

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**CINÉTICA DE ABSORÇÃO DE SILÍCIO POR CULTIVARES DE
CANA-DE-AÇÚCAR E DE ARROZ**

PRISCILA OLIVEIRA MARTINS

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Mestre em Agronomia
– Agricultura.

BOTUCATU

Outubro-2010

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**CINÉTICA DE ABSORÇÃO DE SILÍCIO POR CULTIVARES DE
CANA-DE-AÇÚCAR E DE ARROZ**

PRISCILA OLIVEIRA MARTINS

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Costa Crusciol

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Mestre em Agronomia
– Agricultura.

BOTUCATU

Outubro-2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

M386c Martins, Priscila Oliveira, 1983-
Cinética de absorção de silício por cultivares de cana-de-açúcar e de arroz / Priscila Oliveira Martins. - Botucatu : [s.n.], 2010

x, 67 f. : tabs., gráfs., fots. color.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2010
Orientador: Carlos Alexandre Costa Crusciol
Inclui bibliografia.

1. *Saccharum* spp. 2. *Oryza sativa* L. 3. Cana-de-açúcar. 4. Arroz. 5. Cinética de absorção de nutrientes. I. Crusciol, Carlos Alexandre Costa. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

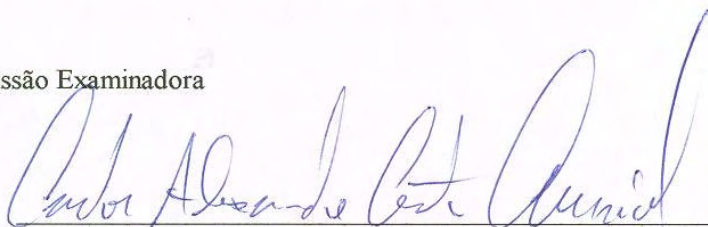
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: CINÉTICA DE ABSORÇÃO DE SILÍCIO POR CULTIVARES DE
CANA-DE-AÇÚCAR E DE ARROZ**

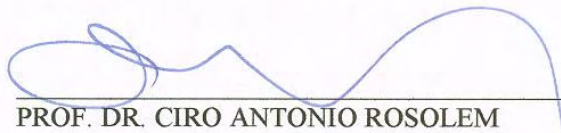
ALUNA: PRISCILA OLIVEIRA MARTINS

ORIENTADOR: PROF. DR. CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL


Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL



PROF. DR. CIRO ANTONIO ROSOLEM



PROF^a DR^a RAFFAELLA ROSSETTO

Data da Realização: 13 de outubro de 2010.

DEDICO

Aos meus pais, Valdir e Heliana, que sempre me incentivaram e não mediram esforços para mais essa realização em minha vida.

E aos meus queridos irmãos Tatiana e Fabrício, que presentes em minha vida me proporcionam muitas alegrias.

AGRADECIMENTOS

- *A Deus, pelo amor incondicional, pelos momentos de felicidade e pelo amparo em todos os momentos difíceis em minha vida;*
- *A toda minha família, por todo amor e carinho, em especial aos meus pais pelos ensinamentos e exemplo de vida;*
- *Ao Prof. Dr. Carlos Alexandre Costa Crusciol, pela orientação, apoio, incentivo e principalmente pela amizade em todos esses anos;*
- *Ao Dr. Pedro Roberto Furlani, pelos ensinamentos em relação a solução nutritiva;*
- *A Dra. Raffaella Rossetto da Agencia Paulista de Tecnologia dos Agronegócios pelos ensinamentos sobre cultivo da cana-de-açúcar em solução nutritiva;*
- *Ao Prof. Dr. Ciro Antônio Rosolem pela colaboração e sugestões;*
- *Ao Prof. Dr. Gaspar H. Korndörfer da Universidade Federal de Uberlândia pelas dicas e sugestões;*
- *À Faculdade de Ciências Agrônômicas – FCA, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”;*
- *Aos Docentes dos Departamentos de Produção Vegetal e Botânica por todos os ensinamentos.*
- *À FUNDAÇÃO DE AMPARO A PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO (FAPESP) pela concessão da bolsa de estudos;*
- *A usina COSAN por ceder os toletes de cana-de-açúcar para realização do experimento;*
- *Aos funcionários do Departamento de Produção Vegetal - Agricultura, Lana, Vera, Valéria, Dorival, Alessandra, Cirinho, Célio, Valdomiro (Fio), Matheus, Paulo (Defesa Fitossanitária) e demais funcionários pela colaboração em vários momentos dessa pesquisa;*
- *Aos funcionários da biblioteca, “Paulo de Carvalho Mattos”, pelos serviços prestados;*
- *A todos os amigos que me ajudaram na execução do experimento, Cristiane, Mayara, Maria de Jesus, Ana Cristina, Deise, Ana Carolina, Camila, Angélica, Jaime, Mauricio, Claudio, Laerte, Samuel, Adriana, Aline, Genivaldo, Eunice, Gabriel, Izaias, Gustavo, Mariângela, Letícia e aos demais amigos que por ventura eu tenha esquecido de citar;*
- *Aos amigos e colegas de curso de Pós-Graduação;*
- *A todos que direta e indiretamente contribuíram para a concretização deste trabalho.*

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS.....	VII
LISTA DE FIGURAS.....	X
1. RESUMO.....	1
2. SUMMARY.....	3
3. INTRODUÇÃO.....	5
4. REVISÃO DE LITERATURA.....	8
4.1. Silício no Solo.....	8
4.2. Silício na Planta.....	10
4.3. Parâmetros Morfológicos e Cinéticos da Absorção de Nutrientes.....	14
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	17
5.1. Localização e características do ambiente experimental.....	17
5.2. Delineamento experimental.....	17
5.3. Caracterização dos cultivares.....	18
5.3.1. Cultivares de arroz.....	18
5.3.2. Cultivares de cana-de-açúcar.....	18
5.4. Instalação e condução dos experimentos.....	19
5.4.1. Solução nutritiva.....	19
5.4.2. Obtenção das plântulas.....	20
5.4.3. Transferência das plântulas.....	21
5.4.4. Experimentos de exaustão.....	22
5.5. Obtenção dos dados.....	23
5.5.1. Parâmetros morfológicos radiculares.....	23
5.5.2. Massa de matéria seca da parte aérea, raiz e matéria seca total (g planta ⁻¹).....	23
5.5.3. Teor de Si na planta e nas amostras de solução.....	23
5.5.4. Quantidade acumulada de silício.....	24
5.5.5. Eficiência de absorção, eficiência de utilização do silício e relação	24

raiz/parte aérea.....	
5.5.6. Parâmetros cinéticos de absorção (V_{max} , K_m e C_{min}).....	24
5.6. Análises estatísticas.....	25
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
6.1. Experimento com a cultura do arroz.....	26
6.1.1. Massa de matéria seca.....	26
6.1.2. Parâmetros morfológicos de raiz.....	27
6.1.3. Parâmetros cinéticos de absorção.....	29
6.1.4. Teor de silício na parte aérea e na raiz.....	34
6.1.5. Quantidade acumulada de silício no arroz.....	36
6.1.6. Eficiência de absorção, eficiência de utilização de silício e relação	
raiz/parte aérea.....	37
6.2. Experimento com a cultura da cana-de-açúcar.....	38
6.2.1. Massa de matéria seca.....	38
6.2.2. Parâmetros morfológicos de raiz.....	40
6.2.3. Parâmetros cinéticos de absorção.....	41
6.2.4. Teor de silício na planta.....	46
6.2.5. Quantidade acumulada de silício na cana-de-açúcar.....	48
6.2.6. Eficiência de absorção, eficiência de utilização de silício e relação	
raiz/parte aérea.....	50
7. CONCLUSÕES.....	52
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
1	Composição da Solução nutritiva (Furlani e Furlani, 1988) modificada.....	19
2	Massa de matéria seca da parte aérea (MSPA), raiz (MSRA) e total (MST) de cultivares de arroz submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 40 dias após a transferência para a solução de crescimento.....	27
3	Comprimento, superfície e diâmetro radicular de cultivares de arroz submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 40 dias após a transferência para a solução de crescimento.....	28
4	Equações ajustadas para as curvas de absorção de silício (Si absorvido versus tempo) no cálculo dos parâmetros cinéticos da absorção por cultivares de arroz submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 40 dias após a transferência para a solução de crescimento.....	30
5	Parâmetros cinéticos K_m , V_{max} (velocidade máxima) e C_{min} , da absorção de Si por cultivares de arroz submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 40 dias após a transferência para a solução de crescimento.....	31
6	Teor de Si na parte aérea (PA) e na raiz (RA) de cultivares de arroz submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 40 dias após a transferência para a solução de crescimento.....	34
7	Quantidade acumulada de silício na parte aérea (PA), na raiz (RA) e na planta inteira (PI) de cultivares de arroz submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 40 dias após a transferência para a solução de crescimento.....	36

8	Eficiência de absorção de Si (EA – Si acumulado na parte aérea/comprimento radicular), eficiência de utilização (EU – massa de matéria seca da parte aérea/Si acumulado na parte aérea) e relação raiz/parte aérea (RA/PA – massa de matéria seca da raiz/massa de matéria seca da parte aérea) de cultivares de arroz submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 40 dias após a transferência para a solução de crescimento.....	38
9	Massa de matéria seca das folhas (MSF), colmo (MSC), parte aérea (MSPA), raiz (MSRA) e total (MST) de cultivares de cana-de-açúcar submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 45 dias após a transferência para a solução de crescimento.....	39
10	Comprimento, superfície e diâmetro radicular de cultivares de cana-de-açúcar submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 45 dias após a transferência para a solução de crescimento.....	41
11	Equações ajustadas para as curvas de absorção de silício (Si absorvido versus tempo) no cálculo dos parâmetros cinéticos da absorção por cultivares de cana-de-açúcar submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 45 dias após a transferência para a solução de crescimento.....	43
12	Parâmetros cinéticos K_m , V_{max} (velocidade máxima) e C_{min} , da absorção de Si por cultivares de cana-de-açúcar submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 45 dias após a transferência para a solução de crescimento.....	44
13	Teor de Si na folha, no colmo e na raiz de cultivares de cana-de-açúcar	47

- submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 45 dias após a transferência para a solução de crescimento.....
- 14 Quantidade acumulada de silício na folha, colmo, parte aérea (PA), na raiz (RA) e na planta inteira (PI) de cultivares de cana-de-açúcar submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 45 dias após a transferência para a solução de crescimento..... 49
- 15 Eficiência de absorção de Si (EA – Si acumulado na parte aérea/comprimento radicular), eficiência de utilização (EU – massa de matéria seca da parte aérea/Si acumulado na parte aérea) e relação raiz/parte aérea (RA/PA – massa de matéria seca da raiz/massa de matéria seca da parte aérea) de cultivares de cana-de-açúcar submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 45 dias após a transferência para a solução de crescimento..... 51

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Plântulas de arroz (A) em rolos de papel filtro e plântulas de cana-de-açúcar (B) em bandejas com areia grossa.....	20
2	Plântulas de arroz (A) e de cana-de-açúcar (B) recém transplantadas.....	21
3	Curva de esgotamento do Si contido na solução de cultivo quando se aplicou 0,1 mmol L ⁻¹ (A e B) e 1,7 mmol L ⁻¹ (C e D) de Si, aos 25 dias (A e C) e 40 dias (B e D) após o transplante, para cultivares de arroz.....	30
4	Velocidade de absorção de Si e a participação dos mecanismos de absorção de alta (1) e baixa (2) afinidade em raízes de cultivares de arroz aos 25 e 40 dias após o transplante (DAT) em função da concentração de Si na solução nutritiva.....	32
5	Curva de esgotamento do Si contido na solução de cultivo quando se aplicou 0,1 mmol L ⁻¹ (A e B) e 1,7 mmol L ⁻¹ (C e D) de Si, aos 25 dias (A e C) e 45 dias (B e D) após o transplante, para os cultivares de cana-de-açúcar.....	43
6	Velocidade de absorção de Si e a participação dos mecanismos de absorção de alta (1) e baixa (2) afinidade em raízes de cultivares de cana-de-açúcar aos 25 e 45 dias após o transplante (DAT) em função da concentração de Si na solução nutritiva.....	45

1. RESUMO

O silício é considerado, para o arroz e a cana-de-açúcar, um elemento de relevada importância, pois, em muitas situações, tem proporcionado maiores tolerâncias a estresses bióticos e abióticos. No entanto, em muitas situações não tem sido constatado efeito positivo do silício, o que pode estar relacionado a fatores genéticos quanto à capacidade em adquirir silício em baixa disponibilidade e/ou utilizar o elemento absorvido com maior eficiência. Os mecanismos de absorção presentes na interface solo-raiz são influenciados por eficiência fisiológica e pela morfologia radicular das plantas, representada pelo comprimento, superfície e diâmetro das raízes. Assim, o presente trabalho teve por objetivo, mediante o acompanhamento da cinética de absorção de Si (V_{max} , K_m e C_{min}), encontrar respostas entre cultivares de cana-de-açúcar e de arroz quanto à capacidade de absorção e utilização do silício, quando submetidas a condições distintas de disponibilidade e carência do elemento, procurando relacioná-las a parâmetros fisiológicos de absorção, parâmetros morfológicos de raízes e eficiência de utilização deste mineral. Foram realizados dois experimentos independentes, um para a cana-de-açúcar e outro para o arroz, em casa de vegetação, na Faculdade de Ciências Agrônomicas/UNESP, em Botucatu-SP. O delineamento experimental de cada experimento foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial composto por dois

cultivares distintos quanto ao acúmulo de silício para o arroz (1- alto acúmulo: Caiapó e 2- baixo acúmulo: Maravilha) e para cana-de-açúcar (1- alto acúmulo: RB85-5035 e 2- baixo acúmulo: SP81-3250) e dois níveis de silício (alto: $1,7\text{mmol L}^{-1}$ e baixo: $0,1\text{mmol L}^{-1}$), com seis repetições. Foram avaliados os parâmetros cinéticos (V_{max} , K_m e C_{min}), parâmetros morfológicos da raiz (comprimento, diâmetro e superfície), massa de matéria seca, teor e quantidade de Si acumulados na parte aérea e na raiz, eficiência de absorção, eficiência de utilização e relação raiz/parte aérea da cana-de-açúcar e do arroz. Os dados foram submetidos à análise de variância e aplicação do teste LSD a 5% de significância para as médias obtidas. A maior concentração de Si na solução nutritiva não promoveu aumento da massa de matéria seca do arroz e da cana-de-açúcar, sendo que, plantas mais velhas possuem taxa de absorção máxima (V_{max}) e K_m menores que plantas mais jovens. O cultivar de arroz Caiapó teve maior desenvolvimento do sistema de absorção de Si de baixa afinidade em relação ao Maravilha e o cultivar de cana-de-açúcar RB85-5035 teve maior desenvolvimento do sistema de absorção de Si de baixa afinidade em relação ao SP81-3250. A avaliação das diferenças entre cultivares de arroz e cana-de-açúcar quanto a eficiência de absorção e utilização de Si em solução nutritiva, pode ter sido limitada pela dose máxima utilizada, uma vez que valores acima de $2,0\text{mmol L}^{-1}$ de Si acarretam precipitação.

Palavras-chave: *Saccharum* spp, *Oryza sativa* L., parâmetros morfológicos, V_{max} , K_m , C_{min} , Si.

KINETICS OF SILICON UPTAKE BY SUGAR CANE AND RICE CULTIVARS FROM NUTRIENT SOLUTION

Botucatu, 2010. 78 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: PRISCILA OLIVEIRA MARTINS

Adviser: CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL

2. SUMMARY

Silicon is considered of great importance for sugar cane and rice because it can improve tolerance to biotic and abiotic stress. However, silicon has not shown positive effects in many situations probably due to genetic factors related to capacity of plants to absorb this element in lower availability or/and efficiently use it. Uptake mechanisms found in root-soil interface are influenced by physiological efficiency and aspects of root morphology such as length, surface and diameter. Therefore, this research had the objective of monitoring Si uptake kinetics (V_{max} , K_m and C_{min}) and identifying responses among sugar cane varieties and rice cultivars related to plant capacity of Si uptake and use under distinct

conditions of availability and deficiency, associating them to physiological aspects of absorption, root morphology parameters and use efficiency. Two greenhouse experiments were separately carried out for sugar cane and rice in the College of Agricultural Sciences, UNESP, Botucatu-SP, Brazil. The experimental design for each crop was the completely randomized with six replications, analyzed as a factorial that consisted of two rice cultivars (1- high accumulation: 'Caiapó' and 2- low accumulation: 'Maravilha') and sugar cane varieties (1- high accumulation: RB85-5035 and 2- low accumulation: SP81-3250) with distinct silicon accumulation capacity and two silicon levels (sufficient: 1.7 mmol L^{-1} and insufficient: 0.1 mmol L^{-1}). Kinetic parameters (V_{\max} , K_m and C_{\min}), root morphology aspects (length, diameter and surface), dry matter, silicon accumulation and level in shoot and root, uptake efficiency, use efficiency and root/shoot ratio were evaluated for sugar cane and rice. Data was submitted to variance analysis and means were compared by the LSD test at a probability level of 5%. The higher silicon concentration in the nutrient solution did not increase neither sugar cane nor rice dry matter. Older plants showed maximum uptake rate (V_{\max}) and lower K_m compared to younger ones. Rice cultivar 'Caiapó' and sugar cane RB85-5035 showed better development of the low-affinity system for silicon uptake compared to 'Maravilha' and SP81-3250, respectively. The evaluation of differences between cultivars of rice and sugar cane as the uptake efficiency and use efficiency of Si in nutrient solution, may have been limited by the maximum dose used, since values above $2,0 \text{ mmol L}^{-1}$ Si cause precipitation.

Key words: *Saccharum* spp, *Oryza sativa* L., morphological parameters, V_{\max} , K_m , C_{\min} , Si.

3. INTRODUÇÃO

O silício tem proporcionado benefícios para diversas culturas sendo o elemento mineral mais extraído do solo pelas culturas do arroz e da cana-de-açúcar, em especial sob condições de estresse biótico ou abiótico, embora não tenha sido comprovada sua essencialidade às plantas.

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) é uma poaceae amplamente cultivada nas regiões tropicais, onde o Brasil é o maior produtor mundial e com maior potencial de expansão em área plantada (GONÇALVES e VEIGA FILHO, 1998; CUNHA et al, 2001). Na safra 2010, o Brasil terá uma área cultivada estimada em 8.091,5 mil hectares e produção prevista de 664.333,4 mil toneladas de cana moída (Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB, 2010a).

A cultura da cana-de-açúcar no Brasil tem relevada importância por produzir em grande escala açúcar e álcool, com forte participação tanto no mercado interno como nas exportações (MORAES, 2000), e também por participar da matriz energética gerando energia através do bagaço.

O arroz (*Oryza sativa* L.) é um dos principais cereais cultivados no mundo, tem grande importância social e econômica, destacando-se como alimento básico e

fonte de carboidratos para grande parte do povo asiático e dos brasileiros. Dados preliminares mostram que a produção de arroz na safra 09/10 será de 11.236,6 mil toneladas e a área cultivada será de aproximadamente 2.758,9 mil hectares (CONAB, 2010b).

Plantas em geral (EPSTEIN, 1999), e mesmo grupos restritos como gramíneas cultivadas (TAMAI e MA, 2003), absorvem silício em quantidades bastante variáveis. Os valores usuais para o elemento em matéria vegetal seca variam de aproximadamente 0,1% a 10%, embora tanto valores menores quanto maiores possam ser encontrados. Os valores baixos correspondem aos menores níveis de elementos macronutrientes como enxofre, cálcio e magnésio; os altos valores de silício, como os encontrados em arroz e cana-de-açúcar, excedem aquele de qualquer outro nutriente mineral, incluindo o nitrogênio. Em suma, silício está presente em plantas em níveis similares aos elementos macronutrientes (EPSTEIN e BLOOM, 2006).

Para o arroz e a cana-de-açúcar o silício é considerado um elemento de elevada importância, pois, em muitas situações, tem proporcionado maiores tolerâncias a estresses bióticos e abióticos, tais como: redução na incidência de algumas pragas e doenças, aumento na tolerância aos elementos tóxicos do solo, melhoria na arquitetura e redução do acamamento das plantas, com reflexo direto na produtividade e na estabilidade produtiva.

No entanto, em muitas situações não tem sido constatado efeito positivo do silício, mesmo quando aplicado em solos carentes do elemento, as culturas submetidas a algum tipo de estresse e apresentando teores foliares muito próximos das plantas adubadas com o elemento e sem estresse.

A divergência nos resultados obtidos pode estar relacionada a fatores genéticos, ou seja, diferença entre cultivares quanto à capacidade em adquirir silício em baixa disponibilidade e/ou utilizar o elemento absorvido com maior eficiência.

Agrupando esses fatores, existe a dinâmica da biodisponibilidade, ou seja, a planta interfere naturalmente, através de características genéticas próprias, na disponibilidade dos nutrientes no solo. Desta forma, os mecanismos de absorção presentes na interface solo-raiz são influenciados pela eficiência fisiológica e pela morfologia radicular das plantas, representada pelo comprimento, superfície e diâmetro médio das raízes (BARBER, 1984).

Assim, o entendimento da nutrição de silício é fundamental para o manejo desse elemento, pois poderá refletir em economia e sustentabilidade dos sistemas produtivos dessas culturas.

Em função do exposto o presente trabalho partiu das seguintes hipóteses:

- a) existem diferenças entre cultivares quanto a capacidade de absorção de silício,
- b) existem diferenças entre cultivares quanto a capacidade de utilização de silício.

Portanto, através do acompanhamento da cinética de absorção de Si (V_{max} , K_m e C_{min}), o presente trabalho teve por objetivo encontrar as causas das diferentes respostas entre cultivares de cana-de-açúcar e cultivares de arroz quanto à capacidade de absorção e utilização do silício, quando submetidas a condições distintas de disponibilidade e carência do elemento, procurando relacioná-las a parâmetros fisiológicos de absorção, parâmetros morfológicos de raízes e eficiência de utilização deste mineral.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1. Silício no Solo

A crosta terrestre contém silício em quantidades inferiores apenas às de oxigênio. A maioria dos solos são predominantemente silicatos e aluminosilicatos (EPSTEIN e BLOOM, 2006). Na solução do solo, o silício está presente como ácido silícico (Si(OH)_4) em concentrações variando de 0,1 a 0,6 mM, a qual é da ordem de 100 a 1000 vezes maior que a do fosfato (EPSTEIN, 1994).

O óxido de silício (SiO_2) é o mineral mais abundante nos solos, constituindo a base da estrutura da maioria dos argilominerais, entretanto, em razão do avançado grau de intemperização em que se encontram os solos tropicais, o Si é encontrado basicamente na forma de quartzo, opala ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) e outras formas não-disponíveis às plantas (BARBOSA FILHO et al., 2001).

A disponibilidade de nutrientes na rizosfera depende, dentre outros fatores, da concentração do nutriente na solução do solo e do transporte deste para a superfície radicular (CHEN e GABELMAN, 2000). A concentração de Si(OH)_4 na solução do solo é de importância primária para o suprimento de Si para a raiz (MARSHNER, 1995).

A sílica (Si) aplicada como adubo ao solo vem sendo apontada como uma alternativa no manejo de doenças patogênicas e ataque de pragas com reflexos sobre a produtividade do arroz e da cana-de-açúcar (KORNDÖRFER, 1995). Segundo Bair (1966), os solos carentes em silício resultam na disseminação rápida do mosaico, atrasa a maturação e baixa a quantidade de sólidos solúveis no caldo da cana.

Savant et al. (1997) atribuíram a queda da produtividade do arroz em várias regiões do mundo a uma possível diminuição do teor de silício no solo. Savant et al. (1997) relacionaram três fatores que podem estar envolvidos nesse fenômeno: a) muitos solos de áreas produtoras de arroz de regiões tropicais e sub-tropicais apresentam graus variados de dessilificação; b) a cinética de dissolução do silício no solo é muito baixa; c) o silício da solução do solo é adsorvido por sesquióxidos que estão presentes em muitos solos tropicais.

A utilização intensiva dos solos, principalmente com culturas acumuladoras de silício, pode torná-los paulatinamente deficientes no elemento, pois a exportação do silício não é compensada via de regra com fertilizações silicatadas (LIMA FILHO et al., 1999).

Raj e Camargo (1973) encontraram valores variando de 1 a 43 mg dm⁻³ de Si em solos do Estado de São Paulo utilizando cloreto de cálcio como extrator, sendo os maiores valores presentes nos Podzólicos argilosos e os menores nos Latossolos fase arenosa. Hossain et al. (2001) observaram resposta mais significativa da cultura do arroz a adubação silicatada em solos arenosos em comparação aos solos argilosos.

Korndörfer et al. (1999) estudaram em casa de vegetação o efeito de diferentes doses de silicato de cálcio em diferentes tipos de solo sobre o arroz de terras altas (IAC 165), concluíram que o nível de suficiência de silício no solo para atingir 90% da produção máxima nessa condição foi de 9,8 mg dm⁻³, utilizando o ácido acético como extrator. Segundo os autores, a utilização de silicato pode melhorar os atributos químicos do solo, tais como: pH, saturação por base e os teores de Ca trocável.

Para Snyder (1991), solos com teores de silício menores que 10 mg dm⁻³ devem receber adubação silicatada, enquanto os solos com teores iguais ou maiores que 15 mg dm⁻³ não necessitariam de adubação silicatada. Korndörfer et al. (1999) conduziram 28 experimentos de campo no período de 1992 a 1996 com a cultura do arroz, e sugeriram os

níveis de silício no solo como baixo, menor que 6 mg dm^{-3} , médio entre 6 a 24 mg dm^{-3} , e alto acima de 24 mg dm^{-3} .

4.2. Silício na Planta

As plantas absorvem o Si da solução do solo na forma de ácido monossilícico Si(OH)_4 (TISDALE et al., 1993).

O coeficiente de permeabilidade de ácido silícico para a membrana plasmática é estimado em $10^{-10} \text{ m s}^{-1}$ (RAVEN, 2001). Esta baixa permeabilidade não poderia explicar o alto teor de Si encontrado na parte aérea do arroz, sugerindo que o ácido silícico é transportado através da membrana plasmática não por difusão passiva, mas pela captação ativa nas raízes (TAMAI e MA, 2003).

A absorção de Si não é afetada pela transpiração (OKUDA e TAKAHASHI, 1962). E segundo Tamai e Ma (2003) experimentos indicam que o sistema de absorção de ácido silícico é diferente daquele existente para a água nas raízes de arroz.

Assim, a absorção de Si no arroz ocorre de forma ativa por proteínas de membrana específicas para este fim, ou seja, o processo de absorção de Si pode ocorrer inclusive contra um gradiente de concentração (MA e TAKAHASHI, 2002). E, segundo Tamai e Ma (2003), o transportador de Si tem baixa afinidade para ácido silícico.

O transporte do silício é feito pelo xilema e sua distribuição depende das taxas de transpiração dos diferentes órgãos da planta. O elemento é imóvel na planta e é depositado nas lâminas foliares, bainhas foliares, colmos, cascas e raízes (YOSHIDA et al., 1962), sendo que na lâmina foliar o acúmulo é maior que na bainha foliar (TANAKA e PARK 1966). Entretanto, para Winslow (1992) a casca do arroz é o órgão que mais acumula silício na planta, seguido pela folha bandeira e panícula.

Yoshida et al. (1962) e Agarie et al. (1998) observaram que a maior parte do silício absorvido pela planta é depositada na folha, nos tecidos da epiderme logo abaixo da cutícula, mais precisamente nas paredes celulares mais externas. Segundo Agarie et al. (1998), o silício estaria envolvido na biossíntese dos componentes da parede celular, devido às folhas das plantas de arroz tratadas com silício apresentarem níveis mais altos de polissacarídeos do que as folhas das plantas que não foram tratadas com silício.

Para Yoshida et al. (1962) o silício acumulado nas lâminas foliares provavelmente forma uma dupla camada de sílica-celulose, conferindo resistência à doenças fúngicas impedindo a penetração de hifas. E o mecanismo de resistência mais aceito é de natureza mecânica (BARBOSA FILHO et al., 2001). O ataque de pragas na cana-de-açúcar, principalmente a broca do colmo, cigarrinha, e doenças tais como a ferrugem e outras poderiam ser diminuídas nas cultivares acumuladoras de Si (KORNDÖRFER et al., 2002).

Outra hipótese relacionada com o controle de doenças seria a formação de fenóis favorecida pela absorção de Si. Compostos fenólicos e Si acumulam-se nos sítios de infecção, cuja causa ainda não está esclarecida. O Si pode formar complexos com os compostos fenólicos e elevar a síntese e mobilidade destes no apoplasto. Uma rápida deposição de compostos fenólicos ou lignina nos sítios de infecção é um mecanismo de defesa contra o ataque de patógenos, e a presença de Si solúvel facilita esse mecanismo de resistência (MENZIES et al., 1991).

Balastra et al. (1989) observaram que as plantas de arroz crescidas em solução nutritiva contendo silício apresentavam picos de silício maior na epiderme das lâminas foliares e nas células buliformes da parte superior da folha. Ainda segundo os autores, os picos de silício foram distintos em todos os pontos analisados na folha, embora o silício tenha sido maior em algumas células, entretanto nas plantas cultivadas em meio sem silício esses foram bem menores.

O uso de silício tem promovido melhora na arquitetura da planta e aumento na fotossíntese (DEREN et al., 1994), resultado de uma menor abertura do ângulo foliar, deixando as folhas mais eretas, diminuindo o auto-sombreamento, sobretudo em condições de alta densidade populacional e altas doses de nitrogênio (YOSHIDA et al., 1969; BALASTRA et al., 1989). Também aumenta a altura das plantas, conseqüência de maior comprimento da lâmina foliar (YOSHIDA et al., 1969; TAKAHASHI, 1995; FARIA, 2000), porém com pouca influência no acúmulo de matéria seca (TANAKA e PARK, 1966; LIANG et al., 1994; CARVALHO, 2000).

O silício proporciona maior resistência às paredes das células tornando-as menos vulneráveis às enzimas de degradação. Várias doenças foram avaliadas quantitativamente por um período de 3 anos, concluindo-se que o silício pode exercer um controle efetivo de algumas doenças com redução do impacto ambiental e aumento da

produtividade (KORNDÖRFER, 1995).

A cana-de-açúcar é beneficiada pela adubação com Si, particularmente nos solos pobres nesse elemento. Elawad et al. (1982), em estudo de campo, observaram que a altura das plantas de cana-de-açúcar é quadraticamente relacionada com a dose de Si aplicada, enquanto que o diâmetro do talo é linearmente relacionada. Plucknett (1971) demonstrou que o Si pode aumentar o tamanho e o diâmetro dos colmos da cana-de-açúcar. Kidder e Gascho (1977) relataram aumentos de produtividade que variam entre 10 e 35%.

O silício está presente na cana-de-açúcar em altas concentrações, podendo variar desde 0,14% em folhas jovens até 6,7% nos colmos e folhas velhas. Segundo Korndörfer et al. (1998) os teores de Si nas folhas de cana-de-açúcar podem variar também segundo a variedade, tais como os teores encontrados para as variedades RB72454, SP79-1011 e SP71-6163, que foram, respectivamente, de 0,76%, 1,04% e 1,14%. Os teores de silício na cana-de-açúcar (palha) são classificados como, baixo menor que 17g kg^{-1} , médio entre 17 a 34g kg^{-1} e alto acima de 34g kg^{-1} (KORNDÖRFER et al. 1999).

No Havaí, as folhas contendo menos de 0,5% de silício são freqüentemente afetadas por um sintoma denominado "freckling". A causa deste sintoma é ainda bastante controversa, porém a maioria dos pesquisadores atribui a falta de Si a desequilíbrios nutricionais. O aparecimento da ferrugem na cana-de-açúcar (*Puccinia melanocephala*) pode estar relacionado com o referido sintoma. O sintoma é mais severo nas folhas mais velhas e a área fotossintética é normalmente fortemente atingida (KORNDÖRFER, 1995). De acordo com Fox e Silva (1978), com a aplicação de 6 t ha^{-1} de silicato ao solo o sintoma desaparece.

Ross et al. (1974) cita uma remoção de até 408 kg ha^{-1} de Si para uma produtividade de 74 t ha^{-1} de cana-de-açúcar (folhas + colmos). Em condições brasileiras, Arruda (2009) constatou que o Si acumulado foi em torno de 750 kg ha^{-1} para uma produtividade de 110 t ha^{-1} .

O silício pode aumentar o número e o tamanho dos aerênquimas nas plantas de arroz, estruturas responsáveis pela condução do oxigênio da parte aérea para as raízes, aumentando o poder oxidativo, diminuindo a toxidez de ferro e manganês na planta (HORIGUCHI, 1988; BARBOSA FILHO, 1987; VERMAS e MINHAS 1989). Snyder et al. (1986) sugerem que as plantas de arroz deveriam conter pelo menos 3% de silício na parte

aérea para garantir um ótimo desenvolvimento.

Segundo Deren et al. (1994), as plantas diferem bastante quanto à capacidade de absorver silício, assim, genótipos de arroz diferem no teor de silício, respondendo de modo diferente à aplicação do elemento. Segundo Winslow (1992), genótipos de arroz do grupo Japônica possuem concentração de silício de 50 a 100% mais alta que genótipos do grupo Índica, e cultivares tradicionais possuem maior eficiência na absorção desse elemento. Barbosa Filho et al. (1998) encontraram diferenças significativas na porcentagem de silício na palha do arroz das cultivares Caiapó e Carajás e na linhagem CNA 7706.

Korndörfer et al. (2001), trabalhando com a cultura do arroz irrigado durante o período de 1992 a 1996, constataram que de um total de 28 experimentos de campo, houve efeito para o silício em 19 deles, em relação a produtividade de grãos, com aumento médio de 1007 kg ha⁻¹. Savant et al. (1997) levantaram a hipótese de que a diminuição dos teores disponíveis de Si nos solos cultivados com arroz seja uma das principais razões para o aparecimento do “declínio”, isto é, uma sistemática redução da produtividade do arroz ao longo do tempo.

Estudos realizados no sul da Flórida demonstraram que a adubação com silício reduziu a incidência de brusone de 17 a 31% e mancha parda de 15 a 32% em relação ao tratamento que não recebeu silício (DATNOFF et al., 1991). E no Brasil, Santos et al. (2003) obtiveram bons resultados utilizando o silício no controle das principais doenças do arroz irrigado. A brusone foi reduzida em aproximadamente 19% por efeito do silício. E, em média, a produção foi 33% superior nas parcelas adubadas com silício.

Hossain et al. (2001) utilizando diferentes fontes de material silicatado na cultura do arroz, observaram aumento no número de panículas, no número de espiguetas, na fertilidade das espiguetas, massa de 1000 grãos e na produtividade.

Contudo muitos experimentos são contraditórios, e a não identificação de uma única molécula orgânica que contenha ou exija silício ou ligações conhecidas na natureza de Si-O-C ou Si-C torna difícil a comprovação de essencialidade desse elemento para as plantas (EXLEY, 1998).

Mauad et al. (2003) estudaram os efeitos da adubação nitrogenada e silicatada na cultivar de arroz IAC 201 não observaram efeito do silício no número e na

fertilidade dos colmos, no número de panículas, no número de espiguetas total e granada, na fertilidade das espiguetas e na altura da planta. No entanto, constataram aumento da massa de 100 grãos e efeito no número de espiguetas chochas, que diminuíram na maior dose de nitrogênio com o incremento da adubação silicatada o que, segundo os autores, pode estar relacionado à melhoria da arquitetura da planta.

Mauad (2001) concluiu que a adubação silicatada não afetou a produtividade de grãos de arroz, corroborando com Carvalho (2000), que trabalhou com a mesma cultivar (IAC 202), em condições de campo, mas, também não obteve alteração na produtividade de grãos, e Alvarez (2004) avaliando a produção de arroz em condições de estresse hídrico com aplicação de silício no sulco de semeadura, não constatou diferenças significativas nos componentes da produção e na produtividade de grãos.

4.3. Parâmetros Morfológicos e Cinéticos da Absorção de Nutrientes

A disponibilidade dos nutrientes aos vegetais é influenciada por fatores de solo como aeração, umidade, M.O. e pH. E a absorção é influenciada por atributos morfológicos de raízes e fisiológicos das plantas. A morfologia do sistema radicular é determinada pelo comprimento, volume, superfície e raio das raízes e dos pêlos radiculares (SCHENK e BARBER, 1979a). A eficiência de absorção dos nutrientes varia na razão direta da superfície e espessura das raízes porque esses atributos influenciam a superfície de absorção (VILELA e ANGHINONI, 1984).

A morfologia radicular pode ser alterada em virtude da disponibilidade de nutrientes, de oxigênio e compactação do solo, para melhor adaptação ao meio de crescimento. O comprimento radicular pode ser diferente entre variedades influenciando a absorção de nutrientes (SACRAMENTO e ROSOLEM, 1997).

As diferenças de comportamento das plantas frente à falta ou excesso de nutrientes sugerem um controle genético da nutrição. A aquisição de elementos minerais do ambiente está em função da morfologia radicular e da eficiência dos mecanismos de absorção (EPSTEIN e JEFFERIES, 1984; MARSCHNER, 1986; DUNCAN e BALIGAR, 1990).

Além dos atributos morfológicos, a eficiência de absorção de nutrientes é influenciada pelos parâmetros cinéticos que compreendem a velocidade máxima

de absorção (V_{\max}), a afinidade dos carregadores pelo íon a ser transportado (constante de Michaelis-Menten, K_m) e a concentração na solução nutritiva junto às raízes onde o influxo pára de ocorrer (C_{\min}). Uma planta ideal deveria ter alto V_{\max} e baixos valores para K_m e C_{\min} . Os valores desses parâmetros cinéticos podem variar de acordo com a idade (EDWARDS e BARBER, 1976; FAGERIA (1976); BARBER (1982); DIONÍSIO et al. (1985); SACRAMENTO e ROSOLEM, 1997), concentração do nutriente nas plantas (GRESPLAN et al., 1998; MARTINEZ et al., 1993; SACRAMENTO e ROSOLEM, 1997), morfologia radicular (WARNCKE e BARBER, 1974; ANGHINONI et al., 1989), presença de elementos tóxicos (VILELA e ANGHINONI, 1984; ALVES et al., 1988; PETRY et al., 1994) e micorrizas (FAQUIN et al., 1990), mudanças climáticas (BASSIRIRAD, 2000) e, principalmente, entre os genótipos e as espécies vegetais (NIELSEN e BARBER, 1978; SCHENK e BARBER, 1979a; ANGHINONI et al., 1989; ALVES, et al., 2002).

Resultados de pesquisas sobre os mecanismos de absorção ativa de íons pelas plantas superiores ajustam-se com a hipótese da existência de carregadores iônicos de natureza enzimática, que têm número finito de sítios de ligação. Desse modo, a eficiência no processo de absorção de um dado nutriente pode ser dada através dos parâmetros cinéticos K_m , V_{\max} e C_{\min} , da equação de Michaelis-Menten (EPSTEIN, 1975; MARSCHNER, 1986; GLASS, 1990).

De acordo com Epstein e Hagen (1952), as raízes podem ter distintos sistemas de transporte para cada soluto. Epstein et al. (1963) encontraram dois mecanismos distintos de absorção em uma faixa ampla de concentração de um determinado elemento. Esses mecanismos de absorção de alta e de baixa afinidade foram denominados mecanismos 1 e 2, respectivamente. Tal dualidade foi mostrada virtualmente para o transporte de cada íon, bem como para moléculas sem carga (EPSTEIN e BLOOM, 2006). Epstein et al. (1963) consideraram que o mecanismo 2 segue a cinética simples de Michaelis-Menten, como o mecanismo 1. Pesquisa posterior mostrou que ele tem uma estrutura fina que é relacionada a vários sítios de ligação de íons dos que fazem o transporte através da membrana (EPSTEIN e RAINS, 1965).

Um transportador de alta afinidade seria aquele capaz de transportar nutrientes quando em baixas concentrações externas. Baixa afinidade, muitas vezes está correlacionada com uma alta capacidade de transporte, que é um parâmetro crucial para

manutenção de um grande influxo em elevadas concentrações externas. Assim, a distinção entre sistemas de alta afinidade/baixa capacidade e baixa afinidade/alta capacidade de transporte, reflete seus papéis fisiológicos com maior precisão do que a baseada apenas na afinidade (WIRÉN et al., 2000).

Ma et al. (2004) identificaram dois transportadores envolvidos na absorção de Si. Um está localizado na membrana plasmática das células corticais das raízes (SIT1 – transportador de silício 1), que transporta silício da solução externa para a célula cortical da raiz. O outro está localizado na membrana plasmática do xilema das células parenquimáticas (SIT2 – transportador de silício 2), que é responsável pela liberação de silício no xilema. Estes transportadores podem ter diferentes afinidades para o ácido silícico.

Face a concentrações externas variáveis, diversas interpretações do comportamento cinético do processo de absorção, têm evidenciado a importância das plantas em manterem absorção constante de nutrientes, através de mudanças no sistema absorptivo (SACRAMENTO, 1999).

Em sua revisão, Clarkson (1985) cita que um estresse induzido pela falta de potássio, em cevada, resultou inicialmente em queda no K_m , e três dias depois, foi verificado um aumento de V_{max} . O mesmo autor relata o possível efeito no K_m e/ou V_{max} , como sendo tentativas iniciais da planta em manter o influxo de nutrientes em soluções bastante diluídas, quando o suprimento nutricional se reduz. Tais mudanças são iniciadas antes que a taxa de crescimento tenha sido afetada.

Mesmo sabendo que as funções do Si na cana-de-açúcar e no arroz ainda não foram completamente esclarecidas, é certo que o elemento desempenha um papel importante na produtividade destas culturas (PREEZ, 1970).

Portanto, o estudo dos parâmetros cinéticos da absorção de Si no arroz e na cana-de-açúcar é de suma importância, pois pode esclarecer as causas dos diferentes comportamentos dos cultivares e variedades sob condições distintas de disponibilidade do elemento, dando subsídios para a seleção de cultivares/variedades mais eficientes na absorção deste elemento e do manejo racional da adubação silicatada.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Localização e características do ambiente experimental

Foram realizados dois experimentos instalados em casa de vegetação com ambiente controlado pertencente ao Departamento de Produção Vegetal da Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP, Campus de Botucatu, localizada na Fazenda Experimental Lageado. O local apresenta como coordenadas geográficas, latitude 22° 51'S, longitude 48° 26'W Grw, e altitude de 740 m.

5.2. Delineamento experimental

O delineamento experimental, de cada experimento, foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial, composto por dois cultivares distintos quanto ao acúmulo de silício para arroz (1- alto acúmulo: Caiapó e 2- baixo acúmulo: Maravilha) e para cana-de-açúcar (1- alto acúmulo: RB85-5035 e 2- baixo acúmulo: SP81-3250) e dois níveis de silício (alto: 1,7mmol L⁻¹ e baixo: 0,1mmol L⁻¹), com seis repetições. Para realizar avaliações em duas épocas, utilizou-se o dobro de unidades experimentais, pois as coletas ocorreram aos 25 e

40 dias após o transplante, para a cultura do arroz, e aos 25 e 45 dias para a cultura da cana-de-açúcar, totalizando para cada experimento 24 unidades experimentais. As épocas de coleta não foram estatisticamente comparadas.

5.3. Caracterização dos cultivares

5.3.1. Cultivares de arroz

O cultivar Caiapó lançado no ano de 1992 é proveniente do Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão – EMBRAPA, pertence ao grupo tradicional, apresenta porte médio (110-130 cm), ciclo médio (128 dias), 95-100 dias da emergência ao florescimento, grãos tipo longo, com maior tolerância a déficit hídrico, moderadamente suscetível à brusone (*Pyricularia oryzae* Cav.) e ao acamamento (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, 2001; BRESEGHELLO et al., 1998) e apresentou maior acúmulo de Si que o cultivar Maravilha em condições de experimento em vaso (MAUAD, 2006).

O cultivar Maravilha lançado no ano de 1996, é proveniente do Centro Nacional de pesquisa de Arroz e Feijão – EMBRAPA, pertence ao grupo moderno, apresenta porte médio (80–100 cm), ciclo médio (125-132 dias), 95-100 dias da emergência ao florescimento, grãos tipo longo-fino (agulhinha), resistência à brusone (*Pyricularia oryzae* Cav.) (EMBRAPA, 2001; BRESEGHELLO et al., 1998) e apresentou menor acúmulo de silício em relação ao cultivar Caiapó (MAUAD, 2006).

5.3.2. Cultivares de cana-de-açúcar

O cultivar RB85-5035 é uma das poucas adaptadas a solos arenosos de baixa fertilidade, com maturação precoce e resistência a seca (Cooperativa dos Plantadores de Cana da Zona de Guariba - COPLANA, 2008), apresentou maior acúmulo de silício que o cultivar SP81-3250 em condições de experimento em campo (ROSSETTO, 2005).

O cultivar SP81-3250 é um cultivar de maturação média, boa para colheita mecânica, com bom fechamento entre linhas e excelente brotação de soca sob palhada

(EMBRAPA, 2010), apresentou menor acúmulo de silício em relação ao cultivar RB85-5035 (ROSSETTO, 2005).

5.4. Instalação e condução dos experimentos

5.4.1. Solução nutritiva

Para o crescimento e desenvolvimento das plantas sob níveis diferentes de silício, utilizou-se a solução de Furlani e Furlani (1988). As concentrações dos nutrientes encontram-se expressas na Tabela 1.

Tabela 1. Composição da Solução nutritiva FURLANI e FURLANI (1988) modificada.

Nº	Solução estoque		Relação		Solução Nutritiva		
	Componentes	Concentração g L ⁻¹	Arroz	Cana	Nutriente	Arroz	Cana
			Estoque/Solução ml L ⁻¹		Concentração mg L ⁻¹		
1	Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O	270,0	3,3	3,3	N-NO ³⁻	138,0	138,0
	NH ₄ NO ₃	33,8			N-NH ⁴⁺	20,0	20,0
2	KCl	18,6	3,6	3,6	P	6,0	16,0
	K ₂ SO ₄	44,0			K	141,0	141,0
	KNO ₃	24,6			Ca	151,0	151,0
3	MgSO ₄ .7H ₂ O	136,9	1,4	1,4	Mg	17,0	17,0
4	FeSO ₄ .7H ₂ O	24,1	0,75	0,75	S	56,0	56,0
5	MnCl ₂ .4H ₂ O	2,34	0,75	0,75	B	0,27	0,27
	H ₃ BO ₃	2,04			Cu	0,04	0,04
	ZnSO ₄ .7H ₂ O	0,88			Fe	3,6	3,6
	CuSO ₄ .5H ₂ O	0,20			Mn	0,5	0,5
	Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O	0,26			Mo	0,08	0,08
6	KH ₂ PO ₄	8,77	3,0	8,0	Zn	0,15	0,15
					Cl	33,0	33,0
7	Silício	mmol L⁻¹			Silício	mmol L⁻¹	
	Alto	417,3	4,10	4,10	Alto	1,7	1,7
	Baixo		0,24	0,24	Baixo	0,1	0,1

Considerou-se a concentração de Si de 1,7 mmol L⁻¹ como alta para o desenvolvimento das plantas em solução nutritiva, pois com base em estudos preliminares a

partir de uma concentração de $2,0 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si ocorre a precipitação do Si e, portanto não é possível a utilização de uma dose maior. E a concentração de $0,1 \text{ mmol L}^{-1}$ foi considerada como baixa, com base na literatura (TAMAI e MA, 2003). A fonte de silício utilizada foi o ácido silícico, que foi preparado pela passagem do silicato de potássio diluído em água deionizada (nome comercial FertiSil) através de uma resina de troca catiônica.

O pH da solução foi mantido em torno de 5,5 para que não ocorresse a precipitação nem polimerização do silício.

5.4.2. Obtenção das plântulas.

Sementes de arroz tratadas com carboxin + thiram (nome comercial Vitavax) na dose de 400 mL do produto comercial por 100 kg^{-1} de sementes, foram colocadas para germinar, no dia 26/09/2009, em papel filtro distribuídas em uma linha contínua na parte superior do papel com o eixo embrionário das sementes dispostos na vertical e distantes 1 cm entre si. O papel foi enrolado, umedecido e acomodado em germinador à temperatura média de 25°C com 8 horas de luz. Após 72 h, quando foi observado o início da emergência da radícula, os rolos de papel foram colocados verticalmente em recipientes plástico contendo uma camada de aproximadamente 10 cm de solução nutritiva formulada por Furlani & Furlani (1988), com 1/4 da força iônica. Os recipientes foram transferidos para bancadas dentro da casa de vegetação (Figura 1), com temperatura ambiente entre $22^\circ\text{C}/27^\circ\text{C}$ e umidade controlada.

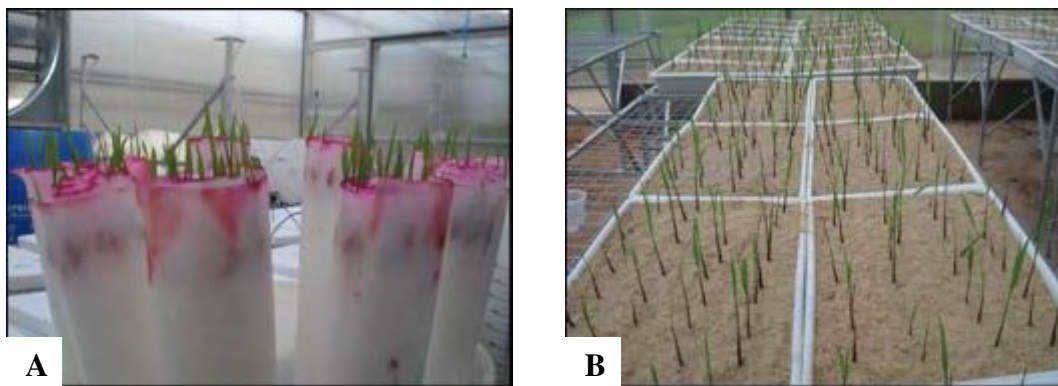


Figura 1. Plântulas de arroz (A) em rolos de papel filtro e plântulas de cana-de-açúcar (B) em bandejas com areia grossa.

Colmos de cana-de-açúcar para confecção das mudas foram colhidos na Usina da Barra do Grupo Cosan na cidade de Barra Bonita – SP no dia 03/12/09. Os colmos foram cortados em mini toletes de aproximadamente 3 cm cada, contendo uma gema vegetativa. Os mini toletes foram colocados para brotar em bandejas plásticas com areia autoclavada (Figura 1). As bandejas foram alocadas em casa de vegetação com ambiente controlado, com temperatura entre 25 °C/ 30 °C. Os toletes foram diariamente irrigados com água deionizada.

5.4.3. Transferência das plântulas

Após a emergência (06/10/2009 para o arroz e 10/12/2009 para cana-de-açúcar), as plântulas foram previamente selecionadas quanto a sanidade e uniformidade e transferidas para vasos plásticos onde foram fixadas com espuma em placas de isopor, em que apenas o sistema radicular ficou em contato com a solução (Figura 2). Cada vaso recebeu 6 plântulas de arroz e 4 plântulas de cana-de-açúcar, respectivamente. Os vasos foram devidamente equipados, para que os 4,0 litros de solução nutritiva fossem aerados constantemente.

A solução nutritiva inicialmente foi diluída em 1/10 da força iônica. Aos 12 dias após o transplante a solução foi trocada por uma de 1/2 força iônica, e a partir da terceira semana após o transplante usou-se a solução completa acrescida de Si.

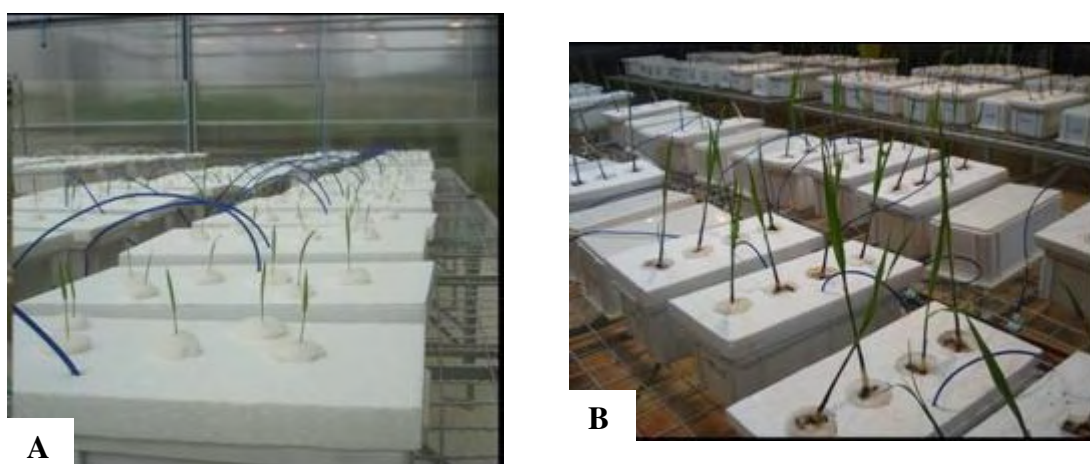


Figura 2. Plântulas de arroz (A) e de cana-de-açúcar (B) recém transplantadas.

Os volumes das soluções foram mantidos com variação máxima de 5%. O volume de água evapotranspirado foi completado com água deionizada. Os valores de pH foram monitorados diariamente e mantidos em torno de 5,5, através de correções utilizando-se HCl ou NaOH a 0,1 N. As soluções nutritivas foram renovadas semanalmente.

A temperatura da casa de vegetação durante o desenvolvimento das plantas foi mantida entre 22 °C/ 27 °C.

5.4.4. Experimentos de exaustão

Aos 25 e 40 dias, para a cultura do arroz, e os 25 e 45 dias, para a cultura da cana-de-açúcar, após a transferência das plântulas para a solução nutritiva, foram procedidas as atividades de determinação dos parâmetros de absorção, a partir da absorção de Si da solução de exaustão em função do tempo. Este método foi descrito por Claassen e Barber (1974).

Em cada época de análise foi utilizado um bloco destinado ao experimento de exaustão, as soluções foram trocadas, omitindo-se o Si por 24 horas. Em seguida, outra solução nutritiva, contendo a mesma concentração de Si que a anterior, 1,7 ou 0,1 mmol L⁻¹ de Si, foi adicionada num volume de 1,5 e 2,5 L para as culturas do arroz e da cana-de-açúcar aos 25 dias; e 3,0 L para as duas culturas aos 40 e 45 dias respectivamente, de acordo com o volume de raiz existente na ocasião. A solução foi arejada e o volume evapotranspirado foi repostado adicionando-se água deionizada.

Após 30 minutos, tempo suficiente para que as plantas atingissem um estado estacionário (EPSTEIN e HAGEN, 1952), teve início a coleta das amostras da solução. Foram coletadas amostras de 10 ml a cada 15 minutos nas primeiras duas horas; a cada 30 minutos nas quatro horas seguintes; a cada 60 minutos nas seis horas subseqüentes, ao final de 24 horas, e quando necessário continuou-se a coleta de 12 em 12 horas até que a concentração de Si se apresentasse constante. O volume dos vasos foi mantido constante, repondo-se com água deionizada a amostra de solução retirada.

5.5. Obtenção dos dados

5.5.1. Parâmetros morfológicos radiculares

Após cada experimento de exaustão as plantas foram separadas em parte aérea e raiz. No caso da cana-de-açúcar a planta foi dividida em folhas (bainha+limbo foliar), colmo, mini tolete e raiz.

Foi tomada uma amostra da raiz de cada unidade experimental, constituída de aproximadamente 30 % do volume fresco, extraída no sentido do comprimento, ou seja, do ponto de surgimento das raízes adventícias, no colo da planta, até a extremidade do sistema radicular; em seguida, as amostras foram armazenadas em coletor universal, com capacidade de 100 ml, em solução alcoólica 70%, e acondicionadas em ambiente refrigerado, onde foram mantidos até o momento da avaliação.

As variáveis comprimento, superfície e diâmetro médio das raízes foram avaliadas em Scanner, desenvolvido para esse fim, acoplado a um computador contendo o Software WinRhizo, que utiliza como princípio o método proposto por Tennant (1975).

5.5.2. Massa de matéria seca da parte aérea, raiz e matéria seca total (g planta⁻¹).

A parte aérea das plantas foi lavada em água corrente e a seguir submetida à secagem, em estufa com circulação forçada de ar, a 65°C, por 3 dias, em seguida foram pesadas para a determinação da matéria seca da parte aérea.

Os 70% restantes do sistema radicular juntamente com os 30% utilizados nas determinações morfológicas também foram secos em estufa a 65 °C, onde, posteriormente foi determinada a massa seca radicular.

A matéria seca total foi determinada por meio do somatório da matéria seca da parte aérea e do sistema radicular.

5.5.3. Teor de Si na planta e nas amostras de solução

Determinada a matéria seca da parte aérea e raiz, os materiais foram moídos em moinho tipo Willey, e o teor de Si nos tecidos vegetais foram determinados conforme técnica descrita por Elliott e Snyder (1991) adaptada por Korndörfer et al. (1999).

A determinação de Si nas amostras de solução de exaustão foram analisadas pelo método descrito por Elliott e Snyder (1991), adaptada por Korndörfer et al. (1999).

5.5.4. Quantidade acumulada de silício

Através dos dados de produção de matéria seca e do teor de Si nas diferentes partes da planta, determinou-se a quantidade acumulada de Si, pela multiplicação dos valores de teores pelos valores de matéria seca.

5.5.5. Eficiência de absorção, eficiência de utilização do silício e relação raiz/parte aérea

De posse dos resultados de acúmulo, realizou-se a determinação da eficiência de absorção (quantidade de nutriente absorvido por metro de raiz), através da razão: quantidade acumulada de Si na parte aérea/comprimento radicular. E a eficiência de utilização do silício pela relação: matéria seca da parte aérea/quantidade acumulada de Si na parte aérea.

A relação raiz/parte aérea foi determinada através da divisão da massa de matéria seca da raiz pela massa de matéria seca da parte aérea.

5.5.6. Parâmetros cinéticos de absorção (V_{max} , K_m e C_{min})

Os dados da concentração de Si na solução de exaustão, em cada tempo de amostragem, bem como os dados relativos ao volume da solução nos vasos, tempo total de amostragem, volume da amostra, e a massa da matéria seca de raiz, foram utilizados para calcular os parâmetros cinéticos, K_m e V_{max} , para cada repetição, empregando o software CinéticaWin, (versão para o Windows do Cinética 1.2) (RUIZ e FERNANDES FILHO, 1992).

O C_{min} foi estimado pela média dos valores da concentração de silício

na solução de exaustão, a partir do ponto onde estes tenderam a permanecer constantes.

5.6. Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância e ao teste LSD a 5% de significância para comparação das médias. Os resultados da análise estatística foram obtidos por meio do programa estatístico Sisvar (FERREIRA, 2000).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Experimento com a cultura do arroz

6.1.1. Massa de matéria seca

Como esperado, para as variáveis massa de matéria seca da parte aérea (MSPA), da raiz (MSRA) e total (MST) não houve diferença significativa entre as doses de silício (Tabela 2), devido ao fato do silício estar relacionado à função estrutural e não a processos de crescimento como alongação, multiplicação celular, etc. E ainda os resultados de produtividade são de estabilidade produtiva, ou seja, sob algum tipo de estresse a adequada nutrição com silício ameniza a intensidade de redução da produtividade, acarretando diferenças significativas em relação as plantas que não receberam silício. Os resultados obtidos corroboram os relatos de Tanaka e Park (1966), Liang et al. (1994), Carvalho (2000) e Mauad et al. (2003), que também não encontraram diferença.

Entre os cultivares, o Caiapó produziu maior MSPA e MSRA em comparação com o cultivar Maravilha tanto aos 25 quanto aos 40 dias, apenas para a MSRA aos 40 dias na dose $1,7 \text{ mmol L}^{-1}$ de silício, ocorreu uma inversão dessa tendência (Tabela 2).

A variável MST (Tabela 2), aos 25 dias, foi um reflexo dos resultados obtidos para MSPA e MSRA, ou seja, o maior valor foi constatado no cultivar Caiapó.

Tabela 2. Massa de matéria seca da parte aérea (MSPA), raiz (MSRA) e total (MST) de cultivares de arroz submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 40 dias após a transferência para a solução de crescimento.

Cultivar	Dias de cultivo			
	25 dias		40 dias	
	Níveis de Si (mmol L ⁻¹)			
	1,7	0,1	1,7	0,1
	MSPA (g planta ⁻¹)			
Caiapó	1,6aA	1,6aA	8,4aA	8,4aA
Maravilha	1,3bA	1,3bA	6,6bA	6,5bA
CV (%)*	16,3		16,1	
	MSRA (g planta ⁻¹)			
Caiapó	0,34aA	0,34aA	0,89bA	1,17aA
Maravilha	0,26aA	0,29aA	1,27aA	1,45aA
CV (%)	26,0		25,7	
	MST (g planta ⁻¹)			
Caiapó	2,0aA	2,0aA	9,3aA	9,5aA
Maravilha	1,5bA	1,6bA	7,9aA	7,9aA
CV (%)	15,8		16,4	

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo Teste LSD a 5% de probabilidade.

*CV = coeficiente de variação.

6.1.2. Parâmetros morfológicos de raiz

Na Tabela 3 estão contidos os valores das variáveis comprimento, superfície e diâmetro radicular. Não houve diferenças significativas para as variáveis comprimento e superfície radicular entre doses de silício e entre cultivares, na avaliação aos 25 dias. No entanto, aos 40 dias o cultivar Maravilha teve valores maiores de comprimento e superfície radicular na dose de 0,1 mmol L⁻¹ comparado com a dose de 1,7 mmol L⁻¹ de Si, equivalendo a um aumento de 35% para o comprimento e 26% para a superfície radicular. Entre cultivares observou-se no Maravilha maior comprimento (29%) e maior superfície radicular (27%), em comparação com o Caiapó na dose de 0,1 mmol L⁻¹ de Si.

Um sistema radicular maior resulta em vantagem na absorção de

nutrientes, e o cultivar Maravilha parece estar mais apto a uma eficiente absorção de Si sob insuficiência deste, pois alcançou as maiores extensões de raiz e superfície. Alterações na morfologia radicular, em virtude de uma influência externa, parecem ocorrer nas plantas como ajustes para uma melhor adaptação ao meio adverso de crescimento (SACRAMENTO, 1994).

Tabela 3. Comprimento, superfície e diâmetro radicular de cultivares de arroz submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 40 dias após a transferência para a solução de crescimento.

Cultivar	Dias de cultivo			
	25 dias		40 dias	
	Níveis de Si (mmol L ⁻¹)			
	1,7	0,1	1,7	0,1
	Comprimento (m /planta)			
Caiapó	17,1aA	21,3aA	61,9aA	63,8bA
Maravilha	21,3aA	21,8aA	58,4aB	89,7aA
CV (%)*	33,1		30,4	
	Superfície (cm ² /planta)			
Caiapó	202,8aA	223,5aA	618,4aA	713,3bA
Maravilha	218,8aA	222,0aA	723,7aB	979,4aA
CV (%)	29,6		27,2	
	Diâmetro (mm)			
Caiapó	0,39aA	0,33aB	0,32bA	0,36aA
Maravilha	0,33bA	0,33aA	0,40aA	0,36aA
CV (%)	13,8		10,7	

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo Teste LSD a 5% de probabilidade.

*CV = coeficiente de variação.

O diâmetro da raiz do cultivar Caiapó, aos 25 dias, aumentou significativamente com a aplicação da dose alta de Si. Na comparação entre cultivares, com a maior dose de Si, o Caiapó teve maior diâmetro em comparação ao Maravilha, já aos 40 dias ocorreu uma inversão no comportamento desta variável e o cultivar Maravilha destacou-se com o maior valor.

O comportamento diferenciado entre os cultivares de arroz, quanto ao diâmetro radicular, pode ser atribuído à característica genética específica de cada um. O cultivar que apresenta menor diâmetro radicular pode aumentar a velocidade de absorção e translocação desse elemento, pois, quanto menor a espessura, menor o caminho que os elementos têm para percorrer desde a plasmalema até aos vasos de xilema e floema. E o

cultivar com maior diâmetro pode apresentar menor velocidade de translocação dos nutrientes, tanto pelo apoplasto (intercelular) como no simplasto (intracelular). Pode-se inferir que o aumento do diâmetro radicular no cultivar Maravilha, aos 40 dias, seria um mecanismo de controle da planta para regular a absorção de nutrientes ou do próprio Si, ou até uma característica própria do cultivar, independentemente da concentração de nutrientes.

6.1.3. Parâmetros cinéticos de absorção

As equações ajustadas para o cálculo dos parâmetros V_{\max} e K_m estão contidas na Tabela 4, e as curvas de esgotamento do Si estão representadas na Figura 3. Para o cultivar Maravilha em todos os momentos restou mais silício na solução contida nos vasos, portanto esse cultivar absorveu menos Si que o Caiapó, conforme também se verifica na Tabela 7.

Os valores de V_{\max} , K_m e C_{\min} , estão contidos na Tabela 5. Em termos práticos, V_{\max} (velocidade máxima de absorção) reflete a capacidade de absorção de um determinado íon, K_m (constante de Michaelis-Menten), representa a afinidade do sistema de transporte pelo íon a ser transportado e C_{\min} é a concentração limite abaixo da qual a planta é incapaz de absorver o íon.

Os valores dos parâmetros cinéticos da absorção de Si variaram com a concentração de silício na solução (Tabela 5). Os valores de K_m indicaram que na dose de 0,1 mmol L⁻¹ de Si predomina um sistema de transporte de alta afinidade, enquanto que, na de 1,7 mmol L⁻¹ de Si, predomina o sistema de baixa afinidade, sendo representado graficamente por duas isotermas (Figura 4). Na menor dose de Si constatam-se os menores valores e na maior dose os maiores valores de K_m . Resultados semelhantes foram encontrados por Borges et al. (2009), avaliando a cinética de absorção do amônio com alta e baixa dose em variedades de milho.

Segundo Wang et al. (1993), sistemas de transporte de alta e de baixa afinidade possuem distintos valores de K_m . Como o K_m representa a concentração de substrato na qual o processo de transporte atinge a metade da velocidade máxima, a afinidade pelo substrato é o parâmetro mais relevante na descrição dos sistemas de transporte iônico envolvendo o processo de absorção de nutrientes pelas plantas (WIRÉN et al., 2000).

Tabela 4. Equações ajustadas para as curvas de absorção de silício (Si absorvido versus tempo) no cálculo dos parâmetros cinéticos da absorção por cultivares de arroz submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 40 dias após a transferência para a solução de crescimento.

Dose Si (mmol L ⁻¹)	Equação	Caiapó		Maravilha		
		Modelo	Equação	Modelo	Equação	
25 dias						
1,7	2587,1 - 133,5 . t 4277,6 . e ^(t*-0,1328)	Linear	R ² = 0,992	2543,2 - 83,2 . t 3853,3 . e ^(t*-0,0777)	Linear	R ² = 0,982
		Exponencial	R ² = 0,997		Exponencial	R ² = 0,998
0,1	157,5 - 33,5 . t 131,9 . e ^(t*-0,1796)	Linear	R ² = 0,996	164,5 - 29,9 . t 173,1 . e ^(t*-0,2036)	Linear	R ² = 0,969
		Exponencial	R ² = 0,951		Exponencial	R ² = 0,988
40 dias						
1,7	4828,6 - 396,7 . t 2170,5 . e ^(t*-0,1222)	Linear	R ² = 0,996	5193,7 - 272,0 . t 7231,2 . e ^(t*-0,1276)	Linear	R ² = 0,993
		Exponencial	R ² = 0,890		Exponencial	R ² = 0,978
0,1	161,6 - 81,1 . t 168,3 . e ^(t*-0,6777)	Linear	R ² = 0,991	249,7 - 112,1 . t 147,9 . t ^{-0,8509}	Linear	R ² = 0,998
		Exponencial	R ² = 0,997		Potencial	R ² = 0,883

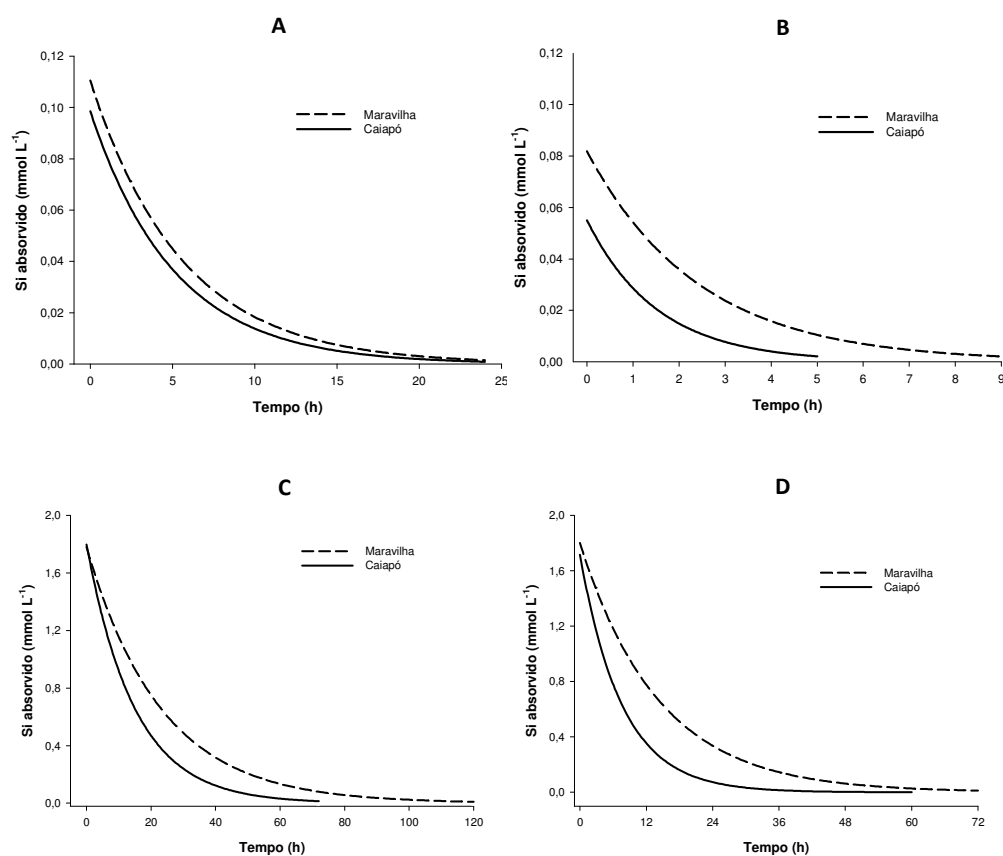


Figura 3. Curva de esgotamento do Si contido na solução de cultivo quando se aplicou 0,1 mmol L⁻¹ (A e B) e 1,7 mmol L⁻¹ (C e D) de Si, aos 25 dias (A e C) e 40 dias (B e D) após o transplante dos cultivares de arroz.

Aos 25 dias não foram verificadas diferenças significativas para as variáveis V_{\max} e K_m entre os cultivares (Tabela 5). Entretanto aos 40 dias, na dose alta de Si o cultivar Caiapó teve maior V_{\max} ($98,0 \mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$) e menor K_m ($269,7 \mu\text{mol L}^{-1}$) em comparação com o cultivar Maravilha. Os valores de V_{\max} diferem dos relatados por Tamai e Ma (2003), ($V_{\max} = 221 \mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$), mas os de K_m se assemelham ($K_m = 320 \mu\text{mol L}^{-1}$). Esses autores também analisaram a cinética de absorção do silício com uma dose alta de Si na solução de exaustão ($1,5 \text{mmol L}^{-1}$) para a cultura do arroz.

Tabela 5. Parâmetros cinéticos V_{\max} (velocidade máxima), K_m e C_{\min} , da absorção de Si por cultivares de arroz submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 40 dias após a transferência para a solução de crescimento.

Cultivar	Dias de cultivo			
	25 dias		40 dias	
	Níveis de Si (mmol L^{-1})			
	1,7	0,1	1,7	0,1
	V_{\max} ($\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$)			
Caiapó	74,7aA	19,2aB	98,0aA	11,7aB
Maravilha	66,6aA	17,3aB	37,6bA	14,6aB
CV (%)*	42,1		32,1	
	K_m ($\mu\text{mol L}^{-1}$)			
Caiapó	440,0aA	43,8aB	269,7bA	18,5aB
Maravilha	481,5aA	49,8aB	392,5aA	32,0aB
CV (%)	24,1		31,8	
	C_{\min} ($\mu\text{mol L}^{-1}$)			
Caiapó	2,3aB	10,4aA	1,2aA	1,8bA
Maravilha	2,5aA	3,1bA	1,3aB	3,7aA
CV (%)	69,2		56,1	

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo Teste LSD a 5% de probabilidade.

*CV = coeficiente de variação.

Os valores de K_m encontrados, que variaram de 18,5 a 481,5 $\mu\text{mol L}^{-1}$, para ácido silícico foram bem maiores que os de outros minerais. Por exemplo, o K_m de fósforo está entre 1 e 5 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (KOCHIAN, 2000). Este resultado indica que o transportador de Si nas raízes de arroz tem uma baixa afinidade para ácido silícico. Uma possível explicação para esta baixa afinidade é que ao contrário de outros minerais, Si é abundante na solução do solo e um transportador com alta afinidade é desnecessário (TAMAI e MA, 2003). A

concentração de Si na solução do solo varia entre 0,1 e 0,6 mmol (EPSTEIN, 1994), portanto o valor encontrado parece adequado.

Observa-se que é muito difícil comparar dados de parâmetros cinéticos entre experimentos, pois mesmo utilizando concentrações de soluções semelhantes, as diferenças entre cultivares, idade fisiológica e fatores ambientais modificam decisivamente esses parâmetros. Entretanto, é importante que sejam utilizadas faixas de concentrações acima e abaixo de $1,0 \text{ mmol L}^{-1}$, permitindo assim comparações entre transportadores de afinidades diferentes (MACHADO e FURLANI, 2004).

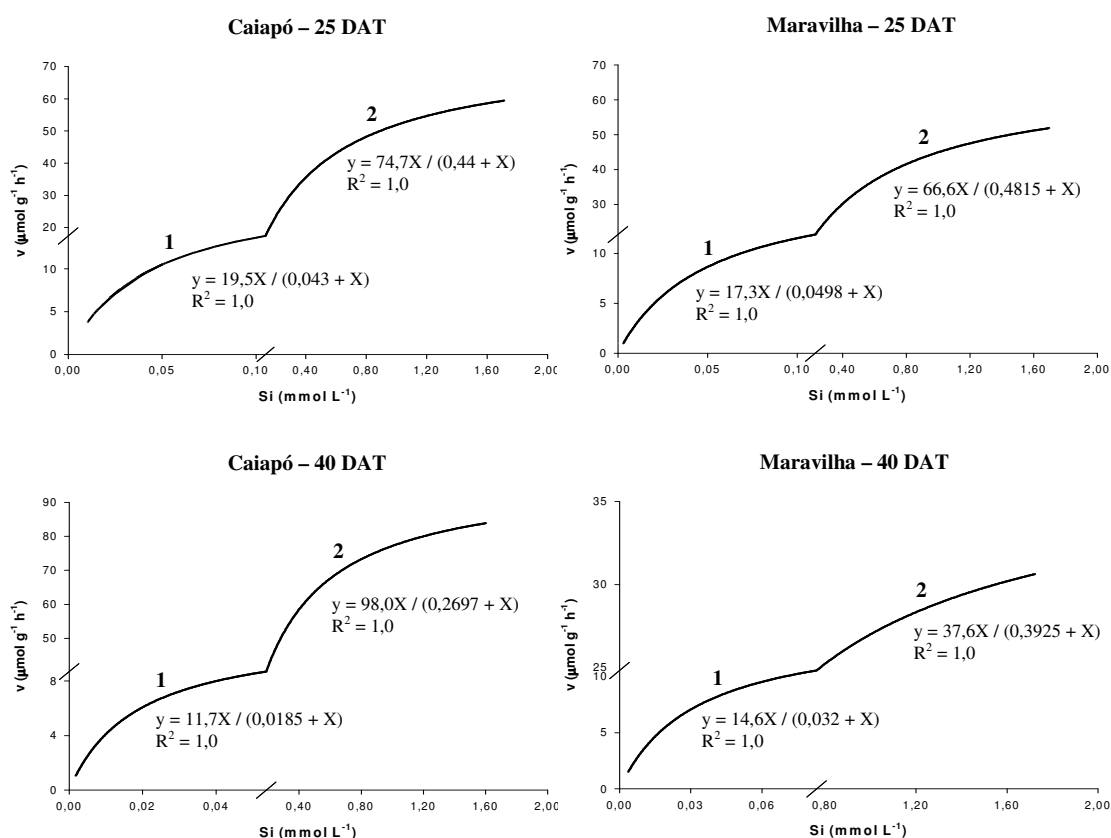


Figura 4. Velocidade de absorção de Si e a participação dos mecanismos de absorção de alta (1) e baixa (2) afinidade em raízes de cultivares de arroz aos 25 e 40 dias após o transplante (DAT) em função da concentração de Si na solução nutritiva.

O comportamento do cultivar Caiapó em ter maior V_{\max} e menor K_m (Tabela 5), indica uma adaptação do sistema de absorção a maior disponibilidade de Si na solução externa, conferindo a este cultivar maior eficiência na absorção deste elemento.

Teoricamente, alguns autores têm sugerido que plantas que são eficientes para a absorção de nutrientes devem apresentar V_{\max} elevado, que significa ter elevadas taxas de absorção em altas concentrações externas de nutrientes e baixo K_m e C_{\min} , o que significa ser capaz de absorver melhor o nutriente das soluções (SCHENK e BARBER, 1979b, 1980). Furlani (1988) e Stefanutti (1997), em estudos com genótipos de arroz, observaram que plantas mais adaptadas a elevadas fertilidades são aquelas que possuem V_{\max} correspondente aos valores mais altos.

O K_m para a solução com $0,1 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si independente do cultivar (Tabela 5), teve valores 11 vezes menores em comparação com a solução com dose suficiente de Si, apesar da relação entre as concentrações de Si das soluções de tratamento ser de 17. Isso demonstra que os transportadores ativados na faixa de baixa concentração têm muito mais afinidade pelo nutriente do que aqueles ativados na faixa de alta concentração (MATIAS et al., 2003).

A velocidade de absorção de Si da solução contendo $1,7 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si (Tabela 5) foi, na média das avaliações, 4,4 vezes maior em comparação com a solução que continha $0,1 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si independente do cultivar. Esse fato permite inferir que o sistema de transporte ativado para a absorção de Si na faixa de alta concentração, tem velocidade bem maior do que o sistema de transporte ativado na faixa de baixa concentração.

A respeito de C_{\min} , cabe ressaltar que menores valores correspondem a maior eficiência de absorção, visto que a planta ainda consegue absorver em condições de deficiência e, portanto, qualquer aumento nos valores de C_{\min} significa redução na eficiência de absorção do nutriente.

Pode-se dizer que os resultados obtidos evidenciam que o parâmetro cinético C_{\min} também está sujeito à modulação. Os valores para a variável C_{\min} foram diferente estatisticamente entre as doses de Si para o cultivar Caiapó aos 25 dias, e para o Maravilha aos 40 dias (Tabela 5), sendo os maiores valores encontrados na dose baixa de Si e os menores valores na dose alta. Resultados semelhantes foram encontrados também entre os cultivares, que tiveram diferenças significativas na dose de $0,1 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si (Tabela 5), no qual o Caiapó teve maior valor de C_{\min} aos 25 dias e o Maravilha aos 40 dias.

Dionísio et al. (1985) constataram redução nos valores dos parâmetros cinéticos, V_{\max} , K_m e C_{\min} , da absorção de potássio por plantas de milho, em função da idade

das plantas. Barber (1982) e Fageria (1976) também observaram que a taxa de absorção de potássio diminuía com o avanço da idade.

6.1.4. Teor de silício na parte aérea e na raiz

Na Tabela 6 nota-se que a aplicação da dose alta de Si, aumentou de forma significativa os teores de silício na parte aérea e na raiz em ambos os cultivares. Aumento nos teores de silício no tecido vegetal em função da adubação silicatada é bastante encontrado na literatura, sobre tudo em condições tropicais, uma vez que nossos solos são pobres nesse elemento, devido ao avançado grau de intemperismo (MALAVOLTA, 1980; BARBOSA FILHO et al., 2001). Em alta concentração de Si predomina a atuação do sistema de baixa afinidade de transporte de Si, baixa afinidade/alta capacidade de transporte promovendo uma maior e mais rápida absorção.

Entre os cultivares apenas na dose 0,1 mmol L⁻¹ de Si aos 25 dias, não ocorreu diferença significativa para o teor de Si na parte aérea. Nos demais tratamentos o cultivar Maravilha, pertencente ao grupo moderno, teve o maior teor de Si na parte aérea (Tabela 6).

Tabela 6. Teor de Si na parte aérea (PA) e na raiz (RA) de cultivares de arroz submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 40 dias após a transferência para a solução de crescimento.

Cultivar	Dias de cultivo			
	25 dias		40 dias	
	Níveis de Si (mmol L ⁻¹)			
	1,7	0,1	1,7	0,1
	Si PA (g kg ⁻¹)			
Caiapó	25,3bA	3,9aB	13,2bA	0,7bB
Maravilha	30,2aA	3,8aB	14,6aA	1,5aB
CV (%)*	19,6		7,5	
	Si RA (g kg ⁻¹)			
Caiapó	2,4bA	1,9aB	2,5aA	1,7aB
Maravilha	2,9aA	2,1aB	2,4aA	1,7aB
CV (%)	13,5		19,7	

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo Teste LSD a 5% de probabilidade.

*CV = coeficiente de variação.

Mauad (2006), trabalhando com os mesmos cultivares do presente estudo, com e sem adubação silicatada, observou que o cultivar Maravilha teve o maior teor quando não recebeu Si. Entretanto, em condições de adubação silicatada, o maior teor foi constatado no cultivar Caiapó. Sob a menor tensão de água, o teor de Si foi maior no Maravilha em relação ao Caiapó e, sob a maior tensão de água, o teor de Si foi maior no Caiapó. Estes resultados evidenciam a diferença de comportamento de cultivares em diferentes situações de ambiente.

Cabe lembrar que os genótipos de arroz diferem bastante quanto a sua capacidade de absorver silício (WINSLOW, 1992; BARBOSA FILHO et al., 1998) e que tais mudanças no processo de absorção estão relacionados às características genéticas que controlam a herança para eficiência de utilização de nutrientes, e as diferenças de ambiente que também atuam na modulação dos parâmetros cinéticos de absorção.

Os teores de silício na planta são classificados em baixo quando for menor que 17 g kg^{-1} , médio de 17 a 34 g kg^{-1} e altos acima de 34 g kg^{-1} (KORNDÖRFER et al., 1999). Observa-se (Tabela 6) que os teores de silício encontrados nesse trabalho classificam-se como baixo e médio, sendo que o teor médio foi encontrado apenas na dose suficiente de Si aos 25 dias.

Com o passar do tempo o teor de Si na parte aérea diminuiu (Tabela 6) em ambas as doses de Si, um fator para a queda no teor de silício na planta seria o efeito de diluição, pois ocorreu aumento da massa de matéria seca (Tabela 2).

Para Wallace (1992), plantas onde a absorção de cátions é igual a de ânions a absorção de silício é relativamente pequena. Quando a absorção de cátions é maior que a de ânions, a solubilidade do silício é diminuída, entretanto quando a absorção ânions é maior que a de cátions a solubilidade do silício aumenta.

O teor de Si na raiz (Tabela 6) não foi diferente na maioria dos tratamentos, talvez isso se deva ao fato da deposição de silício ocorrer principalmente na parte aérea da planta, como o observado por vários autores como Yoshida et al. (1962) e Agarie et al. (1998). Apenas na maior dose de Si, aos 25 dias, o cultivar maravilha teve maior teor de Si na raiz em relação ao Caiapó.

6.1.5. Quantidade acumulada de silício no arroz

A quantidade acumulada de Si na parte aérea (Tabela 7) foi maior na dose 1,7 mmol L⁻¹ em relação a dose 0,1 mmol L⁻¹ em ambas as épocas de amostragem. Não foram constatadas diferenças entre os cultivares. Esse mesmo relato pode ser feito para o acúmulo de Si na planta inteira (Tabela 7). Entretanto Winslow (1992) e Barbosa Filho et al. (1998) constataram diferenças entre genótipos de arroz quanto ao acúmulo de silício.

No sistema radicular, a quantidade acumulada aos 25 dias não diferiu entre doses e nem entre cultivares (Tabela 7). Contudo, aos 40 dias o cultivar Maravilha teve os maiores acúmulos tanto na dose de Si alta quanto na baixa em comparação ao Caiapó.

Tabela 7. Quantidade acumulada de silício na parte aérea (PA), na raiz (RA) e na planta inteira (PI) de cultivares de arroz submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 40 dias após a transferência para a solução de crescimento.

Cultivar	Dias de cultivo			
	25 dias		40 dias	
	Níveis de Si (mmol L ⁻¹)			
	1,7	0,1	1,7	0,1
PA (mg planta ⁻¹)				
Caiapó	41,0aA	6,3aB	108,6aA	5,5aB
Maravilha	38,4aA	4,8aB	97,0aA	9,5aB
CV (%)*	13,3		23,4	
RA (mg planta ⁻¹)				
Caiapó	0,81aA	0,65aA	2,05bA	1,91bA
Maravilha	0,73aA	0,60aA	3,03aA	2,44aB
CV (%)	26,4		15,8	
PI (mg planta ⁻¹)				
Caiapó	41,8aA	6,9aB	110,7aA	7,4aB
Maravilha	39,1aA	5,4aB	100,1aA	12,0aB
CV (%)	12,6		22,8	

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo Teste LSD a 5% de probabilidade.

*CV = coeficiente de variação.

6.1.6. Eficiência de absorção, eficiência de utilização de silício e relação raiz/parte aérea.

A eficiência de absorção (EA) interpretada como miligramas de Si absorvido por metro de raiz, permitiu constatar que plantas que receberam dose alta de Si e mais jovens proporcionaram maior EA (Tabela 8). Quanto aos menores valores de EA proporcionados pelas plantas cultivadas sob a dose baixa de Si, pode-se dizer que provavelmente a absorção destas plantas foi reduzida não por ineficiência do sistema de absorção, mas sim, pela baixa disponibilidade de Si.

Entre os cultivares, na dose baixa de Si não se observou diferença na EA (Tabela 8). Na dose alta de Si o Caiapó foi o que proporcionou maior EA. Possivelmente, isto está relacionado a parâmetros cinéticos de absorção, pois este cultivar teve, na média, os maiores valores de V_{max} . Infere-se que as raízes tenham maior número de sítios de absorção para Si, já que este cultivar não diferiu estatisticamente para os parâmetros morfológicos de raiz. Resultados semelhantes foram encontrados por Winslow (1992), onde cultivares tradicionais de arroz tiveram maior eficiência na absorção de silício.

Para a eficiência de utilização (EU), o resultado foi oposto ao encontrado para a variável EA. Observou-se também diferença estatística entre as doses de Si, contudo a maior EU foi encontrada na dose $0,1 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si. Diferença estatística entre cultivares só ocorreu na menor dose de Si aos 40 dias, onde o cultivar Caiapó proporcionou o maior valor de EU (Tabela 8).

Aos 25 dias de avaliação, não foi encontrada diferença para a variável relação raiz/parte aérea (RA/PA). No entanto aos 40 dias, o cultivar Caiapó proporcionou a maior relação RA/PA na menor dose de Si. Já na comparação entre cultivares foi o cultivar Maravilha que proporcionou os maiores valores, tanto na maior quanto na menor dose de Si (Tabela 8).

Uma alta relação raiz/parte aérea pode ser benéfica em condições de baixo nível de fertilidade do solo, pois haverá maior área de raiz para suprir as necessidades da planta. Por outro lado, a maior translocação de fotoassimilados para o sistema radicular pode limitar o desenvolvimento vegetativo da parte aérea, diminuindo a área fotossinteticamente ativa e reduzindo a produtividade da cultura quando a condição de estresse persiste por muito

tempo. Pois, esse ajuste fisiológico da planta tem um custo metabólico que pode ser irreversível, dependendo do estágio de desenvolvimento que a planta se encontra.

Tabela 8. Eficiência de absorção de Si (EA – Si acumulado na parte aérea/comprimento radicular), eficiência de utilização (EU – massa de matéria seca da parte aérea/Si acumulado na parte aérea) e relação raiz/parte aérea (RA/PA – massa de matéria seca da raiz/massa de matéria seca da parte aérea) de cultivares de arroz submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 40 dias após a transferência para a solução de crescimento.

Cultivar	Dias de cultivo			
	25 dias		40 dias	
	Níveis de Si (mmol L ⁻¹)			
	1,7	0,1	1,7	0,1
	EA (mg m ⁻¹)			
Caiapó	2,60aA	0,34aB	2,13aA	0,10aB
Maravilha	1,95bA	0,25aB	1,74bA	0,12aB
CV (%)*	29,6		28,8	
	EU (g mg ⁻¹)			
Caiapó	0,04aB	0,27aA	0,08aB	2,60aA
Maravilha	0,03aB	0,29aA	0,07aB	0,69bA
CV (%)	36,2		25,8	
	RA/PA			
Caiapó	0,21aA	0,20aA	0,10bB	0,14bA
Maravilha	0,20aA	0,23aA	0,19aA	0,22aA
CV (%)	26,4		18,1	

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo Teste LSD a 5% de probabilidade.

*CV = coeficiente de variação.

6.2. Experimento com a cultura da cana-de-açúcar

6.2.1. Massa de matéria seca

Não se observou diferença entre as doses de Si na cana-de-açúcar (Tabela 9), para as variáveis massa de matéria seca da folha (MSF), colmo (MSC), parte aérea (folha+colmos) (MSPA), raiz (MSRA) e total (MST).

Contrariando os resultados encontrados, efeitos positivos do Si sobre a

produção de matéria seca de cana-de-açúcar em condições de casa de vegetação foram demonstrados na África do Sul (PREEZ, 1970) e no Brasil (FRANCO e KORNDÖRFER, 1995). Silveira Jr. et al. (2003) também obtiveram aumentos de produção de colmos na cana-de-açúcar em condições de campo.

Tabela 9. Massa de matéria seca das folhas (MSF), colmo (MSC), parte aérea (MSPA), raiz (MSRA) e total (MST) de cultivares de cana-de-açúcar submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 45 dias após a transferência para a solução de crescimento.

Variedade	Dias de cultivo			
	25 dias		45 dias	
	Níveis de Si (mmol L ⁻¹)			
	1,7	0,1	1,7	0,1
	MSF (g planta ⁻¹)			
RB85-5035	4,6bB	5,3aA	10,7bA	10,6aA
SP81-3250	5,9aA	5,7aA	13,1aA	12,0aA
CV(%)*	8,9		12,6	
	MSC (g planta ⁻¹)			
RB85-5035	3,3bA	3,8aA	15,6bA	14,8aA
SP81-3250	4,6aA	4,2aA	21,6aA	16,0aA
CV(%)	15,8		27,6	
	MSPA (g planta ⁻¹)			
RB85-5035	7,9bA	9,1aA	26,3bA	25,4aA
SP81-3250	10,5aA	9,9aA	34,8aA	28,0aA
CV(%)	11,7		20,4	
	MSRA (g planta ⁻¹)			
RB85-5035	1,5bA	1,6aA	4,7aA	5,0aA
SP81-3250	2,0aA	1,7aA	5,4aA	4,8aA
CV(%)	24,2		19,7	
	MST (g planta ⁻¹)			
RB85-5035	9,4bA	10,7aA	31,0bA	30,4aA
SP81-3250	12,5aA	11,6aA	40,2aA	32,8aA
CV(%)	13,5		19,8	

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo Teste LSD a 5% de probabilidade.

*CV = coeficiente de variação.

O efeito do Si na cana-de-açúcar pode estar relacionado à maior resistência ao acamamento e, alterações na arquitetura da planta. Plantas adubadas com Si possuem as folhas mais eretas e, em consequência disso, mais eficientes quanto à capacidade

de absorção da luz solar e de realizar fotossíntese (KORNDÖRFER e DATNOFF, 2000). Além disso, efeitos positivos do Si em plantas em situação de estresse têm sido largamente comprovados (DATNOFF et al., 2001). O Si pode aumentar a resistência das plantas ao estresse hídrico, como demonstrado no trabalho de Faria (2000), talvez essa seja a explicação para não se observar diferença no presente trabalho, pois as condições ambientais de casa de vegetação eram ótimas, sem ataque de pragas, doenças ou qualquer outro tipo de estresse o que poderia ter diminuído a resposta da cana-de-açúcar ao Si aplicado.

Entre os cultivares, não houve diferença na menor dose de Si (0,1 mmol L⁻¹ de Si). Entretanto na maior dose (1,7 mmol L⁻¹), o cultivar SP81-3250 produziu maior MSF, MSC, MSPA, MSRA e MST, na avaliação aos 25 e 45 dias. Talvez esse resultado se deva apenas a diferença genética dos cultivares.

6.2.2. Parâmetros morfológicos de raiz

Para a variável comprimento radicular (Tabela 10) observou-se diferença significativa entre as doses apenas para o cultivar SP81-3250, sendo que os maiores valores foram encontrados para a maior dose de silício tanto aos 25 quanto aos 45 dias. Resultado semelhante também foi observado para a variável superfície radicular (Tabela 10), apenas aos 45 dias, com destaque também para o cultivar SP81-3250 na maior dose de Si. Estes resultados sugerem que a aplicação de silício em dose alta favorece o desenvolvimento radicular em alguns cultivares de cana-de-açúcar.

O sistema radicular influencia e é influenciado pela absorção de nutrientes. As modificações que podem ocorrer são de grande importância prática, pois com a adubação o gradiente de nutrientes no solo é alterado. As raízes apresentam tendência natural de maior desenvolvimento em zonas com maior disponibilidade de nutrientes e existem relatos de redução na massa radicular, além de mudanças no volume e distribuição lateral mediante deficiência de potássio e fósforo (HACKETT, 1968).

Entre cultivares não houve diferença significativa em nenhum dos parâmetros morfológicos de raiz. Contudo, segundo Vasconcelos (2005), o desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar faz parte de um sistema dinâmico, variando com os fatores genéticos, com o ciclo e idade da planta. Diferenças no desenvolvimento radicular entre

cultivares de cana-de-açúcar já foram observadas por Humbert (1968). Vasconcelos et al. (2003) mencionam que o sistema radicular da cana-de-açúcar é extremamente dependente da variedade.

Tabela 10. Comprimento, superfície e diâmetro radicular de cultivares de cana-de-açúcar submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 45 dias após a transferência para a solução de crescimento.

Variedade	Dias de cultivo			
	25 dias		45 dias	
	Níveis de Si (mmol L ⁻¹)			
	1,7	0,1	1,7	0,1
	Comprimento (m /planta)			
RB85-5035	69,7aA	59,7aA	160,9aA	153,5aA
SP81-3250	73,4aA	55,0aB	178,5aA	142,9aB
CV(%)*	17,9		12,7	
	Superfície (cm ² /planta)			
RB85-5035	1018aA	916aA	2629aA	2669aA
SP81-3250	1170aA	872aA	3045aA	2422aB
CV(%)	30,6		14,6	
	Diâmetro (mm)			
RB85-5035	0,48aA	0,50aA	0,52aA	0,55aA
SP81-3250	0,51aA	0,50aA	0,55aA	0,55aA
CV(%)	7,7		6,2	

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo Teste LSD a 5% de probabilidade.

*CV = coeficiente de variação.

O diâmetro da raiz (Tabela 10) não foi influenciado pelos tratamentos e nem pelas épocas de avaliação. O diâmetro das raízes de cana-de-açúcar se manteve em 0,52 mm. A classe de diâmetro para raízes de cana-de-açúcar encontrada por Ball-Coelho et al. (1992) variou entre 0,05 e 1,1 mm. Porém, o diâmetro médio de raízes encontrado por esses autores foi menor (0,20 a 0,26 mm) em relação ao encontrado no presente trabalho.

6.2.3. Parâmetros cinéticos de absorção

As equações ajustadas para o cálculo dos parâmetros V_{\max} e K_m estão contidas na Tabela 11, e as curvas de esgotamento do Si estão representadas na Figura 5,

mostrando que a absorção de Si foi semelhante para os dois cultivares de cana-de-açúcar.

Os valores dos parâmetros cinéticos da absorção de Si, V_{\max} e K_m , variaram com a concentração de silício na solução, semelhante ao visto anteriormente para o experimento com a cultura do arroz. Os valores dessas variáveis também evidenciam os sistemas de absorção para Si de alta e baixa afinidade atuantes nas doses de $0,1 \text{ mmol L}^{-1}$ e $1,7 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si em solução, respectivamente (Figura 6). Na maior dose de Si encontram-se os maiores valores de V_{\max} e K_m em comparação com a menor dose (Tabela 12).

Quando a faixa de concentrações externas é suficientemente larga, em lugar de apenas uma isoterma, podem aparecer duas e, às vezes, mais. O chamado padrão duplo é interpretado como sendo devido à operação de dois carregadores. Assim, na faixa de menor concentração opera aquele para o qual o elemento apresenta maior afinidade, enquanto na de maior concentração atua o carregador com o qual o íon apresenta menor afinidade (MALAVOLTA, 2006).

Os parâmetros cinéticos da absorção de nutrientes são importantes atributos da planta a serem considerados quando se olha para genoma eficiente, avaliação e seleção de genótipos para maior eficiência de absorção sob concentrações externas, baixa ou alta do nutriente, conforme Machado e Furlani (2004), analisando a cinética de absorção do P em variedades de milho.

O cultivar RB85-5035 proporcionou os maiores valores de V_{\max} na dose alta de Si, em ambas as épocas de amostragem, em comparação com o SP81-3250. Na menor dose de Si não foi observado diferença significativa entre os cultivares.

A velocidade de absorção de Si da solução contendo $1,7 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si (Tabela 12) foi, na média das avaliações, 4,5 vezes maior em comparação com a solução que continha $0,1 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si. Esta relação é semelhante ao encontrado para o arroz, discutido anteriormente, contudo os valores de V_{\max} da cana-de-açúcar são bem menores ($12,8 \mu\text{mol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ na dose alta de Si e $2,8 \mu\text{mol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ na dose baixa) em comparação com valores para a cultura do arroz ($69,7 \mu\text{mol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ na dose alta de Si e $15,8 \mu\text{mol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ na dose baixa), provavelmente isso se deva ao fato da cana-de-açúcar ser uma cultura de ciclo longo e, portanto tem uma menor absorção no início do ciclo.

Tabela 11. Equações ajustadas para as curvas de absorção de silício (Si absorvido versus tempo) no cálculo dos parâmetros cinéticos da absorção por cultivares de cana-de-açúcar submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 45 dias após a transferência para a solução de crescimento.

Dose Si (mmol L ⁻¹)	RB85-5035		SP81-3250			
	Equação	Modelo	Equação	Modelo		
25 dias						
1,7	4141,7- 76,0 . t	Linear	R ² = 0,997	4127,4- 73,6 . t	Linear	R ² = 0,988
	17956,0 . e ^(t*-0,0612)	Exponencial	R ² = 0,935	15776,6 . e ^(t*- 0,0561)	Exponencial	R ² = 0,940
0,1	277,6- 25,2 . t	Linear	R ² = 0,993	272,2- 17,8 . t	Linear	R ² = 0,999
	256,9 . e ^(t*- 0,0874)	Exponencial	R ² = 0,986	280,5 . e ^(t*- 0,1046)	Exponencial	R ² = 0,993
45 dias						
1,7	5184,7- 178,3 . t	Linear	R ² = 0,994	5058,0- 157,8 . t	Linear	R ² = 0,994
	15877,0 . e ^(t*- 0,1305)	Exponencial	R ² = 0,983	53482,6 . e ^(t*- 0,1633)	Exponencial	R ² = 0,946
0,1	239,3- 35,9 . t	Linear	R ² = 0,983	269,1- 35,6 . t	Linear	R ² = 0,998
	279,0 . e ^(t*- 0,2612)	Exponencial	R ² = 0,994	2194,9 . t ^{-1,833}	Potencial	R ² = 0,992

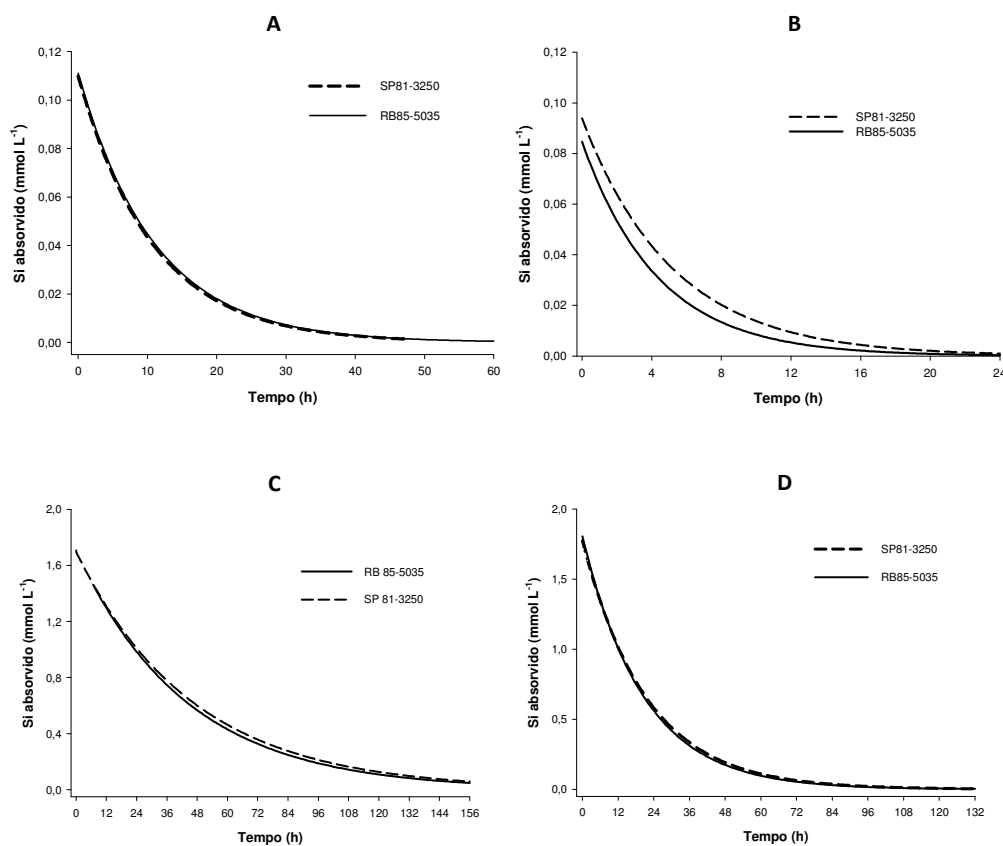


Figura 5. Curva de esgotamento do Si contido na solução de cultivo quando se aplicou 0,1 mmol L⁻¹ (A e B) e 1,7 mmol L⁻¹ (C e D) de Si, aos 25 dias (A e C) e 45 dias (B e D) após o transplante, para cultivares de cana-de-açúcar.

Tabela 12. Parâmetros cinéticos K_m , V_{max} (velocidade máxima) e C_{min} , da absorção de Si por cultivares de cana-de-açúcar submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 45 dias após a transferência para a solução de crescimento.

Variedade	Dias de cultivo			
	25 dias		45 dias	
	Níveis de Si (mmol L^{-1})			
	1,7	0,1	1,7	0,1
	V_{max} ($\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$)			
RB85-5035	22,4aA	3,5aB	12,7aA	2,2aB
SP81-3250	8,5bA	3,0aB	7,7bA	2,6aB
CV(%)*	41,3		61,5	
	K_m ($\mu\text{mol L}^{-1}$)			
RB85-5035	282,9aA	49,4aB	282,1aA	27,4aB
SP81-3250	277,1aA	41,0aB	196,6bA	26,4aB
CV(%)	31,7		30,5	
	C_{min} ($\mu\text{mol L}^{-1}$)			
RB85-5035	2,4bA	2,0aA	0,5bB	1,7aA
SP81-3250	2,8aA	2,1aA	0,8aA	0,4bB
CV(%)	29,5		30,2	

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo Teste LSD a 5% de probabilidade.

*CV = coeficiente de variação.

A variável K_m não foi diferente entre as variedades na avaliação aos 25 dias. Contudo, aos 45 dias o cultivar SP81-3250 proporcionou o menor valor de K_m na dose alta de Si em comparação com o RB85-5035, mostrando um ajuste para manter a velocidade e eficiência de absorção desse cultivar. Também nesse período, na menor dose de Si, não foi constatada diferença entre os cultivares. Os valores médios de K_m encontrados para a cultura da cana-de-açúcar ($260 \mu\text{mol L}^{-1}$ para a dose alta de Si e $36 \mu\text{mol L}^{-1}$ para a dose baixa), assim como para o arroz, são bem altos em comparação com o K_m de outras culturas para outros elementos como os encontrados por Anghinoni et al. (1989): $5 \mu\text{mol L}^{-1}$ de H_2PO_4 para trigo e $3,5 \mu\text{mol L}^{-1}$ de H_2PO_4 para o arroz; $13 \mu\text{mol L}^{-1}$ de K^+ para trigo e $8 \mu\text{mol L}^{-1}$ de K^+ para milho.

Observa-se com o passar do tempo uma queda nos valores dos parâmetros cinéticos V_{max} e K_m (Tabela 12). Infere-se que a idade seja fator que promova decréscimo natural em V_{max} (SACRAMENTO e ROSOLEM, 1997).

A concentração mínima (C_{\min}) aos 25 dias, não foi diferente entre as doses de Si (Tabela 11). Entretanto, na dose 1,7 mmol L⁻¹ de Si o cultivar RB85-5035 proporcionou o menor valor de C_{\min} em comparação com o SP81-3250.

Aos 45 dias observou-se diferenças entre doses e entre cultivares para os valores de C_{\min} (Tabela 11). Entre doses o cultivar RB85-5035 proporcionou menor C_{\min} na maior dose de Si, e o SP81-3250 menor C_{\min} na menor dose de Si. Entre variedades, na dose alta de Si o RB85-5035 proporcionou o menor valor de C_{\min} , e na dose baixa de Si em solução foi o SP81-3250 que proporcionou menor C_{\min} . Em síntese o RB85-5035 foi mais eficiente na absorção de Si em elevado nível de Si disponível e o SP81-3250 proporcionou maior eficiência em um nível baixo de Si disponível.

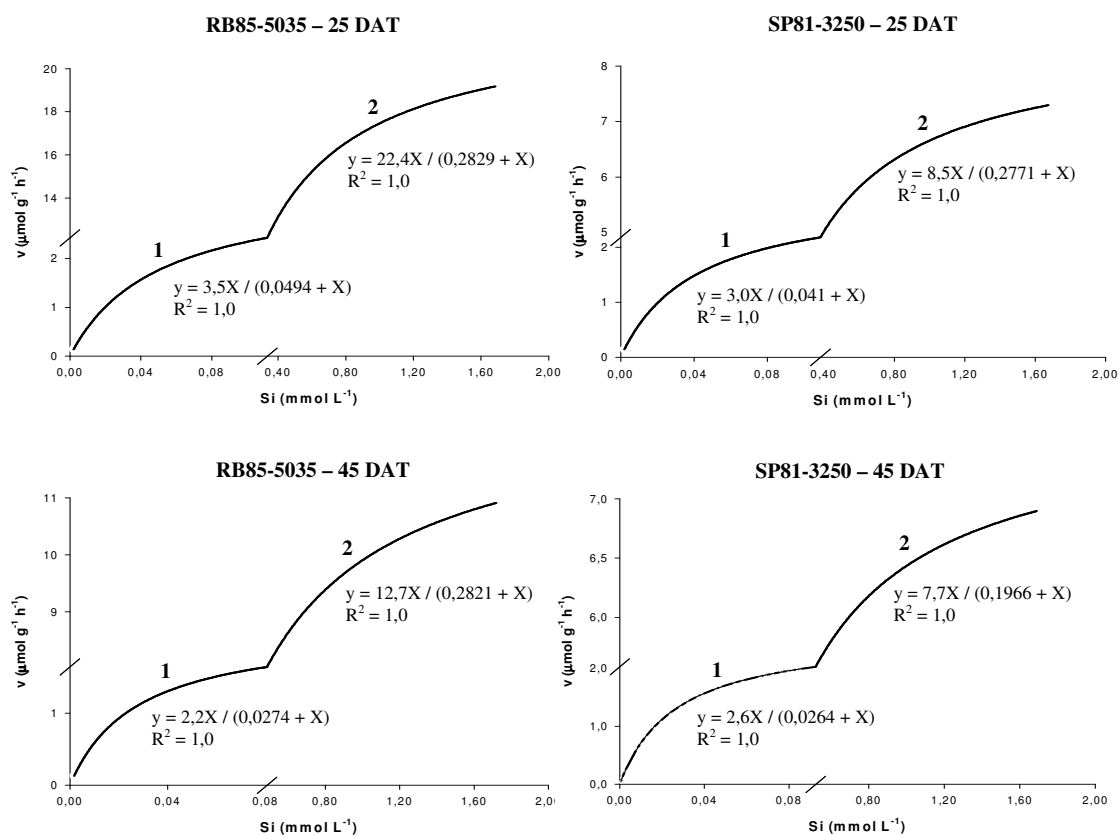


Figura 6. Velocidade de absorção de Si e a participação dos mecanismos de absorção de alta (1) e baixa (2) afinidade em raízes de cultivares de cana-de-açúcar aos 25 e 45 dias após o transplante (DAT) em função da concentração de Si na solução nutritiva.

6.2.4. Teor de silício na planta

Os teores de silício na cana-de-açúcar podem variar desde 1,4 a 40 g kg⁻¹ na matéria seca, sendo, em alguns casos, maiores que macronutrientes como, por exemplo, o N (KORNDÖRFER et al., 2002).

O teor foliar de Si (Tabela 13) na cana-de-açúcar foi afetado pela aplicação de Si na solução. A dose alta de Si aumentou o teor de Si foliar em ambos os cultivares e épocas de avaliação. De acordo com Matchenkov e Calvert (2002), altas produtividades de cana-de-açúcar estão associadas às altas concentrações de Si nas folhas. Arruda (2009) constatou correlação positiva entre teor de Si no solo e produtividade de colmos de cana-de-açúcar em condições de campo em duas regiões do Estado de São Paulo, Guaira e Ariranha. Também os maiores teores de Si no solo proporcionaram maiores teores de Si na folha diagnose (folha +1). Assim, nas áreas onde os teores foliares estavam, em média, em 22 g kg⁻¹, as produtividades médias foram de 160 toneladas de colmos ha⁻¹, enquanto nas áreas onde os teores foliares estavam em 15 g kg⁻¹ as produtividades foram de 128 toneladas ha⁻¹.

Na avaliação aos 25 dias não se observou diferença significativa entre os cultivares. E aos 45 dias na dose alta de Si o cultivar RB85-5035 proporcionou maior teor (10,3 g kg⁻¹) em comparação com o SP81-3250 (7,1 g kg⁻¹). E na dose baixa de Si foi o SP81-3250 (1,3 g kg⁻¹), que proporcionou o maior teor foliar.

Os teores foliares foram similares ao teor considerado crítico (10 g kg⁻¹ Si), estimado para a cana-de-açúcar na folha +1 aos 8 meses de idade, segundo Anderson e Bowen (1992). O valor adequado (>15g kg⁻¹) não foi atingido por nenhum dos cultivares, segundo esse mesmo critério, talvez isso se deva ao fato da idade da planta ser diferente e da impossibilidade de fornecer uma dose maior de silícios as plantas nesse experimento.

Anderson et al. (1991) sugeriram que o nível crítico de silício na matéria seca da folha de cana-de-açúcar seja maior que 1,0% (10 g kg⁻¹). No Havaí, as folhas contendo menos de 0,5% de Si são freqüentemente afetadas por um sintoma denominado “freckling”. A causa deste sintoma é ainda bastante controversa, porém a maioria dos pesquisadores atribui desequilíbrios nutricionais à falta de Si.

Embora os valores obtidos aos 45 dias tenham sido menores que aos 25 dias, apenas o cultivar RB85-5035 tinha teor foliar superior ao valor crítico.

Tabela 13. Teor de Si na folha, no colmo e na raiz de cultivares de cana-de-açúcar submetidas a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 45 dias após a transferência para a solução de crescimento.

Variedade	Dias de cultivo			
	25 dias		45 dias	
	Níveis de Si (mmol L ⁻¹)			
	1,7	0,1	1,7	0,1
	Folha (g kg ⁻¹)			
RB85-5035	11,3aA	2,5aB	10,3aA	0,5bB
SP81-3250	9,3aA	2,0aB	7,1bA	1,3aB
CV(%)*	28,0		11,8	
	Colmo (g kg ⁻¹)			
RB85-5035	6,1bA	1,6aB	6,3aA	0,5aB
SP81-3250	8,7aA	1,9aB	5,4aA	0,8aB
CV(%)	12,7		29,3	
	Raiz (g kg ⁻¹)			
RB85-5035	2,4aA	3,1aA	1,7aA	1,4aB
SP81-3250	2,9aA	2,3bA	1,5aA	1,2aB
CV(%)	21,9		16,2	

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo Teste LSD a 5% de probabilidade.

*CV = coeficiente de variação.

Os teores de Si nas folhas nas duas épocas de amostragem, para ambos os cultivares, foram superiores aqueles encontrados por Rossetto et al. (2005), 0,37 e 0,28 g kg⁻¹ de Si nas folhas dos cultivares RB 85-5035 e SP 81-3250, respectivamente, os mesmos utilizados nesse experimento. As diferenças entre os teores de Si entre esses trabalhos podem estar relacionadas, especialmente, ao ambiente de cultivo diferente e a idade da planta.

Segundo Deren et al. (1993), o cultivares de cana-de-açúcar podem apresentar grande variabilidade genética quanto aos teores de silício nos seus tecidos e ao seu acúmulo, ocorrendo estreita relação entre os teores de Si na folha e os teores no solo. Autores como Korndörfer et al. (1998) e Rodrigues (1997), também verificaram que os teores de Si na folha da cana-de-açúcar é variável entre cultivares.

Acredita-se que um programa de melhoramento direcionado para a seleção de cultivares com altos teores de Si poderia aumentar a resistência da cana-de-açúcar ao tombamento (acamamento) e com isso facilitar a colheita mecanizada (KORNDÖRFER, 2002).

Semelhante ao teor foliar, o teor de Si no colmo da cana-de-açúcar (Tabela 13) também foi afetado pela aplicação de Si. Observou-se que na maior dose de Si, o teor no colmo foi estatisticamente maior em comparação com a menor dose.

Para esta variável só foi observado diferença significativa entre cultivares aos 25 dias na dose de $1,7 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si, em que o SP81-3250 teve maior teor de Si no colmo.

O teor de Si no colmo diminuiu apenas 18% com o passar do tempo para o tratamento com a aplicação da dose alta de Si, em contrapartida, essa queda foi de 65% no tratamento com a dose baixa de Si (Tabela 13).

O teor de Si na raiz (Tabela 13) não foi diferente entre as doses de Si aos 25 dias, mas aos 45 dias a maior dose proporcionou maior teor nas raízes. Como verificado por Yoshida et al. (1962) e Agarie et al. (1998) para a planta de arroz, talvez esse resultado também se deva ao fato da deposição de silício ocorrer principalmente na parte aérea da planta.

Entre os cultivares, apenas na avaliação aos 25 dias observou-se diferença significativa, em que o RB85-5035 proporcionou maior teor de Si na raiz, na menor dose de Si.

6.2.5. Quantidade acumulada de silício na cana-de-açúcar

Diferenças entre as doses de Si foram observadas para todas as variáveis (Tabela 14), tanto na avaliação aos 25 dias quanto aos 45 dias. Para a quantidade acumulada na folha, colmo, parte aérea e total os maiores valores foram encontrados na dose de $1,7 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si. O cultivar RB85-5035 acumulou mais Si na raiz com a dose de $0,1 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si do que com a dose de $1,7 \text{ mmol L}^{-1}$ aos 25 dias, e aos 45 dias não se observou diferença entre as doses.

Na comparação entre cultivares, não houve diferença para a quantidade acumulada de Si na folha na avaliação aos 25 dias. Entretanto aos 45 dias o cultivar RB85-5035 proporcionou 13% a mais de acúmulo em relação ao SP81-3250, dentro da dose alta de Si. Na dose baixa o resultado foi inverso, o SP81-3250 acumulou na folha 69% a mais de Si, em comparação com o RB85-5035.

Tabela 14. Quantidade acumulada de silício na folha, colmo, parte aérea (PA), na raiz (RA) e na planta inteira (PI) de cultivares de cana-de-açúcar submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 45 dias após a transferência para a solução de crescimento.

Variedade	Dias de cultivo			
	25 dias		45 dias	
	Níveis de Si (mmol L ⁻¹)			
	1,7	0,1	1,7	0,1
	Folha (mg planta ⁻¹)			
RB85-5035	50,8aA	13,5aB	106,5aA	4,9bB
SP81-3250	54,4aA	11,4aB	93,0bA	15,6aB
CV(%)*	23,0		11,5	
	Colmo (mg planta ⁻¹)			
RB85-5035	20,0bA	5,9aB	92,9bA	6,9bB
SP81-3250	39,8aA	7,8aB	117,8aA	12,5aB
CV(%)	18,6		7,4	
	PA (mg planta ⁻¹)			
RB85-5035	70,9bA	19,4aB	199,4bA	11,7bB
SP81-3250	94,2aA	19,2aB	210,7aA	28,2aB
CV(%)	17,8		5,7	
	RA (mg planta ⁻¹)			
RB85-5035	3,6bB	4,9aA	7,8aA	6,8aA
SP81-3250	5,9aA	3,9bB	7,8aA	5,4bB
CV(%)	16,8		16,1	
	PI (mg planta ⁻¹)			
RB85-5035	74,5bA	24,3aB	207,2bA	18,5bB
SP81-3250	100,1aA	23,1aB	218,5aA	33,5aB
CV(%)	17,3		7,0	

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo Teste LSD a 5% de probabilidade.

*CV = coeficiente de variação.

Uma avaliação de cultivares feita por Deren et al. (1993) permitiu constatar que existe uma grande variabilidade genética quanto à capacidade das cultivares em acumular Si. De acordo com os resultados encontrados pode-se inferir que as condições de alta e baixa disponibilidade de Si no meio de cultivo e a idade da planta modificam a resposta do cultivar em relação ao acúmulo de Si na folha.

Para a quantidade acumulada no colmo da planta de cana-de-açúcar o cultivar SP81-3250 foi superior ao RB85-5035, 50% na maior dose aos 25 dias, e 21% e 45% respectivamente, na maior e na menor dose de Si aos 45 dias.

A cana-de-açúcar é considerada uma planta acumuladora de Si e possui um enorme potencial de absorção de Si. Mesmo sabendo que as funções do silício na cana-de-açúcar ainda não foram completamente esclarecidas, é certo que o Si desempenha um papel importante na produtividade desta cultura (PREEZ, 1970).

O acúmulo de Si na parte aérea é constituído pela soma dos acúmulos de silício na folha e no colmo, e seguiu a mesma tendência que o ocorrido nessas partes. A diferença entre cultivares seguiu a mesma tendência vista anteriormente para o acúmulo de Si no colmo (Tabela 14).

A quantidade de Si acumulada na raiz foi bem inferior ao acúmulo na parte aérea (Tabela 14). Diferenças significativas foram observadas entre os cultivares, o SP81-3250 aos 25 dias, na dose suficiente de Si teve o maior acúmulo de Si na raiz. E o RB85-5035 teve maior acúmulo na menor dose de Si, tanto aos 25 quanto aos 45 dias.

Para a variável acúmulo de silício total na planta, constituída pela soma das variáveis quantidade acumulada na folha, no colmo e na raiz, observou-se resultado semelhante a variável acúmulo na parte aérea. O cultivar SP81-3250 teve maior acúmulo de silício total em relação ao RB85-5035. Estes aumentos foram 26% na maior dose de Si aos 25 dias, e 5% e 45% na maior e na menor dose de Si, respectivamente, aos 45 dias. Esses resultados são contrários aos encontrados por Rossetto et al. (2005), que constataram que o cultivar RB85-5035 foi, entre os estudados, a que obteve maior acúmulo de Si no tecido vegetal. Talvez, essa contradição se deva ao fato de o ambiente de cultivo e as épocas de avaliação terem sido totalmente diferentes das do presente trabalho.

6.2.6. Eficiência de absorção, eficiência de utilização de silício e relação raiz/parte aérea.

A eficiência de absorção (EA) de Si pela cana-de-açúcar (Tabela 15) mostrou que plantas que receberam dose alta de Si apresentaram maior EA em relação as que receberam menor dose. Entre cultivares apenas na dose baixa de Si, aos 45 dias o SP81-3250 foi mais eficiente na absorção em relação ao RB85-5035.

Plantas que receberam dose baixa de Si apresentaram maior eficiência de utilização (EU) em relação as que receberam maior dose (Tabela 15). Diferença entre

cultivares ocorreu na menor dose de Si, onde o SP81-3250 proporcionou o maior valor de EU aos 25 dias, e o RB85-5035 aos 45 dias. O valor da EU tem como objetivo mostrar qual cultivar é mais eficiente em transformar uma unidade de Si acumulado em massa de matéria seca.

Tabela 15. Eficiência de absorção de Si (EA – Si acumulado na parte aérea/comprimento radicular), eficiência de utilização (EU – massa de matéria seca da parte aérea/Si acumulado na parte aérea) e relação raiz/parte aérea (RA/PA – massa de matéria seca da raiz/massa de matéria seca da parte aérea) de cultivares de cana-de-açúcar submetidos a níveis de silício na solução nutritiva aos 25 e 45 dias após a transferência para a solução de crescimento.

Variedade	Dias de cultivo			
	25 dias		45 dias	
	Níveis de Si (mmol L ⁻¹)			
	1,7	0,1	1,7	0,1
	EA (mg m ⁻¹)			
RB85-5035	1,23aA	0,34aB	1,24aA	0,08bB
SP81-3250	1,36aA	0,37aB	1,17aA	0,20aB
CV(%)*	25,5		10,7	
	EU (g mg ⁻¹)			
RB85-5035	0,11aB	0,47bA	0,13aB	2,43aA
SP81-3250	0,11aB	0,52aA	0,17aB	1,01bA
CV(%)	11,9		22,5	
	RA/PA			
RB85-5035	0,19aA	0,17aA	0,18aA	0,19aA
SP81-3250	0,19aA	0,17aA	0,15bA	0,17aA
CV(%)	13,7		12,1	

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo Teste LSD a 5% de probabilidade.

*CV = coeficiente de variação.

Para a variável relação raiz/parte aérea (RA/PA) não foi encontrada diferença significativa entre as doses de Si (Tabela 15). E entre cultivares, apenas aos 45 dias na dose alta de Si o RB85-5035 proporcionou a maior relação RA/PA em comparação com o SP81-3250.

7. CONCLUSÕES

Arroz:

A maior concentração de Si na solução nutritiva não promoveu, nas condições desse experimento, aumento da massa de matéria seca do arroz.

Sob deficiência de Si o cultivar Maravilha aumenta o crescimento radicular, este fato não se refletiu em maior eficiência de uso do silício.

Ambos cultivares não foram diferentes quanto ao sistema de absorção de alta afinidade, no entanto o cultivar Caiapó teve maior desenvolvimento do sistema de absorção de Si de baixa afinidade em relação ao Maravilha.

Plantas mais velhas possuem taxa de absorção máxima (V_{max}) e K_m menores que plantas mais jovens.

Plantas crescidas sob baixa disponibilidade de Si necessitam de maior valor de C_{min} para absorver Si.

Cana-de-açúcar:

A maior concentração de Si na solução nutritiva não promoveu, nas condições desse experimento, aumento da massa de matéria seca da cana-de-açúcar.

Ambos cultivares não foram diferentes quanto ao sistema de absorção de alta afinidade, no entanto o cultivar RB85-5035 teve maior desenvolvimento do sistema de absorção de Si de baixa afinidade em relação a SP81-3250, promovendo maior teor de Si nas folhas.

Plantas mais velhas possuem taxa de absorção máxima (V_{max}) e K_m menores que plantas mais jovens.

A avaliação das diferenças entre cultivares de arroz e cana-de-açúcar quanto a eficiência de absorção e utilização de Si, em solução nutritiva, pode ter sido limitada pela dose máxima utilizada, uma vez que valores acima de $2,0 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si acarretam precipitação.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARIE, S. et al. Effects of silicon on tolerance to water deficit and heat stress in rice plants (*Oryza sativa L.*), monitored by electrolyte leakage. **Plant Production Science**, Japão, v. 1, p. 96-103, 1998.

ALVAREZ, A. C. C. **Produção de arroz em função da adubação com silício e nitrogênio no sistema de sequeiro e irrigado por aspersão**. 2004. 70 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura)–Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2004.

ALVES, V. M. C. et al. Efeito do alumínio sobre a absorção e translocação de fósforo e sobre a composição mineral de duas cultivares de trigo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 23, p. 563-573, 1988.

ALVES, V. M. C. et al. Cinética de absorção de fósforo e crescimento do sistema radicular de genótipos de milho contrastantes para eficiência a fósforo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete lagoas, v. 1, p. 85-92, 2002.

ANDERSON, D. L.; SNYDER, G. H. Response of sugarcane ratoons to silicate slag on everglades histosols. **Agronomy Journal**, Madison, v. 82, 1990.

ANDERSON, D. L.; SNYDER, G. H.; MARTIN, F. G. Multi-year response of sugarcane to calcium silicate slag on Everglade Histosols. **Agronomy Journal**, Madison, v. 83, p. 870-874. 1991.

ANDERSON, D. L.; BOWEN, J. E. **Nutrição da cana-de-açúcar**. Piracicaba: POTAFÓS, 1992. 40 p.

ANGHINONI, I. et al. Morfologia de raízes e cinética da absorção de nutrientes em diversas espécies e genótipos de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, p. 355-361, 1989.

ARRUDA, D. P. de. **Avaliação de extratores químicos na determinação de silício disponível em solos cultivados com cana-de-açúcar**. 2009. 78 f. (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2009.

AYRES, A. S. Calcium silicate slag as a growth stimulant for sugarcane on low-silicon soils. **Soil Science**, Philadelphia, USA, v. 101, n. 3, p. 216- 227, 1966.

BAIR, R.A. Leaf silicon in sugarcane, field corn and *St. Augustinegrass* grown on some Florida Soils. **Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings**, v. 26, p. 63-70, 1966.

BALASTRA, M. L. F. et al. Effects of sílica level on some properties of *Oriza sativa* straw and hult. **Canadian Journal Botany**, Guelph, CA, v. 67, p. 2356-63, 1989.

BALL-COELHO, B. et al. Root dynamics in plant and ratoon crops of sugarcane. **Plant and Soil**, v. 142, p. 297-305, 1992.

BARBER, S. A. Mecanismos de absorção de potássio por plantas no solo. In: YAMADA, T. (Ed). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, Londrina: Fundação IAPAR, 1982. p. 213-226.

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

BARBOSA FILHO, M. P. **Nutrição e adubação do arroz**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. 127 p.

BARBOSA FILHO, M. P. et al. Resposta do arroz de sequeiro à aplicação de silício. In: FERTBIO, REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 23; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 7; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 5; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 2; 1998, Caxambu. **Anais...** Lavras: Universidade Federal de Lavras, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Sociedade Brasileira de Microbiologia, 1998. p. 57.

BARBOSA FILHO, M. P. et al. Silicato de cálcio como fonte de silício para o arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 25, p. 325-30, 2001.

BASSIRIRAD, H. Kinetics of nutrient uptake by roots: responses to global change (review). **New Phytologist**, Lancaster, UK, v. 147, p. 155-169, 2000.

BORGES, E. A. et al. Cinética de absorção de amônio e efluxo de prótons em variedades de milho. **Semina: ciências agrárias**, Londrina, v. 30, n. 3, p. 513-526, 2009.

BRESEGHELLO, F.; CASTRO, E. M.; MORAIS, O. P. Cultivares de arroz. In: BRESEGHELLO, F.; STONE, L. F. **Tecnologia para arroz de terras altas**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1998, p. 41-53.

CARVALHO, J. C. **Análise de crescimento e produção de grãos da cultura do arroz irrigado por aspersão em função da aplicação de escórias de siderurgia como fonte de silício**. 2000. 119 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.

CASAGRANDE, J. C.; ZAMBELLO, E.; ORLANDO FILHO, J. Aplicação de silício em cana-de-açúcar no estado de São Paulo. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v. 98, n. 1, p. 54-60, 1981.

CHEN, J.; GABELMAN, W. H. Morphological and physiological characteristics of tomato roots associated with potassium-acquisition efficiency. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 83, p. 213-225, 2000.

CLAASSEN, N.; BARBER, S. A. A method for characterizing the relation between nutrient

concentration and flux into roots of intact plants. **Plant Physiology**, Rockville, v. 54, p. 564-568, 1974.

CLARKSON, D. T. Factors affecting mineral nutrient acquisition by plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Boca Raton, v. 36, p. 77-115, 1985.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – Avaliação da Safra Agrícola de Cana-de-açúcar. Brasília, DF, 2010 (a). Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/344b55c90f6d37e3beca41418e5df0e5..pdf>>. Acesso em: 19 ago. 2010.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos 2009/2010. Brasília, DF, 2010 (b). Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/8218897d1eb5849906fc53856bdbc894..pdf>>. Acesso em: 19 ago. 2010.

COOPERATIVA DOS PLANTADORES DE CANA DA ZONA DE GUARIBA. Variedades de Cana-de-açúcar. Guariba, SP. Disponível em: <<http://www.coplana.com/>>. Acesso em: 31 mar. 2008.

CUNHA, C. A. H.; MACHADO, R. E.; COELHO, R. D. Irrigação da cana-de-açúcar: análise econômica. **STAB**, Piracicaba, v. 19, n. 4, 2001.

DATNOFF, L. E. et al. Effect of calcium silicate on blast and brown spot intensities and yield of rice. **Plant Disease**, St. Paul, v. 74, p. 729-732, 1991.

DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. 403 p.

DEREN, C. W. et al. Silicon concentration, disease response, and yield components of rice genotypes grown on flooded organic histosols. **Crop Science**, Madison, WI, v. 34, p. 733-37, 1994.

DEREN, C. W.; GLAZ, B.; SNYDER, G. H. Leaf-tissue silicon content of sugarcane genotypes grown on Everglades Histosols. **Journal of Plant Nutrition**, Monticello, NY, v. 16, n. 11, p. 2273-2280, 1993.

DIONÍSIO, J. A. et al. Efeito da idade da planta sobre a cinética de absorção do potássio na cultura do milho (*Zea mays* L.). **Agropecuária Técnica**. João Pessoa, v. 6, n. 2, 1985.

DUNCAN, R. R.; BALIGAR, V. C. Genetics, breeding and physiological mechanisms of nutrient uptake and use efficiency: an overview. In: BALIGAR, V. C.; DUNCAN, R. R. **Crops as enhancers of nutrient use**. San Diego: Academic Press, 1990. p. 3-35.

EDWARDS, J. H.; BARBER, S. A. Nitrogen flux into corn roots as influenced by shoot requirement. **Agronomy Journal**, Madison, v. 68, p. 471-473, 1976.

ELAWAD, S. H.; GASCHO, G. J.; STREET, J. J. Response of sugarcane to silicate source and rate .I. Growth and Yield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, p. 481-484, 1982.

ELLIOT, C. L.; SNYDER, G. H. Autoclave-induced digestion for the colorimetric determination of silicon in rice straw. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Davis, v. 39, p. 1118-9, 1991.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão. **Arroz de terras altas**. Santo Antonio de Goiás, 2001. Folder.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Cana-de-açúcar. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_42_1110200717570.Html>. Acesso em: 28 maio 2010.

EPSTEIN, E., HAGEN, C. E. A kinetic study of the absorption of alkali cations by barley roots. **Plant Physiology**, Rockville, v. 27, p. 457-474, 1952.

EPSTEIN, E.; RAINS, D. W.; ELZAM, O. E. Resolution of dual mechanisms of potassium absorption by barley roots. **Proceedings of National Academic Science**, Washington, v. 49, p. 684-692, 1963.

EPSTEIN, E.; RAINS, D. W. Carrier-mediated cation transport in barley roots: kinetic evidence for a spectrum of active sites. **Proceedings of National Academy of Science**, Washington, v. 53, p. 1320-1324, 1965.

EPSTEIN, E. **Nutrição mineral das plantas**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos,

1975. p. 88-125.

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

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

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

EPSTEIN, E.; JEFFERIES, R. L. The genetic basis of selective ion transport in plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Boca Raton, v.15, p.162-184, 1984.

EXLEY, C. Silicon in life: a bioinorganic solution to bioorganic essentiality. **Journal Inorganic Biochemistry**, v.69, p.139-44, 1998.

FAGERIA, N. K. Uptake of potassium by Rice plants at different stages of growth. **Biologia Plantarum**, Avenel, v. 18, n. 1, p. 67-71, 1976.

FAQUIN, V.; MALAVOLTA, E.; MURAOKA, T. Cinética da absorção de fosfato em soja sob influência de micorriza vesículo-arbuscular. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, p. 41-48, 1990.

FARIA, R. J. de. **Influência do silicato de cálcio na tolerância do arroz de sequeiro ao déficit hídrico do solo**. 2000. 47 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)- Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.

FERREIRA, D. F. **Manual do sistema sisvar para análise estatística**. Lavras: UFLA, 2000. 63 p.

FOX, R. L.; SILVA, J. A. Symptoms of plant malnutrition: silicon, and agronomically essential nutrient for sugarcane. In: **Illustrated concepts in tropical agriculture**. Honolulu, University of Hawaii, College of Tropical Agriculture and Human Resources, n. 8, 1978.

FRANCO, C. J. F.; KORNDÖRFER, G. H. Aplicação de silício (Si) em cana-de-açúcar: uma alternativa para melhorar características químicas de solos de cerrado. In: SEMANA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, 2, 1995, Uberlândia. Resumos...Uberlândia, 1995.

FURLANI, A. M. C. Variações em parâmetros de cinética de absorção de fósforo de três linhagens de arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, p. 77-80, 1988.

FURLANI, A. M. C.; FURLANI, P. R. **Composição e pH de soluções nutritivas para estudos fisiológicos e seleção de plantas em condições nutricionais adversas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1988. 34p. (Boletim técnico, 121).

GLASS, A. D. M. Ion absorption and utilization: the cellular level. In: BALIGAR, V. C.; DUNCAN, R. R. (Ed.). **Crops as enhancers of nutrient use**. San Diego: Academic Press, 1990. p. 41-64.

GONÇALVES, J. S.; VEIGA FILHO, A. A. Açúcar e álcool. **Prognóstico Agrícola**, São Paulo, v. 2, n. 2, p. 141-150, 1998.

GRESPLAN, S. L.; DIAS, L. E.; NOVAIS, R. F. Crescimento e parâmetros cinéticos de absorção de amônio e nitrato por mudas de Eucalyptus spp submetidas a diferentes relações amônio/nitrato na presença e ausência de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 22, p. 667-674, 1998.

HACKETT, C. A study of the root system of barley: I effects of nutrition on two varieties. **New Phytologist**, Lancaster, UK, v. 67, p. 287-299, 1968.

HUMBERT, R. P. **The growing of sugarcane**. Elsevier: New York, 1968, p. 1-55.

HORIGUCHI, T. Mechanism of manganese toxicity and tolerance of plants. IV. Effects of silicon on alleviation of manganese toxicity of rice plants. **Soil Science Plant Nutrition**, v. 34, p. 65-73, 1988.

HOSSAIN, K. A.; HORIUCHI, T.; MIYAGAWA, S. Effects of silicate materials on growth and grain yield of rice plants grown in clay loam and sandy loam soils. **Journal of Plant Nutrition**, Monticello, NY, v. 24, p. 1-13, 2001.

KIDDER, G.; GASCHO, G. J. **Silicate slag recommended for specified conditions in Florida sugarcane**. Florida Cooperative Extension Service, University of Florida, 1977, (Agronomy facts n. 65).

KOCHIAN, L. E. Molecular physiology of mineral nutrient acquisition, transport and utilization. In: BUCHANAN, B. B.; GRUISSEM, W. ; JONES, R. L. (Eds.). **Biochemistry and Molecular Biology of plants**. Maryland: American Society of Plant Physiologists, 2000. p. 1204-1247, 2000.

KORNDÖRFER G. H.; DATNOFF L. E. Adubação com silício: uma alternativa no controle de doenças da cana-de-açúcar e do arroz. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v. 70, p. 1-5, jun. 1995.

KORNDÖRFER G. H.; DATNOFF L. E. Efeito do silício no crescimento e produtividade das culturas. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, mai, 2000.

KORNDÖRFER, G. H.; COLOMBO, C. A.; RODRIGUES, L. L. **Effect of thermo-phosphate as silicon source for sugarcane**. In: Inter-American Sugar Cane Seminar, 1998, Miami, FL. Anais... 1998. p. 9-11.

KORNDÖRFER, G. H. et al. Avaliação de métodos de extração de silício em solos cultivados com arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 23, n. 1, p. 101-106. 1999.

KORNDÖRFER, G. H. et al. Calibration of soil and plant silicon analysis for rice production. **Journal of Plant Nutrition**, Monticello, NY, v. 24, n. 7, p. 1071-1084, 2001.

KORNDÖRFER, G. H.; LEPSCH, I. Effect of silicon on plant growth and yield. In: DATNOFF, L. E.; KORNDÖRFER, G. H.; SNYDER, G. H. **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001, p. 1.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. Papel do silício na produção da cana-de-açúcar. **Revista STAB**, Piracicaba, SP, v. 21, n. 1, p. 6-9, nov./dez. 2002.

LIANG, Y. C. et al. Silicon availability and response of rice and wheat to silicon in calcareous soils. **Communication Soil Science Plant Anal**, v. 25, p. 2285-2297, 1994.

- LIMA FILHO, O. F. de.; LIMA, M. T. G. de.; TSAI, S. M. O silício na agricultura. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 87, p. 1-7, 1999. (Encarte técnico).
- 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, oct. 2004.
- MA, J. F.; TAKAHASHI, E. **Soil, fertilizer and plant silicon research in Japan**. Amsterdam: Elsevier Science, 2002.
- MACHADO, C. T. de T.; FURLANI, A. M. C. Kinetics of phosphorus uptake and root morphology of local and improved varieties of maize. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n. 1, feb. 2004 .
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição de plantas**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1980. 251 p.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 2006. 638 p.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic Press, 1986. 647 p.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.
- MARTINEZ, H. E. P. et al. Comportamento de variedades de soja cultivadas em diferentes doses de fósforo: I. Cinética de absorção de fósforo e ajustes morfológicos da planta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, p. 231-238, 1993.
- MATCHENKOV, V. V.; CALVERT, D. V. Silicon as a beneficial element for sugarcane. **Journal American Society of Sugarcane Technologists**. v. 22, p. 21. 2002.
- MATIAS, G. C. S.; COMETTI, N. N.; FERNANDES, M. S. Cinética de absorção de nutrientes por alface em hidroponia-NFT – com duas concentrações da solução nutritiva. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Botucatu: SBCS, 2003.(CD-ROM).

MAUAD, M. **Desenvolvimento e marcha de absorção de silício em plantas de arroz sob condições de déficit hídrico e adubação silicatada.** 2006. 107 f. (Doutorado em Agronomia/Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

MAUAD, M. et al. Teores de Silício no Solo e na Planta de Arroz de Terras Altas com Diferentes Doses de Adubação Silicatada e Nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 27, p. 867-873, 2003.

MAUAD, M. **Produção de plantas de arroz sob a ação de silício e nitrogênio.** 2001. 79 f. (Mestrado em Agronomia/Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

MENZIES, J.G. et al. Effects of solution on the parasitic fitness of *Sphaerotheca fuliginea* on *Cucumis sativa*. **Phytopathology**, v. 81, p. 84-88, 1991.

MORAES, M. A. F. D. **A desregulamentação do setor sucroalcooleiro do Brasil.** Americana: Caminho, 2000, 238 p.

NIELSEN, N. E.; BARBER, S. A. Differences among genotypes of corn in the kinetics of P uptake. **Agronomy Journal**, Madison, v. 70, p. 695-698, 1978.

OKUDA, A.; TAKAHASHI, E. Studies on the physiological role of silicon in crop plant: part 8 some examination on the specific behavior of low land rice in silicon uptake. **Japanese Journal of Soil Science and Manure**, v. 33, p. 217-221. 1962.

PETRY, C. et al. Influência do estresse de alumínio em plantas de fumo: II. Efeito nos parâmetros cinéticos de absorção de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, p. 69-72, 1994.

PLUCKNETT, D. L. **The use of soluble silicates in Hawaiian agriculture.** University of Queensland, Hawaii, v. 1, n. 6, p. 203-223, 1971. (Papers)

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. Calcário e escória de siderurgia avaliados por análise foliar, acúmulo, e exportação de macronutrientes em cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 1, p. 129-135, 2002.

PREEZ, P. The effect of silica on cane growth. In: THE SOUTH AFRICAN SUGAR TECHNOLOGISTS'S ASSOCIATION. **Proceedings...** p.183-188, 1970.

RAIJ, B.van.; CAMARGO, O. A. Sílica solúvel em solos. **Bragantia**, Campinas, v. 32, p. 223-31, 1973.

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

RODRIGUES, F. A.; CORRÊA, G. F.; SANTOS, M. A. Fatores envolvidos na supressividade e rhizoctonia solani em alguns solos tropicais brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 22, p. 239-246, 1997.

ROSS, L.; NABABSING, P.; WONG YOU CHEONG, Y. Residual effect of calcium silicate applied to sugarcane soils. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS 15, Durban, **Proceedings...** v. 15, n. 2, p. 539-542, 1974.

ROSSETTO, R. et al. Silicon content in different sugarcane varieties. In: SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 3, 2005, Uberlândia. **Proceedings...** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2005. p. 134.

RUIZ, H. A.; FERNANDES FILHO, E. I. Cinética: software para estimar as constantes V_{max} e K_m da equação de Michaelis-Menten. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20, 1992, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SBCS, 1992. p. 124-125.

SACRAMENTO, L. V. S. do et al. Absorção de magnésio por raízes destacadas de cultivares de tomateiro. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 56, n. 3, p. 509-515, jul. 1999.

SACRAMENTO, L. V.; ROSOLEM, C. A. Cinética de absorção de potássio e seus ajustes em plantas de soja em função da idade e estado nutricional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, p. 213-219, 1997.

SACRAMENTO, L. V. S. do. **Cinética da absorção de potássio em quatro variedades de soja (Glycine max (L.) Merrill) em três épocas de crescimento**. 1994. 79 f. Dissertação

(Mestrado em Agronomia/Agricultura)-Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1994.

SANTOS, G. R. et al. Adubação com silício: influência sobre as principais doenças e sobre a produtividade do arroz por inundação. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 50, p. 1-8, 2003.

SAVANT, N. K.; DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H. Depletion of plant-available silicon in soils: a possible cause of declining rice yields. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 28, p. 1245-1252, 1997.

SCHENK, M. K.; BARBER, S. A. Phosphate uptake by corn as affected by soil characteristics and root morphology. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 43, p. 880-883, 1979a.

SCHENK, M.K.; BARBER, S.A. Root characteristics of corn genotypes as related to P uptake. **Agronomy Journal**, Madison, v. 71, p. 921-924, 1979b.

SCHENK, M. K.; BARBER, S. A. Potassium and phosphorus uptake by corn genotypes grown in the field as influenced by root characteristics. **Plant and Soil**, v.5 4, p. 65-76, 1980.

SILVEIRA JUNIOR, E. G. et al. Silicato de cálcio e calcário na produção e qualidade da cana-de-açúcar – Usina Catanduva. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO 29, 2003. Ribeirão Preto, **Resumo expandido...** Ribeirão Preto, 2003, p.66.

SNYDER, G. H. **Development of silicon soil test for Histosol-grown rice**. Belle Glade: University of Florida, 1991.

SNYDER, G. H.; JONES, D. B.; GASCHO, G. J. Silicon fertilization of rice on Everglades Histosols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 1259-1263, 1986.

STEFANUTTI, R. **Eficiência da absorção e utilização de fósforo e zinco por variedades de arroz**. 1997. 93 f. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura)-Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of silica. In: MATUSUO, T. et al. **Science of rice plant physiology**. Tokio: Nobunkyo, 1995, v. 2, chap. 5, p. 420-433.

TAMAI, K.; MA, J. E. Characterization of silicon uptake by rice roots. **New Phytologist**, Lancaster, UK, v. 158, p. 431-436, 2003.

TANAKA, A.; PARK, Y.D. Significance of the absorption and distribution of silica in the growth of rice plant. **Soil Science Plant Nutrition**, v. 12, p. 23-8, 1966.

TENNANT, D. A test of a modified line intercept method of estimating root length. **Journal Ecology Applied**, London, v. 63, p. 995-1001, 1975.

TISDALE, S. L. et al. **Soil fertility and fertilizer**. New York: Macmillan, 1993. 634 p.

VASCONSELOS, A. C. M. et al. Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar por diferentes métodos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 27, p. 849-858, 2003.

VASCONSELOS, A. C. M. Diagnósticos de fatores físicos do solo associados ao desenvolvimento radicular e à produtividade da cana-de-açúcar. In: SEMINÁRIO DE MECANIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR 7, 2005. **CD-ROM**, Ribeirão Preto, 2005.

VERMAS, T. S.; MINHAS, R. S. Effect of iron and manganese interaction on paddy yield and iron and manganese nutrition in silicon-treated and untreated soil. **Soil Science**, Philadelphia, USA, v. 147, p. 107-15, 1989.

VILELA, L.; ANGHINONI, I. Morfologia do sistema radicular e cinética da absorção de fósforo em cultivares de soja afetados pela interação alumínio-fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 8, p. 91-96, 1984.

WALLACE, A. Participation of silicon in cation-anion balance as a possible mechanism for aluminum and iron tolerance in some gramineae. **Journal Plant Nutrition**, New York, v. 15, p. 1345-51, 1992.

WANG, M. Y. et. al. Ammonium uptake by rice roots. II. Kinetics of $^{13}\text{NH}_4^+$ influx across the plasmalemma. **Plant Physiology**, Rockville, v. 103, n. 1, p. 1259-1267, 1993.

WARNCKE, D.D. & BARBER, S.A. Root development and nutrient uptake by corn grown in solution culture. **Agronomy Journal**, Madison, v. 66, p. 514-516, 1974.

WIRÉN, N. et al. The molecular physiology of ammonium uptake and retrieval. **Current Opinion in Plant Biology**, Oxford, v. 3, n. 3, p. 254-261, 2000.

WINSLOW, M. D. Silicon, disease resistance, and yield of rice genotypes under upland cultural conditions. **Crop Science**, Madison, v. 32, p. 1208-13, 1992.

YOSHIDA, S.; OHNISHI, Y.; KITAGISHI, K. Chemical forms mobility and deposition of silicon in rice plant. **Soil Science Plant Nutrition**, v. 8, p. 15-21, 1962.

YOSHIDA, S.; NAVESER, S. A.; RAMIREZ, E. A. Effects of silica and nitrogen supply on some leaf characters of rice plant. **Plant Soil**, Amsterdam, v. 31, p. 48-56, 1969.