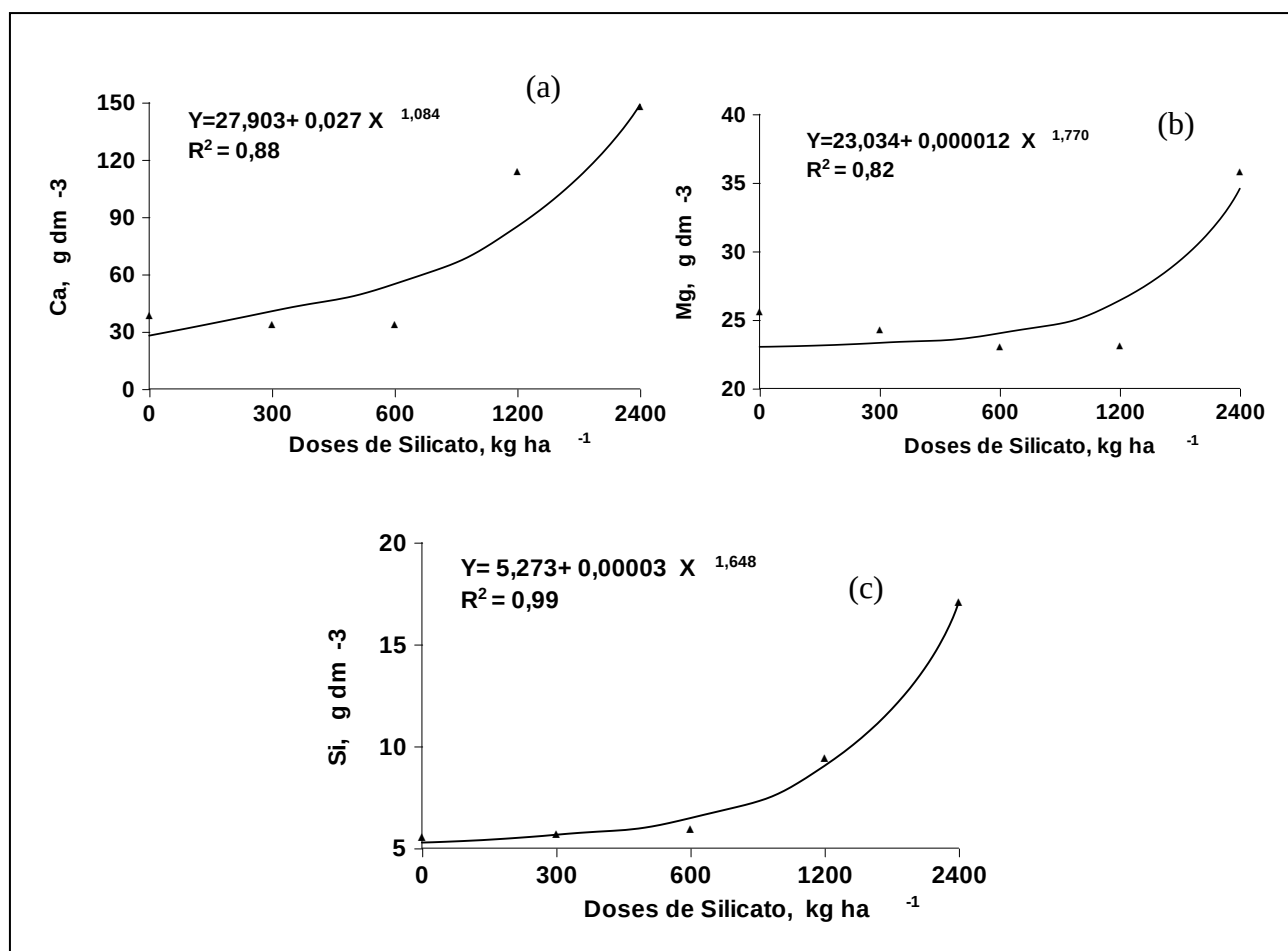


Figura 7- Valores médios de Ca (a), Mg (b) e Si (c) nas cinzas de *B. decumbens* em função das doses de silicato de cálcio e magnésio. Manaus, AM, 2012/2013.

6 CONCLUSÕES

O silicato de cálcio e magnésio aplicado ao solo aumentou os valores de pH, neutralizou o alumínio e aumentou os teores de micronutrientes e sódio no solo;

A disponibilidade de fósforo foi afetada negativamente com o aumento do pH;

As plantas de *B. decumbens* tiveram seu crescimento reduzido com a aplicação de silicato ao solo.

7 REFERÊNCIAS

ADATIA, M.H.; BESFORD, R.T. The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution. **Annals of Botany**, v.58, p.343-351, 1986.

ALCARDE, J.C.; **Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas**. São Paulo, Associação Nacional para difusão de Adubos, 1992 (Boletim técnico, 6).

AMARAL, A. S. et al. Liberação de Zn, Fe, Mn e Cd de quatro corretivos de acidez e absorção por alface em dois solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 29, n. 9, p. 1351-1358, 1994.

BALASTRA, M. L. F. et al. Effects of silica level on some properties of *Oriza sativa* straw and hult. **Canadian Journal Botany**, Ottawa, v. 67, n. 8, p. 2356-2363, 1989.

BÉLANGER, R.R.; BENHAMOU, N.; MENZIES, J.G. Cytological evidence of an active role of silicon in wheat resistance to powdery mildew (*Blumeria graminis* f. sp tritici). **Phytopathology**, St. Paul, v. 93, n. 4, p. 402–412, 2003.

BENICASA, M.M.P. **Análise de crescimento de plantas, noções básicas**. 2ª ed. Jaboticabal. FUNEP, 2003. 41p.

BRASIL. Decreto nº 4954, de 14 de janeiro de 2004, Aprova o regulamento da lei nº 6894 de 16 de janeiro de 1980, que dispõe sobre inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes ou biofertilizantes destinados à agricultura, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 15 jan. 2004. Seção 1, p. 2. Disponível em: < <http://www.mp.rs.gov.br/ambiente/legislacao/id4617.htm> >. Acesso em: 22 jan. 2011.

BRASIL, 2006. Ministério da Agricultura- **Instrução Normativa nº 27, de 5 de junho de 2006.** Aprova os limites máximos de agentes fitotóxicos, patogênicos ao homem, animais e plantas, metais pesados tóxicos, pragas e ervas daninhas admitidos nos fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes destinados à agricultura.

CARVALHO FILHO, A; et al. Agressividade da adubação com silicato sobre a germinação do milho. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.8, n. 2, p.199-203, 2007.

CARVALHO, R. Interações **silício-fósforo em Latossolo Vermelho-Escuro e Cambissolo cultivados com mudas de eucalipto**. Lavras, 1999. 89p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras.

CHEN, C.H.; LEWIN, J. Silicon as a nutrient element for *Equisetum arvense*. **Canadian Journal of Botany**, v.47, p.125-131, 1969.

CONAMA, 2009. Conselho Nacional do Meio Ambiente - Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009.

CURRIE, H.A.; PERRY, C.C. Silica in plants: biological, biochemical and chemical studies. **Annals of Botany**, Oxford, v. 100, n. 7, p. 1383-1389, 2007.

DAYANANDAM, P., KAUFMAN, P. B., FRAKIN, C. I. Detection of silica in plants. **American Journal Botany**, v. 70, p.1079-1084, 1983.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de solos, 1997 212 p.

EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v.91, n.1, p.11-17, 1994.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**. v. 50, p.641-664, 1999.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. 2. ed. Londrina: Planta, 2006. 403 p.

FAGERIA, N.K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v 2, p. 6-16, 1998.

FARIA, R.J. Influência do silicato de cálcio na tolerância do arroz de sequeiro ao déficit hídrico do solo. Viçosa, 2000. 47p. Dissertação (Mestrado) -Universidade Federal de Viçosa.

FAWE, A. et al. Silicon and disease resistance in dicotyledons. In: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.; KORNDÖFER, G.H. (Ed.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. p. 159-170.

FOY, C.D. Effects of aluminium on plant growth. In: CARSON, E.W., ed. *The plant root and its environment*. Charlottesville, University Press of Virginia, 1974. p. 601-642.

GREENWOOD, N.N.; EARNSHAW, A. **Chemistry of the elements**. 2th Ed. Butterworth-Heinemann. Oxford. p. 328-366. 1997.

GUNES, A. et al. Silicon mediated changes of some physiological and enzymatic parameters symptomatic for oxidative stress in spinach and tomato grown in sodic-B toxic soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 290, p. 103-114, 2007.

HODSON, M.J. et al. Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. *Annals of Botany* 96: 1027-1046, 2005.

JONES, L.H.P.; HANDRECK, K.A., Silica in soils, plants, and animals. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 19, p. 107-149, 1967.

KAUFMAN, P.B. et al. Structure and function of silica bodies in the epidermal system of grass shoots. **Annals of Botany**, Oxford, v. 55, n. 4, p. 487-507, 1985.

KIM, S.G. et al. Silicon-induced cell wall fortification of rice leaves: a possible cellular mechanism of enhanced host resistance to blast. **Phytopathology**, St. Paul, v. 92, n. 10, p. 1095-1103, 2002.

KNIGHT, C.T.G.; KINRADE, S. A primer on the aqueous chemistry of silicon. In: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.; KORNDÖRFER, G.H. (Ed.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. p. 57–86. (Studies in Plant Science, 8).

KORNDÖRFER, C.M.; KORNDÖRFER, G.H.; LANA, R.M.Q. et al. Correção da acidez do solo com silicato de cálcio e o papel do silício na recuperação de pastagem degradada de *Brachiaria decumbens*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28., Londrina, 2001. **Anais**. Londrina: SBCS, 2001. p.144.

KORNDÖRFER, G.H. et al. Efeito da adubação silicatada sobre gramíneas forrageiras e características químicas do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. Goiânia, v. 40, n. 2., p. 119-125, 2010.

KORNDÖRFER, G.H.; PEREIRA, H.S.; NOLLA, A. **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. Uberlândia: GPSi/ICIAG/UFU, 2004b. 34 p. (Boletim Técnico, 2).

KORNDÖRFER, G.H.; PEREIRA, H.S.; CAMARGO, M.S. **Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura**. Uberlândia: GPSi-ICIAG/UFU, 2004. 23p. (Boletim Técnico1).

KORNDÖRFER, G. H.; GASCHO, G. J. Avaliação de fontes de silício para o arroz. In: Congresso brasileiro de arroz irrigado, 1. reunião da cultura do arroz irrigado, 23. Pelotas, 1999. **Anais**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. p.313-316.

LIMA FILHO, O. F. Aspectos gerais sobre o silício em solos, plantas e animais. In: RODRIGUES, F. A. (Editor). **Silício na Agricultura: Anais do V simpósio brasileiro de silício na agricultura**. Viçosa, MG: UFV, p. 47-60, 2010.

LUX, A. et al. Silicification in sorghum (*Sorghum bicolor*) cultivars with different drought tolerance. **Physiologic Plantarum**. v.115. p.87-92, 2002.

MA, J.F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plants. In: Datnoff, L.E.; Snyder, G.H.; Korndörfer, G.H. **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. p.17-39.

MA, J. F.; TAKAHASHI, E. **Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan**. Amsterdam: Elsevier, 2002. 274 p.

MA, J.F. et al. Characterization of the silicon uptake system and molecular mapping of the silicon transporter gene in rice. **Plant Physiology**, Rockville, v. 136, p. 3284-3289, 2004.

MA, J.F. et al. A silicon transporter in rice. **Nature**, London, v. 440, p. 688-691, 2006.

MA, J.F. et al. An efflux transporter of silicon in rice. **Nature**, London, v. 448, p. 209-212, 2007.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Ceres, 2006. 443 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition in higher plants**. London: Academic Press, 1995. 889p.

MCKEAGUE, J.A.; CLINE, M.G. Sílica in soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 15, n. 21, p. 339-397, 1963.

MELO, S. P. et al. Silicon accumulation and water deficit tolerance in *Brachiaria* grasses. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 4, p. 755-759, 2003.

MITANI, N; MA, J.F. Uptake system of silicon in different plant species. **Journal of Experimental Botany**. v.56. p.1255-1261, 2005.

PEREIRA, H.S.; KORNDÖRFER, G.H. Fontes de Si para as plantas (compact disc). In: **SIMPÓSIO SOBRE SILÍCIO NA AGRICULTURA**, 2., Lavras, 2003. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2003.

PEREIRA, H. S. et al. Silicon sources for rice crop. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n. 5, p. 522-528, 2004.

QUAGGIO, J. A. Reação do solo e seu controle . In Simposio Avançado de Química e Fertilidade do solo. Fundação Cargill, Piracicaba. 1986.

RAFI, M.M.; EPSTEIN, E. Silicon absorption by wheat (*Triticum aestivum* L.) **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 211, p. 223-230, 1999.

RAMOS, L. A.; KORNDÖRFER, G. H.; NOLLA, A. Acúmulo de silício em plantas de arroz do ecossistema de várzea submetido à aplicação de diferentes fontes. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 3, p. 751-757, 2008.

RAVEN, J.A. Silicon transport at the cell and tissue level. In: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.; KORNDÖRFER, G.H. (Editores.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. p. 41–55. (Studies in Plant Science, 8).

REDDI, L.N.; INYANG, H.I. **Geoenvironmental Engineering: Principles and applications**. New York. Marcel Dekker, Inc. 2000.

RODRIGUES, F.A. et al. Silicon enhances the accumulation of diterpenoid phytoalexins in rice: a potential mechanism for blast resistance. **Phytopathology**, St. Paul, v. 94, n. 2, p. 177-183, 2004.

SAVANT, N. K.; SNYDER, G. H.; DATNOFF, L. E. Silicon management and sustainable rice production. **Advances in Agronomy**, New York, v. 58, n. 1, p. 151-199, 1997.

SRIPANYAKORN, S.; JUGDAOHSINGH, R.; THOMPSON, R.P.H.; POWELL, J.J. Dietary silicon and bone health. **Nutrition Bulletin**. v.30, p.222-230, 2005.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TAKAHASHI, E.; MA, J.F.; MIYAKE, Y. The possibility of silicon as an essential element for higher plants. **Comments on Agricultural and Food Chemistry**, London, v. 2, p. 99- 122, 1990.

TISDALE, S.L.; NELSON, W.J.; BEATON, J.D. **Soil fertility and fertilizers**. New York: Macmillan Publishing Company, 1993. p. 202-331.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. Departamento de Solos. Laboratório de análises químicas de fertilidade do solo. **Manual do laboratorista**. Viçosa, 2005. 33p.

WERNER, J.C. **Adubação de pastagens**. Nova Odessa: Instituto de Zootecnia, 1986. 49p. (Instituto de Zootecnia. Boletim Técnico, 18).

WIESE, H.; NIKOLIC, M.; RÖMHELD V. Silicon in plant nutrition - Effects on zinc, manganese and boron leaf concentrations and compartmentation. In: SATTELMACHER, B.; HORST, W.J. (Editores.). **The apoplast of higher plants**: compartment of storage, transport and reactions. London: Springer, 2007. p. 33-47.

ZONTA, E. **Estudos da tolerância ao alumínio em arroz de sequeiro e seus efeitos sobre a interface solo-planta** . Soropédica: UFRRJ, 164 p. Tese de Doutorado. 2003.