

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

**RELAÇÃO ENTRE SILÍCIO E DEFICIÊNCIA HÍDRICA SOBRE OS
ASPECTOS BIOQUÍMICOS E FISIOLÓGICOS NO ARROZ**

ADRIANA LIMA MORO

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, como requisito para obtenção do título de Doutora em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU - SP

Dezembro - 2012

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

**RELAÇÃO ENTRE SILÍCIO E DEFICIÊNCIA HÍDRICA SOBRE OS
ASPECTOS BIOQUÍMICOS E FISIOLÓGICOS NO ARROZ**

ADRIANA LIMA MORO
Bióloga

Orientador: Prof. Dr. Fernando Broetto

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, como requisito para obtenção do título de Doutora em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU - SP
Dezembro - 2012

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

M867r Moro, Adriana Lima, 1982-
Relação entre silício e deficiência hídrica sobre aspectos bioquímicos e fisiológicos no arroz / Adriana Lima Moro. - Botucatu : [s.n.], 2012
v, 130 f. : grafs., tabs., fots. color.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2012

Orientador: Fernando Broetto

Inclui bibliografia

1. Arroz - Adubação. 2. Desidratação (Hídrica). 3. Silicato de cálcio. 4. Bioquímica. I. Broetto, Fernando. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "RELAÇÃO ENTRE SILÍCIO E DEFICIÊNCIA HÍDRICA SOBRE ASPECTOS BIOQUÍMICOS E FISIOLÓGICOS NO ARROZ"

ALUNA: ADRIANA LIMA MORO

ORIENTADOR: PROF. DR. FERNANDO BROETTO


Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. FERNANDO BROETTO



PROF. DR. ROBERTO LYRA VILLAS BOAS



PROF. DR. ANTONIO EVALDO KLAR



PROF. DR. LUIZ ANTONIO GALLO



PROF^a DR^a ANA CLÁUDIA PACHECO SANTOS

Data da Realização: 19 de dezembro de 2012.

AGRADECIMENTO

Á Deus, autor de tudo e todos que por Ele e para Ele todas as coisas foram feitas.

Á Nossa Senhora por estar sempre comigo e me ajudando sempre que a Ela recorro, a ti todo o meu amor.

Aos meus pais, por todo o sacrifício e confiança a mim depositada.

Ao meu esposo Edemar Moro, por seu amor e paciência. Essa vitória também é sua. Obrigada por tudo!

Ao meu orientador Fernando Broetto, por toda a ajuda, orientação e por ter me entendido durante todo esse tempo mesmo com todos os contra tempos. Sou eternamente grata.

Aos meus filhos Catarina e Davi, meu amor maior, e mesmo sem entenderem me deram todo o apoio necessário para essa conquista. A mamãe ama muito vocês.

A todo o corpo docente e em geral a Faculdade de Ciência Agronômica – UNESP, minha formação e capacidade foram construídas por vocês, muito obrigada.

Aos amigos conquistados nesta cidade, guardarei para sempre no meu coração.

E a Botucatu que aprendi a amar, me acolheu e onde minha filha nasceu.

SUMÁRIO

1. RESUMO.....	1
2. SUMMARY.....	2
3. INTRODUÇÃO.....	3
4. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
4.1. ARROZ.....	5
4.1.1. Arroz cv. IAC 202.....	8
4.1.2. Arroz cv. BRSMG Curinga.....	9
4.2. SILÍCIO.....	11
4.2.1. Silício na planta.....	12
4.3. MANEJO DO N NA CULTURA DO ARROZ DE TERRAS ALTAS.....	17
4.4. DEFICIÊNCIA HÍDRICA.....	19
4.5. Pigmentos.....	22
4.5.1. Clorofilas <i>a</i> e <i>b</i>	22
4.5.2. Carotenóides.....	24
4.6. ATIVIDADES METABÓLICAS.....	25
4.6.1. Espécies Reativas de Oxigênio (ERO).....	25
4.6.2. Atividade enzimática.....	27
4.6.3. Superóxido Dismutase (EC 1.15.1.1).....	29
4.6.4. Catalase (EC 1.11.1.6).....	30
4.6.5. Ascorbato Peroxidase (EC 1.1.11.1).....	31
4.6.6. Peroxidase (EC 1.11.1.7).....	32
4.6.7. Nitrato Redutase.....	34
4.7. PARÂMETROS FISIOLÓGICOS.....	35
4.7.1. Conteúdo relativo de água (CRA).....	35
4.7.2. Deficiência hídrica e Trocas gasosas.....	36
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	39
5.1. Localização do experimento.....	39
5.2. Delineamento experimental.....	39
5.3. Instalação e condução do experimento.....	39
5.4. Avaliações biométricas.....	41
5.4.1. Matéria seca da parte área.....	41
5.4.2. Altura de plantas.....	41
5.5. Teor de silício na planta.....	42
5.6. Parâmetros bioquímicos.....	43
5.6.1. Análise de Pigmentos.....	43
5.6.2. Atividade enzimática.....	43

5.6.2.1. Superóxido dismutase (E.C. 1.15.1.1).....	44
5.6.2.2. Catalase (E.C. 1.11.1.6).....	44
5.6.2.3. Peroxidase (EC 1.11.1.7).....	45
5.6.2.4. Ascorbato Peroxidase (E.C. 1.11.1.11).....	45
5.6.2.5. Nitrato Redutase.....	45
5.7. Parâmetros fisiológicos.....	46
5.7.1. Conteúdo Relativo de água.....	46
5.7.2. Medidas de trocas gasosas.....	47
5.8. Produção de grãos.....	47
5.9. Análise estatística.....	48
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
6.1. ANÁLISES BIOMÉTRICAS.....	49
6.1.1. Matéria seca da parte aérea.....	49
6.1.2. Altura de plantas.....	51
6.2. TEOR DE Si.....	52
6.3. PARÂMETROS BIOQUÍMICOS.....	54
6.3.1. Clorofila <i>a</i>	54
6.3.2. Clorofila <i>b</i>	56
6.3.3. Carotenóides.....	59
6.3.4. Superóxido dismutase (E.C. 1.15.1.1).....	61
6.3.5. Catalase (E.C. 1.11.1.6).....	63
6.3.6. Peroxidase (EC 1.11.1.7).....	65
6.3.7. Ascorbato Peroxidase (E.C. 1.11.1.11).....	67
6.3.8. Nitrato Redutase.....	69
6.4. ANÁLISES FISIOLÓGICAS.....	71
6.4.1. Conteúdo Relativo de água.....	71
6.4.2. Taxa de assimilação de CO ₂	73
6.4.3. Condutância estomática (<i>g</i>).....	77
6.4.4. Transpiração (<i>E</i>).....	79
6.5. PRODUÇÃO DE GRÃOS.....	82
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	84
8. CONCLUSÕES.....	85
9. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	86
10. ANEXOS.....	116

1. RESUMO

O cultivo de arroz de terras altas vem se expandindo no país. Estudos de mecanismo bioquímicos e fisiológicos ajudam a esclarecer o sistema de defesa das plantas no período de seca. O silício é um nutriente que pode proporcionar melhor desenvolvimento às plantas de arroz cultivadas em ambientes com deficiência hídrica. Este elemento diminui as perdas de água por transpiração e também há relatos em que se correlaciona com o aumento de enzimas antioxidantes. O objetivo deste trabalho foi estudar a relação entre deficiência hídrica e o efeito do silício nos mecanismos antioxidantes e na produtividade da cultura do arroz de dois cultivares IAC 202 e Curinga. O delineamento experimental foi em blocos casualizados em esquema fatorial 4 x 2, com quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos por quatro potenciais mátricos de água no solo (-10, -30, -50 e -70 kPa) combinadas com dois corretivos da acidez do solo (calcário dolomítico e silicato de cálcio e magnésio). A aplicação de silício promoveu aumento na altura de planta em ambos os cultivares com deficiência hídrica mais severa. A cultivar IAC 202 apresentou maiores valores de conteúdo relativo de água, taxa de assimilação de CO₂, condutância estomática e transpiração. Com deficiência hídrica mais intensa, os parâmetros fisiológicos e a atividade da superóxido dismutase aumentaram com a aplicação de silício. O silício resultou em maior produtividade em ambos os cultivares em todos os tratamentos.

Palavras chaves: deficiência hídrica, silicato de cálcio, atividade enzimática.

RELATIONSHIP BETWEEN SILICON AND WATER STRESS ON BIOCHEMICAL AND PHYSIOLOGICAL ASPECTS IN RICE. Botucatu, 2012, 130p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: ADRIANA LIMA MORO

Adviser: FERNANDO BROETTO

2. SUMMARY

The cultivation of upland rice has been expanding in the country. Studies of physiological and biochemical mechanisms help to clarify the defense system of plants during the dry season. Silicon is a nutrient that can provide better development of rice plants grown in environments with water deficiency. This element reduces water loss through transpiration and there are also reports that correlates with increased antioxidant enzymes. The objective of this work was study the relationship between water deficiency and the effect of silicon in oxidation mechanism and rice yield. The experimental design was a randomized block in 4 x 2 factorial with four replications. The treatments consisted of four matric potentials of soil water (-10, -30, -50 and -70 kPa) combined with two corrective soil acidity (lime and calcium silicate and magnesium). Silicon application increased the plant height in both cultivars with more severe water stress. IAC 202 had higher relative water content, CO₂ assimilation rate, stomatal conductance and transpiration. With more intense water stress, physiological parameters and superoxide dismutase activity increased with the application of silicon. The silicon resulted in higher productivity in both cultivars in all treatments.

Keywords: water deficiency, calcium silicate, enzymatic activity.

3. INTRODUÇÃO

Entre as culturas anuais, o arroz é a mais importante no mundo, pois constitui a dieta básica de mais de 50% da população mundial (FAGERIA, 2004). A importância da cultura do arroz para o Brasil, juntamente com a do feijão, já é bastante conhecida e aumenta à medida que cresce o contingente populacional brasileiro.

O arroz no Brasil é cultivado em dois ecossistemas de produção denominados terras altas e várzeas, sob diferentes sistemas de cultivo. O ecossistema de terras altas, que engloba o sistema de produção sem uso de irrigação, é o mais difundido territorialmente. Esse sistema correspondeu a 65,4% da área total cultivada com arroz no Brasil e contribuiu com 38,8% da produção nacional (FERREIRA; VILLAR, 2004). Uma das causas dessa baixa produtividade é o déficit hídrico causado pela irregularidade pluvial na época de cultivo.

Os cultivares de sequeiro ou terras altas diferenciam-se dos irrigados principalmente por apresentarem maior tolerância à seca. Para isso, possuem um sistema radicular extenso para explorar a umidade do solo em maior profundidade, e uma menor área foliar exposta à atmosfera para minimizar as perdas de água (SARTORI, 1996)

A identificação e a compreensão dos mecanismos de tolerância a seca são fundamentais na busca por genótipos de arroz de terras altas tolerantes à deficiência hídrica ou mesmo técnicas que aumentem essa tolerância, de forma a alcançar maior estabilidade da produtividade em áreas de maior risco (LANA et al, 2012).

Plantas, submetidas a deficiência hídrica, apresentam redução na porcentagem de germinação e no crescimento das plântulas, acúmulo de aminoácidos,

principalmente da prolina e redução no conteúdo de amido, redução da taxa fotossintética, redução na atividade enzimática e alteração na absorção e na translocação de nutrientes minerais. A deficiência de água pode afetar, ainda, a eficiência do processo fotossintético.

As plantas sofrem alterações no seu metabolismo quando mantidas sob condições ambientais adversas. Os tecidos vegetais são dotados de diferentes sistemas de resposta para o controle da produção de radicais livres. As enzimas e compostos orgânicos formados em situação de estresse ambiental, podem ser determinados e respondem também de forma específica conforme o envolvimento de reações metabólicas que se façam necessárias.

As plantas são dotadas com um sistema efetivo para controlar a ação deletéria de radicais livres. Em várias espécies vegetais observou-se uma expressão geral da atividade de algumas enzimas como a superóxido dismutase (SOD), a ascorbato peroxidase (APX), a catalase (CAT), a peroxidase (POD) e a nitrato redutase (NR).

Outro aspecto importante que merece destaque é a relação estresse hídrico x plantas nutridas com silício. Plantas nutridas com este elemento apresentam folhas mais eretas, melhorando a taxa fotossintética e com menor perda de água por transpiração. Na cultura do arroz, o fornecimento de silício proporciona: aumento da massa individual das sementes, no número de grãos e panículas e conseqüentemente no aumento da produtividade.

Estudos mostram que a aplicação de silício do ponto de vista fisiológico sua absorção traz inúmeros benefícios, principalmente ao arroz que é classificada como planta acumuladora deste elemento. Portanto, a adubação silicatada pode ser uma prática promissora para a cultura do arroz.

Em vista das informações acima descritas, a hipótese do trabalho foi verificar se a aplicação de silício em plantas de arroz submetidas à deficiência hídrica influencia o metabolismo bioquímico, fotossintético e agrônômico. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo estudar a relação entre deficiência hídrica e o efeito das doses de silício nos mecanismos antioxidantes e na produtividade da cultura do arroz.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1. Arroz

O arroz (*Oryza sativa* L.) está entre os cereais mais importantes do mundo. No Brasil, assume papel de destaque por constituir fonte importante de calorias e de proteínas na dieta alimentar da população. O arroz é um alimento básico para cerca de 2,4 bilhões de pessoas no mundo e, segundo estimativas até 2050, a produção mundial deverá ser dobrada para atender a demanda mundial (GUIMARÃES et al, 2006).

Em 2011 a safra de arroz atingiu 13,5 milhões de toneladas, um aumento de 19% em relação a 2010. O rendimento aumentou 17% no período. O Rio Grande do Sul aumentou a área plantada em 8,5%, para 1,171 milhão de hectares, e o rendimento subiu em 15,3%. A produção do Estado foi de 8,9 milhões de toneladas, 66,5% da produção nacional. Na dieta básica do brasileiro, o consumo per capita de arroz é de 67,8 kg ano⁻¹ e o consumo absoluto, segundo estimativas da Conab (2012), é de 11,7 milhões de toneladas. Entretanto, a produção deste cereal tem oscilado de ano para ano e, eventualmente, não tem sido suficiente para atender ao consumo interno do País, resultando na necessidade de importação do produto, a fim de proporcionar a manutenção dos estoques nacionais (CONAB, 2012).

O arroz é uma espécie hidrófila, cujo processo evolutivo tem levado a sua adaptação às mais variadas condições ambientais (GUIMARÃES et al, 2006). São considerados dois grandes ecossistemas para a cultura, o de várzea, irrigado por inundação

controlada, e o de terras altas, com ou sem irrigação suplementar por aspersão (EMBRAPA, 2012).

O Brasil destaca-se como grande produtor e consumidor de arroz. Produz anualmente entre 10 e 11 milhões de toneladas. Esta quantidade é soma do arroz produzido nos ecossistemas terras altas e várzeas (CONAB, 2012).

No entanto, nos últimos anos a área cultivada com arroz de terras altas sofreu grande redução. Uma das razões foi devido a redução de abertura de novas áreas na região central do Brasil, condição em que a cultura se desenvolvia bem. Outra razão foi devido a introdução do Sistema Plantio Direto (SPD) nas áreas já abertas, condição na qual a cultura não vem tendo sucesso, principalmente, na fase inicial de estabelecimento das plantas (MORO, 2011). Como também a preferência dos consumidores pelo arroz com grãos tipo agulhinha, até então cultivado nas condições irrigadas da região sul do país e o segundo foi a redução de aberturas de novas áreas na região central do Brasil (GUIMARÃES; STONE, 2004).

As áreas cultivadas com arroz de terras altas vem diminuindo gradativamente, perdendo espaço para outras culturas. Para Arf et al (2012) uma alternativa seria o uso de arroz irrigado por aspersão podendo proporcionar estabilidade de produção e lucratividade, estimulando o uso de práticas de maior nível tecnológico, com conseqüente aumento na produtividade. No entanto, estas práticas podem estimular o desenvolvimento exagerado das plantas de algumas cultivares, ocasionando acamamento, o que dificulta a colheita mecanizada.

O arroz de várzea irrigado por inundação utiliza alta tecnologia, é de baixo risco, obtém altas produtividades, porém com custo de produção elevado. O arroz de terras altas, onde predomina o sistema de sequeiro, caracteriza-se pelo uso de baixa tecnologia, alto risco, baixa produtividade e baixo custo de produção (MEDEIROS, 2004). O Brasil ocupa o décimo lugar com 1,8% do total produzido no mundo. Considerando apenas o cultivo de arroz de sequeiro, o Brasil é o primeiro produtor mundial (AGRIANUAL, 2003). Outra opção de manejo é o arroz de terras altas cultivado com o uso da irrigação por aspersão que pode proporcionar estabilidade de produção e lucratividade, estimulando o uso de práticas de maior nível tecnológico, com conseqüente aumento na produtividade.

A produção de arroz no Brasil pode ser dividida em três regiões: a primeira é a região Sul com destaque para Rio Grande do Sul e Santa Catarina, onde predomina o ecossistema de várzea. A segunda é o Centro Oeste, com destaque para Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás, e a terceira o Nordeste, com destaque para o Maranhão. Nestas duas últimas regiões predomina o cultivo no ecossistema de terras altas (FERREIRA; VILLAR, 2004).

O sistema de produção de arroz de terras altas ocupa aproximadamente 60% da área cultivada com este cereal no Brasil, sendo responsável por cerca de 40% da produção de grãos em casca (CRUSCIOL et al., 2003a). O arroz de sequeiro ganhou espaço no cenário nacional de produção de grãos em função do avanço da fronteira agrícola para a região dos Cerrados. Considerado a principal cultura nesta região agrícola (CRUSCIOL et al., 1999a ; CRUSCIOL, et al. 1999b). Grande parte das lavouras deste ecossistema está localizada em regiões onde é comum a ocorrência de períodos de estiagem durante a estação das chuvas (veranicos). Esse fato, aliado à alta evapotranspiração, tem provocado baixa estabilidade produtiva da cultura (CRUSCIOL et al., 2003a).

Grande parte das lavouras de sequeiro do Brasil está localizada nas regiões de cerrado, onde o cultivo ocorre no período de verão, quando o suprimento hídrico necessário para o desenvolvimento das plantas provém das chuvas (RODRIGUES et al., 2004).

O arroz apresenta alta exigência de água e sistema radicular superficial, sendo, portanto, pouco tolerante a períodos longos de deficiência hídrica (WREGER, 2001). Torna-se fundamental, assim, estudar espacial e temporalmente os riscos de deficiência hídrica e temperaturas críticas, a fim de definir períodos de semeadura mais adequados para o cultivo do arroz de sequeiro.

Os cultivares de arroz são classificadas quanto ao hábito de crescimento em tradicionais e modernas. As variedades plantadas, em geral, apresentam arquitetura de planta tradicional (porte alto, folhas longas, largas e decumbentes) e baixo potencial genético de produção.

Pinheiro (2006) relata que os cultivares de tipo de planta tradicional, apesar de mais tolerante à seca, não se beneficiam de boas condições hídricas e de fertilidade do solo, pois um crescimento ótimo implica em mau aproveitamento da luz e do nitrogênio,

devido ao acamamento. Por essa razão os cultivares tradicionais, de porte alto, foram substituídas pelas modernas, de porte baixo, com folhas curtas, eretas e com maior potencial produtivo, porém as altas produtividades são alcançadas sob adequada disponibilidade hídrica. Dessa forma, qualquer prática agrícola que melhore a eficiência no aproveitamento da água é desejável.

4.1.1. Arroz cv. IAC 202

Opções de cultivares de arroz tolerante a seca podem ser alternativas para melhorias na produção de arroz de terras altas. Como a adoção de técnicas de cultivo que possibilitem melhorar o manejo da cultura do arroz, em condições favoráveis ao desenvolvimento das plantas, pode ser de suma importância para o aumento da produtividade e qualidade dos grãos (ARF, 2012).

Cultivares de arroz de sequeiro recentemente lançados, apresentam alta produtividade e elevada qualidade, tanto na indústria como na culinária. Como é o caso do arroz IAC 202, resultado de programa de melhoramento do Instituto Agrônomo de Campinas, mais produtivo de qualidade industrial e culinária excepcionais, alcançando melhores preços no mercado, tornando a lavoura mais lucrativa e competitiva (O AGRONOMICO, 2000).

Para que todo esforço realizado pelos melhoristas em incorporar as novas características diferenciais os cultivares possa ser desfrutado pelos agricultores, é necessário que as sementes, que são a ligação entre os melhoristas e os agricultores, sejam repassadas com alta qualidade aos produtores. Nesse sentido, as empresas produtoras de sementes procuram monitorar todas as etapas do processo produtivo visando um produto com alta pureza genética, física, fisiológica e sanitária (BONOW, 2007).

Estudos realizados por Crusciol et al (2005), verificaram que cultivares de arroz IAC 202 apresentaram maior crescimento radicular e acúmulo de matéria seca com doses menores de P (fósforo), priorizando assim o desenvolvimento da parte radicular em relação a parte aérea. Pupatto et al (2004) utilizando escória como corretivo de solo em IAC 202 observaram maior produção de massa de matéria seca da parte aérea e produtividade de grãos de arroz.

Buzetti et al (2006) avaliando resposta de cultivares de arroz a doses de nitrogênio e do regulador de crescimento cloreto de cloromequat, observaram que o cultivar IAC 202 apresentou maior número de panícula e produtividade.

Santos et al (2007) analisando as variáveis microbiológicas e produtividade do arroz sob diferentes manejos do solo e água, não verificaram diferenças na produtividade de grãos entre as lâminas L1 (irrigação nas fases reprodutiva e de maturação) e lâmina - L2 (irrigação durante todo ciclo da planta), demonstrando assim uma resistência a fases diferentes de irrigação.

O IAC 202 apresenta altura média de 87 cm, sendo considerado de porte baixo e intermediário. O ciclo médio é de 87 dias, as folhas são de coloração verde normal e glabras. As panículas do tipo intermediário, possuem, em média 23 cm de comprimento e 169 grãos por panícula. Os grãos polidos são longos, finos e translúcidos com baixa ocorrência de centro branco. O IAC 202 tem apresentado baixa incidência de manchas foliares em ensaios realizados sob condições normais de plantio. O novo cultivar apresenta excelentes qualidades culinárias para o padrão do consumidor brasileiro. Caracteriza-se por um teor de amilose intermediário (23,2%) e temperatura de gelatinização baixa (6,4 no teste de alcali) e ótimo rendimento de grãos inteiros no beneficiamento (O AGRONOMICO, 2000).

4.1.2. Arroz cv. BRSMG Curinga

O arroz apresenta boa qualidade nutricional, sendo uma cultura que apresenta grande adaptabilidade às mais variadas condições de solo e clima, caracterizando grande potencial de aumento de produtividade (NASCENTE et al, 2011).

Para o arroz, assim como para outras grandes culturas, existe uma preocupação em relação ao estreitamento da base genética, fator que pode incorrer em vulnerabilidade às doenças e pragas. Para a utilização em programas de melhoramento genético, as diferenças morfológicas e agronômicas manifestadas entre os genótipos nos ambientes de cultivo são mais importantes, principalmente por refletir as interações gênicas e interações genótipo x ambiente, as quais normalmente são decisivas para a escolha de determinado cultivar ou manejo específico da cultura (SILVA et al, 2011).

A seleção de genótipos com maior eficiência na utilização de nitrogênio é considerada, atualmente, uma das maneiras mais adequadas para diminuir o custo

de produção da cultura do arroz e aumentar a produtividade de grãos através da maior resposta a esse nutriente (FIDELIS et al, 2012).

Assim, pesquisas tem sido desenvolvidas para obtenção de novos cultivares de arroz, com maior resistência à seca, à brusone, ao acamamento com melhor qualidade de grãos e outros atributos agronômicos necessários a uma produtividade elevada e estável (FORNASIERI FILHO; FORNASIERI, 2006). Hernandez et al (2010), avaliando doses, fontes e épocas de aplicação de nitrogênio em cultivares de arroz (IAC 202 e Curinga), observaram que o cultivar curinga apresentou maior massa de 100 grãos e produtividade em relação a IAC 202.

O cv. Curinga é resultado de um cruzamento genético realizado no CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical) sediado em Palmira, Colômbia, iniciando um programa de melhoramento de arroz de terras altas, que priorizava melhor qualidade de grãos, resistência a solos ácidos e resistência a enfermidades, particularmente a brusone (EMBRAPA, 2005). Este cultivar apresenta floração de 97 dias e o ciclo de 132 dias, altura média da planta de 93 cm, tipo de grãos longo fino (FORNASIERI FILHO; FORNASIERI, 2006).

Segundo boletim técnico da EMBRAPA (2005) Curinga é uma cultivar semi-precoce, com alta produtividade de grãos. Os grãos da BRSMG Curinga se classificam como longos-finos e com intensidade de centro branco Curinga apresenta maior resistência à seca que os cultivares testemunhas BRS Primavera e BRS Soberana.

Realizando avaliações de cultivares de arroz de terras altas sob condições de sequeiro em Cassilândia, Silva et al (2009) constataram o prolongamento do período para o florescimento e do ciclo da cultura, provavelmente consequência de veranicos ocorridos durante a fase vegetativa. O cultivar curinga apresenta ampla adaptação, estando habilitada para cultivo em nove Estados brasileiros: Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso, Rondônia, Pará, Roraima, Maranhão, Piauí e Tocantins (EMBRAPA, 2005).

Heinemann et al (2011) avaliando a resposta da taxa de transpiração do cultivar Curinga em resposta ao déficit hídrico observaram que esse tipo de cultivar moderno expressam melhor seu rendimento potencial em regiões com baixa intensidade e ocorrência de deficiência hídrica.

4.2. Silício

O silício é um elemento com propriedades elétricas e físicas de um semimetal, desempenhando, no reino mineral, um papel cuja importância pode ser comparável ao do carbono nos reinos vegetal e animal. É o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, 27% em massa, superado apenas pelo oxigênio (EPSTEIN e BLOOM, 2006), sendo preservado no processo pedogenético, em proporção variável com as condições ambientais, temperadas ou tropicais (MALAVOLTA, 2006). É encontrado apenas em formas combinadas, como a sílica e minerais silicatados. Os silicatos são sais em que a sílica é combinada com oxigênio ou outros elementos como Al, Mg, Ca, Na, Fe e K em mais de 95% das rochas terrestres, meteoritos, em todas as águas, atmosfera (na forma de pó silicoso) vegetal e animal (SAVANT et al., 1997b; FERREIRA, 2008).

Pupatto (2003) relata que apesar da abundância na crosta terrestre, em ecossistemas específicos, nos quais os solos são utilizados intensivamente, principalmente com culturas acumuladoras de Si, podem tornar-se paulatinamente deficientes no elemento, pois a exportação do Si não é compensada, visto que a fertilização silicatada é uma prática pouco utilizada.

No Japão, 25% das áreas cultivadas com arroz recebem, anualmente, aplicações de silicatos de cálcio, que variaram de 0,5 a 1,0 t ha⁻¹, embora a quantidade recomendada seja de 1,5 a 2,0 t ha⁻¹ (RAMOS et al, 2008). No Brasil, a cultura do arroz pode também responder à adubação com Si dependendo da sua disponibilidade no solo (BARBOSA FILHO et al, 2000).

A essencialidade do Si para as plantas superiores foi demonstrada apenas para algumas espécies, apesar de ser um constituinte majoritário dos vegetais (EPSTEIN, 1994; MARSCHNER, 1995; SANTOS, 2008). A partir de 2004 a legislação brasileira considera o Si um micronutriente (BRASIL, 2004), ao qual sua absorção pode trazer inúmeros benefícios, principalmente para culturas acumuladoras de Si, como o arroz (MENGEL; KIRKBY, 1987; MAUAD, 2003). O efeito benéfico do silício nas plantas é mais evidente em cultivos sob condições de estresse (MA ; TAKAHASHI, 2002).

É indiscutível o efeito do silício no desenvolvimento e na produtividade de muitas gramíneas como arroz, cana-de-açúcar, sorgo, milheto, aveia, trigo,

milho, grama kikuyu, grama bermuda, e algumas espécies não gramíneas como alfafa, feijão, tomate, alface e repolho.

As principais formas de Si no solo de acordo com Korndörfer et al. (2003) são: Si solúvel (H_4SiO_4 ácido monossilícico) facilmente aproveitável pelas plantas; Si estrutural em minerais silicatados; Si adsorvido ou precipitado com óxidos de Fe, Al e Mn; Sílica biogênica oriunda da decomposição da matéria orgânica do solo e constituída por formas amorfas (ou poliméricas de Si).

As fontes de Si, para uso na agricultura aprovadas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, são: escória silicatada, silicato de Ca, silicato de Ca e Mg, silicatos de B, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni e Zn, silicato de K e termofosfatos (BRASIL, 2004).

Os silicatos de cálcio e magnésio são constituídos basicamente de $CaSiO_3$ e $MgSiO_3$. Quando aplicados no solo, aumentam a disponibilidade de Si, elevam o pH e aumentam o Ca e Mg trocável do solo, reduzindo também a toxicidade por Fe, Mn e Al para as plantas e aumentando a disponibilidade de P no solo (KORNDÖRFER, 2002).

4.2.1. Silício na planta

O silício é um elemento que tem despertado bastante interesse entre técnicos e agricultores, pelos inúmeros benefícios que traz às culturas, incluindo aumentos na produtividade e na resistência a estresses bióticos e abióticos, tais como excesso de metais pesados, deficiência hídrica e doenças fúngicas (TONIN, 2005).

Na cultura do arroz são inúmeros os benefícios com a nutrição do arroz (SANTOS, 2008), o silício é o elemento absorvido com maior eficiência (MARTINS, 2010) sendo que quantidade acumulada de SiO_2 é seis vezes maior que a de potássio, 10 vezes maior que a de nitrogênio, 20 vezes maior que a de fósforo (P_2O_5) e 30 vezes maior que a de cálcio (TAKAHASHI, 1995).

Tonin (2005) relata que ao se adiciona um nutriente ao solo, via adubação, ocorrem reações químicas que podem modificar, para mais ou para menos, os teores disponíveis de outros elementos. O ácido monossilícico (H_4SiO_4), a forma solúvel presente na solução do solo e pela qual a planta absorve o silício, ajuda a proteger as plantas de vários efeitos tóxicos.

Savant et al. (1997a) relatam que a queda da produtividade do arroz em várias regiões do mundo se deva a uma possível diminuição do teor de silício no solo. Para Leite (2004) há muito tempo sabe-se que a falta de Si na solução do solo a cultura do arroz deixa de apresentar crescimento normal.

Entre as gramíneas, o arroz possui grande capacidade de absorção de Si pelas suas raízes, o qual é translocado, acompanhando o fluxo de transpiração, acumulando-se na parte aérea (OLIVEIRA et al, 2007).

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

Pupatto (2003) afirma que a sílica do solo favorece a absorção do fósforo como resultado da troca de íons fosfato pelo ácido silícico; também pode acarretar diminuição da absorção excessiva de fósforo induzida por uma elevada adubação fosfatada.

Prabhu et al. (1996) relatam que no Brasil, onde o arroz de terras altas é predominantemente cultivado, além do efeito benéfico sobre severidade de brusone, os corretivos à base de silicatos têm mostrado também efeitos positivos na correção da acidez do solo, no aumento da disponibilidade de Ca, Si e P e produtividade de grãos (KORNDÖRFER et al., 1999a; BARBOSA FILHO et al., 2001).

Em plantas de arroz o Si promove maior resistência à infecção de fitopatógenos, retarda a senescência das folhas, melhora a arquitetura e a taxa fotossintética das plantas, reduz a transpiração e aumenta a tolerância ao déficit hídrico (PULZ, 2007).

O silício também tem demonstrado efeito no controle de algumas pragas do arroz. O comportamento dos insetos é afetado pela presença de altos níveis de Si na planta (SAVANT et al., 1997b). Yoshida (1975) e Gomes et al (2011) relata que a silicificação da epiderme previne a penetração e a mastigação pelos insetos porque as células ficam mais endurecidas. Redução do ataque de pragas e doenças por se concentrar na epiderme das folhas, aumento da resistência ao acamamento e a eficiência fotossintética (FALQUETO, 2008).

Plantas acumuladoras de silício apresentam formação de uma camada de sílica abaixo da cutícula, enquanto em plantas não-acumuladoras, ocorre um mecanismo

bioquímico, onde o silício ativa um mecanismo de defesa, elevando a produção de fitoalexinas (fungicidas naturais) aumentando a resistência ao ataque de patógenos e pragas, por diminuir a palatabilidade (TONIN, 2005; GOMES, 2011).

Silicatos de cálcio e magnésio em experimentos realizados por Castro e Crusciol (2007), foram tão eficientes quanto o calcário, melhorando as características agronômicas da soja, indicando assim que a adubação com Si influencia em diversas culturas.

Além destas vantagens o silício faz com que a exigência de água pelas plantas seja menor pela redução da transpiração, devido ao acúmulo de sílica abaixo da cutícula das células epidérmicas nas folhas de arroz e ao controle adequado da abertura dos estômatos; podendo ser de extrema importância em se tratando de solos sob cerrado, em que o período de estiagem é longo e severo (PULPPATO, 2003; MADEIROS et al, 2009).

Para Prates (2010) os efeitos da acumulação de Si nas células da epiderme são mais evidentes em gramíneas, onde se pode observar que as folhas se mantêm mais eretas e, dessa forma, proporcionam maior penetração de luz e redução da transpiração, diminuindo ou até evitando que a planta passe por um estresse hídrico e ainda aumentam a resistência ao acamamento, pois proporcionam maior força mecânica ao colmo.

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. Outros trabalhos também confirmam efeitos positivos da aplicação de Si em arroz de terras altas (FARIA, 2000; BARBOSA FILHO et al, 2001; TOKURA, 2007).

Takatsuka et al. (2001) relacionaram a baixa porcentagem de espiguetas granadas aos baixos teores de silício na planta. Segundo Ma (2004), o número de espiguetas granadas é o componente da produção mais influenciado pelo silício, tanto em plantas de arroz quanto em cevada. Pershin et al. (1995) e Yeo et al. (1999) constataram que plantas de arroz suplementadas com Si proporcionam um aumento na produção e na massa individual das sementes, diminuição da esterilidade e maior taxa fotossintética (POZZA et al, 2009; BASAGLI et al., 2003; KORNDÖRFER et al., 2004; FU; HUANG, 2001).

A pesquisa científica tem demonstrado o envolvimento do silício em vários aspectos estruturais, fisiológicos e bioquímicos nas plantas, com papéis bastante diversos. Além de promover melhorias no metabolismo, atua na ativação de genes envolvidos

na produção de fenóis e enzimas relacionadas com os mecanismos de defesa da planta (FERREIRA, 2008).

Schmidt et al. (1999) verificaram que o silício proporcionou aumento nos níveis de enzimas antioxidantes, na capacidade fotossintética e o no conteúdo de clorofila em gramados sob condições de baixa umidade. O maior nível de enzimas antioxidantes em plantas tratadas com silício parece criar condições de tolerância a este tipo de estresse.

Plantas com níveis mais elevados de silício tendem a conter mais nitrogênio em seus tecidos. O silício aumenta a produção de fotoassimilados, devido ao incremento na taxa fotossintética, há um aumento de substrato para a incorporação do nitrogênio nos esqueletos carbônicos. Para maximizar o potencial de produção, por exemplo no arroz, pode-se adotar plantios mais adensados e altas aplicações de nitrogênio. Contudo, nestas condições, as folhas tendem a ficar menos eretas, e a planta fica mais suscetível a doenças. A aplicação de silício deixa as folhas mais eretas, diminuindo o sombreamento mútuo e a planta mais resistente a doenças. Cultivos intensivos, com aplicações pesadas de nitrogênio, necessitam de adubação complementar com silício (TONIN, 2005).

O transporte do silício é feito pelo xilema e sua distribuição depende das taxas de transpiração dos diferentes órgãos da planta (YOSHIDA et al., 1962; MARTINS 2010). O elemento tem baixa mobilidade na planta e é depositado nas lâminas foliares, bainhas foliares, colmos, cascas e raízes, sendo que na lâmina foliar o acúmulo é maior que na bainha foliar (TANAKA; PARK, 1966). O maior acúmulo na bainha foliar teria a função de limitar a perda de água, dificultar a penetração de hifas de fungos, diminuindo assim as perdas na produção por doenças fúngicas e por deficiência hídrica (MAUAD, 2001). Entretanto, para Winslon (1992) a casca do arroz é o órgão que mais acumula silício na planta, seguido pela folha bandeira e panícula.

O uso do Si tem promovido melhora na arquitetura da planta e aumento na fotossíntese (DEREN et al., 1994; MAUAD et al, 2003), resultado da menor abertura do ângulo foliar, que torna as folhas mais eretas, diminuindo o auto-sombreamento, sobretudo em condições de altas densidades populacionais e altas doses de N (YOSHIDA et al., 1962; BALASTRA et al., 1989; FIORI, 2006). Segundo Agarie et al. (1998a), 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.

A incorporação do Si tem pelo menos dois efeitos positivos do ponto de vista energético: 1) o seu custo representa 3,7% daquele relativo à incorporação da lignina e 2) a melhoria na interceptação da luz solar, portanto da fotossíntese, devido à melhor arquitetura das plantas supridas com Si (RAVEN, 1983).

Estudos realizados por Gao (2004) em milhos submetidos a deficiência hídrica e adubação silicatada, apresentaram maior eficiência do uso da água, menor transpiração, e maior resistência estomática. Esses resultados devem-se ao aumento da resistência cuticular estomática ocasionado por uma diminuição da transpiração.

A falta do Si pode, portanto, resultar em diminuição da capacidade biológica da planta em resistir às condições adversas do meio ambiente (RAFI et al., 1997).

Os efeitos do silício nas plantas são mais evidentes quando elas são submetidas a algum tipo de estresse, seja ele de natureza química, física ou biológica. Maior rigidez estrutural, menor transpiração, maior tolerância a doenças e pragas, maior resistência ao acamamento, encharcamento, veranicos e geadas, bem como neutralização ou diminuição dos efeitos tóxicos de metais pesados, como manganês e alumínio, são alguns dos importantes benefícios que a adubação silicatada pode proporcionar para as plantas cultivadas (LIMA FILHO, 2009).

Plantas mais produtivas com menos doenças e mais vigorosas, esse é o resultado que muitos agricultores vêm obtendo ao utilizar o silício como insumo no manejo do solo (FERREIRA, 2008).

Trabalho realizado por Santos et. al (2003), com doses crescentes de metassilicato, observaram aumentos significativos na produtividade da cultura do arroz com a maior dose aplicada (6.000 kg ha^{-1}).

Alvarez (2004) também verificou que a aplicação de silício na semeadura não interferiu no desenvolvimento das plantas, componentes da produção e produtividade do arroz de terras altas. Acréscimos de produtividade com a adubação silicatada em arroz já foram constatados por Pereira et al. (2004).

Pesquisas realizadas demonstraram que a elevação das doses de Si aplicadas aumentou de forma significativa, o acúmulo de Si na matéria seca da parte aérea (ASCH et al, 2005; TOKURA et al 2007).

Trabalhos realizados com sistema radicular do arroz submetidos a deficiência hídrica mostraram que a densidade radicular, avaliada em colunas de solo, se relacionou positivamente com a tolerância à deficiência hídrica destas cultivares, em condições de campo (GUIMARÃES et al, 2011).

O fornecimento de Si para a cultura do arroz, pode ser favorável em condições de menor disponibilidade de água, pois de acordo com Miyake e Takahashi (1985), o arroz é classificado como planta acumuladora de Si. Portanto, a silicatagem pode ser uma prática promissora para a cultura do arroz, principalmente no combate a condições de estresses (PULZ et al., 2008; CRUSCIOL et al., 2009).

Em estudos avaliando a aplicação de silicato de cálcio em diferentes solos Kondorfer et al. (2002), observaram que, em diferentes tensões de deficiência hídrica (60, 70 e 80% c.c.) o silício promoveu aumento na produção de grãos e na tolerância à falta água. 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.

Melo et al. (2003) estudando capins do gênero *Brachiaria* e doses de silício sob diferentes níveis de água no solo (60 e 80 % C.C.), observaram que a aplicação de silício aumentou os teores do elemento nas plantas, contudo não houve a tolerância dos capins ao déficit hídrico e não afetou a produção de matéria seca.

A identificação e a compreensão dos mecanismos de tolerância a seca são fundamentais na busca por genótipos de arroz tolerantes à deficiência hídrica ou mesmo técnicas que aumentem essa tolerância, de forma a alcançar maior estabilidade da produtividade em áreas de maior risco (RABELLO, 2008).

4.3. Manejo do N na cultura do arroz de terras altas

De todos os nutrientes minerais, o N é quantitativamente o mais importante para o crescimento das plantas. A forma de nitrogênio no solo (NO_3^- , NH_4^+) pode

influenciar o balanço de cátions-ânions nas plantas (ENGELS; MARSCHNER, 1995; PRIMAVERSI et al, 2005).

O nitrogênio está presente no solo sob três formas principais, compostos orgânicos em restos vegetais, nos organismos e húmus do solo e em formas inorgânicas. Nesta última forma o N está representado pelo NH_4^+ fixado em minerais de argila e pelo NH_4^+ , NO_3^- e NO_2^- presentes na solução do solo (MCLAREN; CAMERON, 1996; ARMSTRONG, 2006).

O nitrogênio é o principal elemento exigido pela cultura do arroz de terras altas, especialmente os cultivares modernas (CRUSCIOL et al., 1999b; MAUAD et al, 2003) e o que mais limita a produtividade de grãos (PETERS; CALVERT, 1982; FAGERIA et al, 1995; GUIMARÃES; STONE, 2003). Este nutriente propicia, entre outros, os seguintes benefícios ao arroz: aumenta o número de perfilhos e com isso o número de panículas, aumenta o número e o tamanho dos grãos e o teor de proteína (FAGERIA et al., 2003).

A maioria das plantas absorve indistintamente nitrato e amônio. O arroz tem preferência pela absorção de amônio, porém outros fatores como idade, ambiente, espécie vegetal, bem como a disponibilidade no solo podem determinar a absorção preferencial de uma das formas (MORO, 2011). A utilização conjunta das duas formas de N pode levar a melhores desempenhos da planta (TISDALE et al., 1985). Para o bom crescimento e desenvolvimento do arroz é necessário o fornecimento de nitrato e amônio em quantidades semelhantes (TA; OHIRA, 1981; HOLZSCHUH et al, 2009).

Dada a sua importância e a alta mobilidade no solo, o nitrogênio tem sido intensamente estudado, no sentido de maximizar a eficiência do seu uso. Para superar essa variação de resultados, tem-se procurado diminuir as perdas do nitrogênio no solo, bem como melhorar a absorção e a metabolização do N na planta (BREDEMEIER; MUNDSTOCK, 2000).

Outro aspecto a ser considerado é a velocidade de absorção. Íons como O_3^- , K^+ e Cl^- são absorvidos mais rapidamente, enquanto a absorção de Ca_2^+ , SO_4^{2-} é relativamente lenta. A diferença na taxa de absorção significa que a planta remove cátions e ânions em quantidades desiguais do meio (MENGEL; KIRKBY, 1987).

Outro aspecto a ser considerado em relação a fontes amoniacais é a acidificação do solo, o que para a cultura do arroz não seria problema. Fageria; Zimmermann

(1998) observaram maior produtividade do arroz de terras altas, quando o pH do solo estava abaixo de 5,3. Além disso, a acidez poderia retardar a nitrificação, o que também seria interessante para o arroz, uma vez essa cultura requer equilíbrio entre nitrato e amônio no solo.

4.4. Deficiência Hídrica

O interesse na resistência à seca, nos seus aspectos básicos ou aplicados, vem crescendo recentemente. Preocupações sobre as mudanças climáticas e escassez da água na agricultura são razões importantes para expandir essas investigações. Há uma crescente demanda mundial por alimentos, enquanto que os recursos hídricos para a agricultura estão diminuindo, visto que a produção em sequeiro deve aumentar (BLUM, 2011).

A planta de arroz cultivada em terras altas está sujeita a múltiplos estresses abióticos e, conseqüentemente, apresenta alta variabilidade na sua produtividade com elevado nível de incerteza (EMBRAPA, 2010).

Previsões ambientais sinalizam para o aumento do aquecimento global nas próximas décadas. Um aumento dos períodos de seca certamente acompanharão esse fenômeno. O desenvolvimento de cultivares mais tolerantes a períodos de déficit hídrico, bem como o desenvolvimento de tecnologias que auxiliem as plantas a tolerar períodos prolongados de estiagem, torna-se essencial na manutenção da produção agrícola em níveis que possam alimentar uma população em constante crescimento (NEPOMUCENO et al., 2001).

De acordo com Pultz (2007), sistemas produtivos agrícolas estão sujeitos a diversos fatores que podem causar perdas econômicas em decorrência da redução da produção. O déficit hídrico é fenômeno que ocorre em grandes extensões de áreas cultivadas e pode provocar grandes reduções na produção, dependendo do momento de ocorrência, período de duração e da cultura de exploração (NOGUEIRA et al., 2001)

O cultivo do arroz de terras altas sempre esteve associado à abertura de fronteira agrícola, onde normalmente obtém-se baixas produtividades, que é resultado do cultivo em solos de baixa fertilidade, como os solos de cerrado, principalmente com elevada acidez, baixa capacidade de troca de cátions e de retenção de umidade, deficiência generalizada de nutrientes, particularmente o fósforo, associada a teores elevados de Al e alta

saturação de Al no complexo do solo (FREITAS, 2011). além da ocorrência de períodos curtos de estiagem, denominados veranicos, que provocam deficiência hídrica à cultura, afetando a absorção de nutrientes (CRUSCIOL, 2003b).

A água é um dos mais importantes fatores de produção do arroz, pois influencia nas características da planta, na disponibilidade de nutrientes do solo (LARCHER, 2006), na natureza e na extensão do crescimento das plantas daninhas (ERASMO, et al, 2004), bem como interfere na manutenção do turgor e refrigeração dos tecidos (FLOSS, 2008).

O consumo de água pela cultura do arroz de terras altas é distribuído em 30% durante a fase vegetativa, 55% durante a fase reprodutiva e 15% na fase de maturação (FAGERIA, 1980; ARF et al, 2001). Assis e Lima Filho (2000) consideram que uma planta encontra-se em bom nível de hidratação, quando o potencial hídrico de base é de -0,1 ou -0,2 MPa. Para Hsiao (1973), um estresse moderado pode ser detectado quando atinge até -1,2 MPa. Quando a tensão de água no solo apresenta valores inferiores a -1,5 MPa, diz-se que a planta encontra-se sob déficit hídrico severo.

A ocorrência de deficiência hídrica é prejudicial em todas as fases, e o período mais crítico é na fase reprodutiva (BLUM, 2009), sendo o estágio de quinze dias anterior ao florescimento o mais prejudicial. A falta de água nessa época provoca esterilidade ou má formação das espiguetas, com grande reflexo na produtividade (MOREIRA; KLUGE, 1999).

A deficiência hídrica é a principal responsável pela baixa produtividade e instabilidade de produção do arroz de sequeiro. Os períodos de estiagem são caracterizados pela alta demanda evaporativa do ar, altos níveis de radiação solar e temperaturas elevadas (STEINMETZ; MEIRELES, 1999), podendo até causar a perda total da lavoura (CRUSCIOL et al, 2003b). Normalmente, a ocorrência de veranicos coincide com a fase do florescimento do arroz de sequeiro, comprometendo a produção final; quando ocorrem na fase vegetativa não causam prejuízos muito severos (PUPATTO, 2003).

A deficiência hídrica afeta a bioquímica, a fisiologia, a morfologia e os processos de desenvolvimento das plantas, reduzindo a fotossíntese de três maneiras: pela redução da área foliar disponível para interceptar a radiação solar, pela redução da difusão do CO₂ para dentro da folha e pela redução da habilidade dos cloroplastos para fixar o CO₂ que

neles penetra (JONES; OSMOND, 1973), diminuindo o crescimento e a produtividade da planta (PEAK, 2004).

Estudos realizados por Anjum et al. (2003) indicaram que o estresse hídrico afeta os pigmentos e componentes fotossintéticos. Monakhova; Chernyadèv, (2002) afirmam que há uma diminuição das atividades das enzimas do ciclo de Calvin, que são causas importantes da redução de produtividade das culturas.

Quando a planta é submetida a um estresse hídrico, muitos de seus processos fisiológicos também são atingidos, como abertura estomática, fotossíntese (FU; HUANG, 2001; FERREIRA, 2008), síntese de proteínas, atividade enzimática e hormonal. Sendo o arroz uma cultura que apresenta elevada exigência em água por unidade de fitomassa produzida (MACHADO; LAGÔA, 1994), a ocorrência de deficiência hídrica, mesmo que moderada, provoca grande instabilidade na produção, em função dos vários processos fisiológicos direta ou indiretamente atingidos (PUPATTO, 2003).

A falta de água em qualquer estágio de desenvolvimento da planta pode causar danos. Esses danos dependem da severidade e da duração do estresse, do genótipo, do estágio de desenvolvimento e da natureza do estresse (KRAMER, 1983). A maioria dessas modificações visa manter o crescimento e a reprodução da planta em ambientes com limitações na disponibilidade de água (NEPONUCENO, 2001). O déficit hídrico em plantas inicia um complexo de respostas, começando com a percepção do estresse, o qual desencadeia uma cascata de eventos moleculares que é finalizada em vários níveis de respostas fisiológicas, metabólicas e de desenvolvimento (BRAY, 1993).

Quando ocorre déficit hídrico no solo, próximo às raízes, os estômatos se fecham, ajustando a resistência estomatal para reduzir o fluxo de vapor, reduzindo a transpiração (JONG, 2000; TAIZ; ZEIGER, 2009). Nessa condição, haverá decréscimo na absorção de gás carbônico, bem como da absorção de água e nutrientes pelas raízes. Com isso, as taxas fotossintética e respiratória são afetadas negativamente (COSTA et al., 1997; GONÇALVES et al, 2010) e, conseqüentemente, ocorrerá redução na altura da planta (RODRIGUES; ARF, 2002), na massa seca total da planta (CASTILHO et al., 1992; PRASERTSAK; FUKAI, 1997) e na produtividade de grãos (CRUSCIOL, 2001).

Além disso, a deficiência hídrica favorece o acúmulo de espécies reativas de oxigênio, como os radicais superóxido (O_2^-), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e

radicais hidroxila (OH), que danificam as plantas pela oxidação dos pigmentos fotossintéticos e destruição dos lipídios, proteínas e ácidos nucleicos (REDDY et al., 2004)

Quando as plantas são expostas a situações de déficit hídrico exibem, frequentemente, respostas fisiológicas que resultam, de modo indireto, na conservação da água no solo, economizando esta para períodos posteriores. Assim, a condutância estomática tem relação direta com o nível de disponibilidade hídrica no solo (BIANCHI et al., 2007).

Porém, um dos grandes problemas que os agricultores encontram é a baixa disponibilidade de genótipos tolerantes à escassez de água, que limitam a produtividade em certas regiões. O efeito da deficiência hídrica na produção depende da época de ocorrência e de sua severidade. O desenvolvimento de cultivares mais tolerantes a períodos deficiência hídrica e o desenvolvimento de tecnologias que auxiliem as plantas a tolerar períodos prolongados de estiagem serão essenciais na manutenção da produção agrícola (NEPOMUCENO et al., 2001).

De acordo com Sousa (2008), a tolerância da planta a deficiência hídrica parece ser um importante mecanismo de resistência para a manutenção do processo produtivo em condições de baixa disponibilidade de água às plantas. Portanto, existe a necessidade de uma melhor quantificação dos riscos climáticos existentes nas regiões produtoras com a finalidade de fornecer um melhor suporte à cadeia produtora de arroz para lidar com a variabilidade climática e também adaptar-se às prováveis mudanças climáticas (EMBRAPA, 2012). Como também o conhecimento dos processos fisiológicos que atuam sobre a planta em condição de estresse por deficiência hídrica.

4.5. PIGMENTOS

4.5.1. Clorofilas *a* e *b*

As clorofilas (*a* e *b*) e os carotenóides são os pigmentos fotossintéticos mais abundantes existentes no planeta. Por sua estrutura química ser instável, as clorofilas são facilmente degradadas, resultando em produtos de decomposição que modificam a percepção e qualidade dos vegetais (GONÇALVES, 2008).

As clorofilas localizam-se nos cloroplastos, sendo esta organela o local que se realiza a fotossíntese, a qual possui duas reações importantes: a *fotoquímica*, nas membranas dos tilacóides e a *bioquímica*, no estroma do cloroplasto (TAIZ; ZEIGER, 2004).

As clorofilas são pigmentos responsáveis pela conversão da radiação luminosa em energia química, sob a forma de ATP e NADPH, por essa razão, são estreitamente relacionadas com a eficiência fotossintética das plantas e, conseqüentemente, ao seu crescimento e adaptabilidade a diferentes ambientes. Presentes nos vegetais superiores, sob as formas *a* e *b*, as clorofilas são constantemente sintetizadas e destruídas, cujos processos são influenciados por fatores internos e externos às plantas (NEVES et al., 2005).

Clorofila *a* é o pigmento utilizado para realizar a etapa fotoquímica, enquanto que os demais pigmentos auxiliam na absorção de luz e na transferência da energia radiante para os centros de reação, sendo assim chamados de pigmentos acessórios (GALVÍNCIO et al, 2010).

Nas plantas, a captação da luz se dá pelas folhas e a transformação em energia ocorre nos cloroplastos, onde os pigmentos de clorofilas *a* e *b* absorvem a energia radiante necessária para a fotossíntese. Moléculas de clorofila encontram-se especificamente em complexos proteico denominados fotossistemas, que se encontram integrados nos tilacóides e cloroplasto. A estrutura das clorofilas *a* e *b* é basicamente a mesma: compõem-se da porção porfirina, constituída de quatro anéis de pirrol ligados por pontes de carbono-hidrogênio (MESCHEDE et al., 2011).

O rendimento da fluorescência da clorofila revela o nível de excitação da energia no sistema de pigmentos que dirige a fotossíntese e fornece subsídios para estimar a inibição ou o dano no processo de transferência de elétrons do fotossistema II (PSII) (BOLHÀR-NORDENKAMPF et al., 1989; ARAÚJO e DEMINICIS, 2009).

Segundo Taiz; Zeiger, (2004) grande parte da radiação incidente sobre a superfície da folha não é utilizada nos processos fotoquímicos, ela é perdida de várias formas, uma parte é refletida e outra porção é transmitida, atravessando a folha sem ser absorvida, enquanto que uma terceira fração da radiação é absorvida pelos pigmentos fotossintetizantes. No entanto, nem todos esses fótons absorvidos pelos pigmentos são utilizados nos processos fotoquímicos. Segundo Lázaro (2007) em intensidades elevadas de radiação, moléculas de clorofila são passíveis de processos degradativos (foto-oxidação).

O fluxo de elétrons produzido pelos pigmentos de clorofila é usado para transportar íons H^+ através das membranas dos tilacoides, provocando um potencial

quimiosmótico, usado principalmente na produção de ATP. Os elétrons são eventualmente usados na redução de NADP a NADPH (MORAIS et al., 2007).

Segundo Hendry; Price, (1993) a deficiência hídrica é responsável pela diminuição de pigmentos nas folhas, fazendo com que o ciclo de vida da planta seja alterado. Porém, a relação entre clorofila *a* e *b* em plantas terrestres pode ser usada como indicativo de resposta ao sombreamento e a senescência prematura, e a relação entre clorofila e carotenóides é usada em menor escala para diagnosticar a taxa de senescência sob estresse hídrico.

Segundo Agarie et al. (1998b), o silício está associado à prevenção do progresso da senescência foliar, devido à manutenção da fotossíntese e proteção da destruição de clorofila, principalmente em condições de altas temperaturas e baixa umidade, aumentando assim a área foliar exposta a luz solar (CRUCIOL, 2009).

4.5.2. Carotenóides

Os carotenóides são pigmentos acessórios na absorção e transferência de energia radiante, e protetores da clorofila no tocante à foto-oxidação (LIMA et al., 2004). Os carotenóides possuem um papel importante na proteção do pigmento clorofila sob condições de estresse e são conhecidos por manter as reações fotodinâmicas, protegendo a clorofila da peroxidação lipídica e impedindo o colapso da membrana dos cloroplastos (KNOX; DODGE, 1985).

Dois dos principais pigmentos ligados à eficiência fotossintética e, conseqüentemente, ao crescimento e adaptação das plantas a diversos ambientes são a clorofila *a* e os carotenóides (FORCE, 2003). Um dos pigmentos mais importantes é o betacaroteno, molécula precursora da vitamina A, cuja composição é exatamente a metade do carotenóide. O teor de carotenóides nos órgãos vegetais varia, sendo geralmente maior em folhas verdes (RODRIGUEZ; AMAYA et al., 2004). Existe variação do teor de carotenóides em função de diferentes cultivares, dos estádios de maturação, das condições de clima ou localização geográfica, bem como da parte de planta utilizada e da técnica de produção agrícola.

Os carotenóides também possuem efeito anti-oxidante importante no sistema fotossintético (HALLIWELL, 1999). O oxigênio singlete ($^1\text{O}_2$) um dos radicais liberado por diferentes tipos de estresses é muito prejudicial aos componentes celulares, como

aos lipídeos. É nesse momento que os carotenóides, em especial as xantofilas, exercem uma ação protetora por meio do rápido *quenching* da clorofila excitada (KRAUSE; WEIS, 1991).

4.6. Atividades metabólicas

4.6.1. Espécies Reativas de Oxigênio (ERO)

O estresse hídrico é conhecido por causar danos oxidativos às plantas, levando ao aumento nos níveis de produção das espécies reativas de oxigênio (ERO) (FOYER; NOCTOR, 2005). As ERO são formadas em etapas de redução univalente a partir do oxigênio molecular. O primeiro passo na redução de O_2 produzir radicais de vida relativamente curta, os superóxidos. Esses radicais de oxigênio não conseguem atravessar membranas biológicas, ficando confinados no compartimento onde foram gerados (SOARES; MACHADO, 2007).

Essas espécies incluem radical superóxidos (O_2^-), peróxidos de hidrogênio (H_2O_2), oxigênio singlete (1O_2) e o radical hidroxila (OH^-) (PASTORI; FOYER, 2002; APEL; HIRT, 2004; SCANDALIOS, 2005). Estes radicais são produzidos durante a atividade de transporte de elétrons, assim como por um número de vias metabólicas, causando danos em biomolécula, tais como lipídios das membranas, proteínas, pigmentos dos cloroplastos, enzimas, ácidos nucleicos e outros (VERMA; DUBEY, 2003).

É conhecido que as ERO aparecem continuamente durante a fotossíntese nos cloroplastos pela redução parcial da molécula de O_2 ou de transferência de energia entre eles. O principal local de produção O_2 é a membrana do tilacóide e o receptor primário de elétrons do PSI. A produção de ERO é uma consequência inevitável de respiração aeróbia (GILL; TUTEJA, 2010). O Oxigênio singlete, 1O_2 é o primeiro estado eletrônico excitado de O_2 e, é uma incomum ERO porque não está relacionada com a transferência de elétrons para O_2 . Uma insuficiente dissipação de energia durante a fotossíntese pode levar à formação de clorofila estado tripleto (Chl). Resultando na formação de um 1O_2 muito reativo. Verificou-se que a formação de 1O_2 durante a fotossíntese tem um poderoso efeito prejudicial na PSI e PSII, bem como sobre o todo o maquinário fotossintético.

O peróxido de hidrogênio é o resultado de uma redução de dois passos de oxigênio molecular (o primeiro passo levando a radical superóxido). Petrov; Breusegem (2012) afirmam que o H_2O_2 é um regulador de uma multiplicidade de processos fisiológicos

como o fortalecimento da parede celular, senescência (PENG et al, 2005), fotossíntese (NOCTOR; FOYER, 1998), abertura estomática (BRIGHT et al, 2006) e do ciclo celular (MITTLER et al, 2004). A multifuncionalidade de um lado, e o perigo que apresenta em elevadas concentrações por outro lado, requer a um rigoroso controle da concentração de H_2O_2 em células vegetais.

O oxigênio molecular é relativamente não reativo e não tóxico, devido a estrutura estável dos elétrons na sua camada externa. A produção de ERO é um processo metabólico normal, aproximadamente 1% do O_2 consumido pelo tecido vegetal é transformado em espécies reativas (BHATTACHARJEE, 2005). Portanto, o dano celular somente ocorrerá quando ocorrer alteração do equilíbrio redox, ou seja, desequilíbrio entre a produção de ERO e antioxidantes, resultando no estresse oxidativo (ASADA, 1994; GILL; TUTEJA, 2012). Entretanto, sua produção é aumentada como resultado de vários tipos de estresse biótico ou abiótico (FOYER et al., 1994). Exposição das plantas a deficiência hídrica, tem causado injúrias nos tecidos, decorrentes do aumento da produção de ERO (HEGEDÜS et al., 2001).

As plantas apresentam sistemas de defesa contra ERO bem desenvolvidos (FOYER; NOCTOR, 2005). Estes sistemas envolvem tanto a limitação da formação de ERO, bem como sua remoção. Em condições normais a formação e remoção de O_2 encontram-se em equilíbrio. No entanto, quando ocorre aumento na formação de ERO sob estresse condições, o sistema de defesa pode ser sobrecarregado (ALSCHER et al, 2002). Quando ocorre um desequilíbrio na produção de ERO e as plantas não são capazes de iniciarem o sistema de defesa por vias antioxidantes enzimáticas ou não enzimáticas (ALSCHER; HESS, 1993), mecanismos subjacentes a estes processos passam a atuar, porém ainda não são bem compreendidos. Portanto, as ERO podem ser vistas como indicadores celulares de estresse e como mensageiros secundários envolvidos na via de transdução de sinais na resposta ao estresse (MITTLER, 2002).

Havendo redução nas taxas de assimilação de CO_2 e de manutenção das taxas de transporte de elétrons, pode gerar uma sobrecarga de energia no aparato fotoquímico, resultando na produção de espécies reativas de oxigênio (ERO) (WAHID et al, 2007). Moller et al. (2007) relatam que quantidades mais elevadas de ERO ocasionam o estresse oxidativo ocasionando severas injúrias, como desintegração de clorofila,

fragmentação do DNA, extravasamento iônico, modificações protéicas, peroxidação de lipídios e, finalmente, morte celular.

A produção de ERO ocorre em diferentes organelas, nos produtos fotossintetizados são altos os riscos de danos oxidativos, devido a presença de oxigênio. Na luz os cloroplastos e peroxissomos são as principais fontes geradoras de EROs. No escuro, a mitocôndria parece ser o principal órgão gerador de ERO (FOYER; NOCTOR, 2005).

Segundo Caverzan (2008) a produção de ERO também pode ser evitada nas mitocôndrias e nos cloroplastos pelas enzimas oxidases alternativas que podem desviar elétrons da cadeia de transporte de elétrons e usá-los para reduzir o oxigênio a água. Essa estratégia permite, por um lado, evitar a formação de ERO e, por outro, diminuir a concentração de oxigênio celular. Moléculas antioxidantes, enzimas simples e um sistema mais complexo de detoxificação podem estar envolvidos na proteção celular contra o acúmulo de ERO.

4.6.2. Atividade enzimática

As plantas passam constantemente por diversas situações de estresses e conseguem modular respostas de defesa de forma a superar tais estresses e retornar ao metabolismo normal (SOARES; MACHADO, 2007).

Tolerância à deficiência hídrica, é definida como a adaptação da planta à condição menos favorável de disponibilidade hídrica. Apesar de não existir tolerância absoluta à deficiência hídrica, sabe-se que a planta possui diferentes mecanismos que minimizam o efeito desse estresse sobre a sua produtividade (EMBRAPA ARROZ E FEIJÃO, 2012).

O sistema de defesa enzimático é formado por enzimas capazes de remover, neutralizar ou limpar as ERO do interior das células de organismos vivos (SCANDALIOS, 1993; CAVALCANTI et al., 2004; MARTINS; MOURATO, 2008). Dentre as principais enzimas antioxidantes destacam-se a superóxido dismutase (SOD), a catalase (CAT), a peroxidase (POD), a ascorbato peroxidase (APX), as enzimas e metabolitos do ciclo da glutathiona ascorbato, e a glutathiona redutase - GR (ELSTNER; OSSWALD, 1994; BROETTO et al, 2003; GILL et al, 2011).

Nas plantas, as ERO são produzidas nas células de forma balanceada, entretanto, sob condições de estresse pode haver aumento na formação de ERO (ALSCHER et al., 2002). As ERO, além de indicadores celulares de estresse são mensageiras secundárias envolvidas em vias de transdução de sinal de resposta a estresse (ROSA, 2008). Blokhina et al., (2003) ressalta que as plantas respondem ao aumento de ERO elevando os processos antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos. Sabe-se que fatores químicos, mecânicos e influências biológicas, induzem a ativação dos processos oxidativos e anti-oxidativos, entretanto, os mecanismos envolvidos nesses processos ainda não foram esclarecidos (SAATH, 2010).

Segundo Henriques et al. (2001), a célula apresenta algumas maneiras de proteção contra os efeitos deletérios das ERO: a prevenção, evitando a formação de radicais livres; a interceptação, por meio da ação neutralizadora de enzimas antioxidantes, ou por moléculas de baixa massa molecular, como vitaminas C e E, carotenóides, entre outros.

Para uma planta ser tolerante a baixa disponibilidade hídrica, ela responde a essa condição por meio de uma rede complexa de vias metabólicas, estando conectadas por uma cadeia de processos bioquímicos que incluem percepção de sinal, transdução de sinal e regulação da expressão gênica em padrões espaciais e temporais (GORANTLA et al., 2007).

No entanto, o acúmulo de ERO em estresse oxidativo dependem do equilíbrio entre as taxas de produção e a capacidade do antioxidante do sistema de defesa (SILVA et al., 2010). Os mecanismos enzimáticos de eliminação de ERO abrangem um conjunto de enzimas antioxidantes, que catalisam reações de formação e regeneração de moléculas para a captura de EROs ou que estão envolvidas diretamente na sua remoção.

De acordo com Moldes, et al. (2006) distintas concentrações de silício promove a atividade de enzimas antioxidantes tais como a catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX), e superóxido dismutase (SOD), a variação dos níveis de peroxidação lipídica e as relações entre o mecanismo antioxidante das folhas e raízes de algodão com o uso de silício.

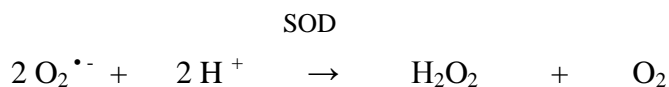
4.6.3. Superóxido Dismutase (EC 1.15.1.1)

Em plantas expostas a condições ambientais adversas foi evidenciada uma alta expressão da SOD como forma de proteção a um possível estresse (GUPTA et al., 1993). Dentro de uma célula, a superóxido dismutase (SOD) constitui a primeira linha de defesa contra EROs (GRATÃO et al., 2005). O oxigênio molecular é produzido em qualquer local onde a cadeia de transporte de elétrons está presente e, portanto, a ativação do O_2 pode ocorrer em diferentes compartimentos da célula (ELSTNER, 1991), incluindo mitocôndria, cloroplastos, microsomas, glioxissomos, peroxissomos, apoplasto e no citosol (CHAGAS, 2007). As SODs desempenham importante função na defesa contra a toxicidade causada pelas EROs, sendo desta forma consideradas importantes no mecanismo de tolerância ao estresse (SCANDALIOS, 2001).

SOD é a mais eficaz enzima antioxidante intracelular esta presente em todos os organismos aeróbios e em todos os compartimentos subcelulares propensos a ERO. Está bem estabelecido que vários estresses ambientais muitas vezes levem à geração de ERO, aumentando assim a produção de SOD. A SOD remove $O_2^{\bullet-}$ catalisando a sua dismutação, reduz o H_2O_2 na forma oxidada a O_2 (GILL; TUTEJA, 2010).

Com base no metal co-fator da enzima, as SODs são classificadas em três grupos: ferro (Fe-SOD), manganês (Mn-SOD), e cobre/zinco (Cu/Zn SOD), e estes estão localizados em diferentes compartimentos da célula. As enzimas Fe-SODs estão localizados no cloroplasto, as Mn-SOD na mitocôndria e no peroxissomo e as Cu-Zn SOD no cloroplasto, no citosol e, possivelmente, no espaço extracelular, algumas plantas contêm uma isoforma nos cloroplastos (TSANG et al., 1991; ALSCHER et al, 2002; CAVALCANTI et al., 2004).

Esta enzima catalisa a conversão de radicais livres de $O_2^{\bullet-}$ a H_2O_2 e O_2 , segundo a reação:



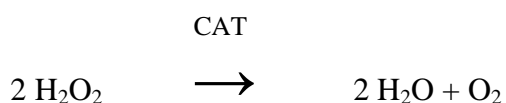
apresentando-se na forma de isoenzimas, as quais têm como função remover o radical superóxido ativo para proteger e levar as plantas a um estado de equilíbrio contra danos celulares causados pelas EROs (ELSTNER; OSSWALD, 1994).

4.6.4. Catalase (EC 1.11.1.6)

A catalase (CAT) é considerada juntamente com as SODs como as mais eficientes enzimas antioxidantes. Ambas as enzimas apresentam uma função combinada, de modo que a CAT converte o H_2O_2 , originado em função da atividade da SOD, em H_2O e O_2 (SCANDALIOS, 1993).

A CAT é uma enzima que elimina H_2O_2 através de uma dismutação bivalente, onde H_2O_2 é transformado em O_2 e H_2O . Alternativamente, as catalases em condições de baixas concentrações de H_2O_2 podem usar outros doadores de elétrons como o metanol, o etanol, o formoldeído, o ácido fórmico, ascorbato e fenóis. No entanto, dados cinéticos sugerem que a CAT mitocondrial é mais eficiente como peroxidase, enquanto que a CAT do peroxissomos é mais eficiente como dismutase (CHAUDIÉRE; FERRARI-ILIOU, 1999).

As catalases (CAT) são enzimas hemeoproteínas tetraméricas encontradas em todos os organismos aeróbios, localizam-se no citoplasma e nas organelas mitocôndrias e peroxissomos (VRANOVA et al., 2002). As CATs são importantes catalisadores que atuam como reguladoras dos níveis de H_2O_2 e sua atividade consiste na conversão de H_2O_2 em H_2O e O_2 , segundo a reação:



Desta forma, nos peroxissomos, a produção de H_2O_2 e $\text{O}_2^{\cdot*}$ deveriam ser adequadamente controladas pela CAT e APX, e pela SOD, respectivamente, sob condições fisiológicas normais (CORPAS et al., 2001). É uma das enzimas envolvidas na remoção de peróxidos tóxicos nas células quando estes estão em altas concentrações, pois apresenta baixa afinidade pelo H_2O_2 (Mittler, 2002). Contudo, o H_2O_2 é também tóxico para a célula e deve ser detoxificado pela catalase e ou peroxidases (DEUNER, 2007).

Porém, tem-se conhecimento de que a CAT é sensível à luz (HERTWIG et al., 1992), podendo neste caso ser inativada (SCHAFER; FEIERABEND, 2000) e levando a uma severa inibição da fotossíntese (ELSTNER; OSSWALD, 1994). Além

disso, esta fotoinibição da CAT pode ocorrer em situações de estresse promovidas por baixas ou elevadas temperaturas (FEIERABEND et al., 1992).

As plantas, assim como os animais, possuem diferentes isoformas de catalases que são codificadas por três genes: Cat1, Cat2 e Cat3 (SCANDALIOS, 1993). Tais genes são responsáveis pela codificação das isoenzimas Cat1, Cat2 e Cat3 que são expressos diferentemente, dependendo do tecido e de acordo com o estágio de desenvolvimento da planta (BAEK; SKINNER, 2003).

As Cat1 são responsáveis pela transformação do H₂O₂ produzida na fotorrespiração em H₂O e O₂ e estão localizadas no interior de peroxissomos (MENEZES-BENAVENTE et al., 2004), as Cat2 estão envolvidas no processo de lignificação e são encontradas nos tecidos vasculares (SCANDALIOS, 1993), e as Cat3 são as mais abundantes em sementes e em plantas jovens e têm a função de catalisar a degradação de moléculas de H₂O₂ formadas durante a β -oxidação de ácidos graxos e em peroxissomos de folhas verdes durante a fotorrespiração pela transformação do glicolato em glioxilato e estão localizadas no mesófilo das células (VAN BREUSENGEM et al., 2001).

Contudo, diferentes condições de estresse que suprimem a síntese protéica também podem promover inativação da CAT (SCHÄFER; FEIERABEND, 2000). As reações da catalase tornam-se mais importantes quando a concentração de H₂O₂ aumenta, pois em concentração normal de H₂O₂, este é reduzido pela glutatona e peroxidase (RICE-EVANS et al., 1991).

4.6.5. Ascorbato Peroxidase (EC 1.1.11.1)

A enzima ascorbato peroxidase (APX) é considerada a mais importante na eliminação de H₂O₂ no citosol e nos cloroplastos (INZÉ ; MONTAGU, 1995). É uma das principais enzimas do sistema de destoxificação de ERO nas plantas, catalisando a conversão do peróxido de hidrogênio em água, usando o ascorbato como doador de elétrons (CARVESAN, 2008).

Ela reage com o radical H₂O₂ formando ácido monodehidroascórbico e/ou dehidroascorbato. As formas reduzidas voltam a ácido ascórbico pela monohidroascorbato redutase e dehidroascorbato redutase usando redutores equivalentes como NAD(P)H ou glutatona (GHS). A GHS, por sua vez, é encontrada na maioria dos tecidos,

células e compartimentos celulares de plantas superiores. Seu nível diminui com o envelhecimento dos tecidos e varia entre os meios de crescimento. A glutathione é o agente redutor que recicla o ácido ascórbico de sua forma oxidativa para a sua forma reduzida pela enzima dehidroascorbato redutase. As enzimas que catalisam a síntese e degradação da GHS foram caracterizadas tanto nos compartimentos cloroplásticos quanto citoplasmáticos (TONIN, 2005).

Esta enzima utiliza o ascorbato como seu doador de elétrons específicos para reduzir H_2O_2 a água, constituindo parte do ciclo conhecido como ciclo da ascorbato-glutathione (SHIGEOKA et al., 2002). Este ciclo faz uso dos antioxidantes não enzimáticos como o ascorbato e a glutathione em uma série de reações catalisadas por quatro enzimas antioxidativas, e está bem demonstrado em cloroplastos, citosol e mitocôndrias de nódulos radiculares (POLLE, 2001).

Os componentes enzimáticos podem funcionar independentemente em diferentes compartimentos celulares ou, então, cooperarem um com o(s) outro(s). A APX protege as células contra o peróxido de hidrogênio sob condições normais, bem como em condições estressantes (CARVEZAN, 2008). O aumento da atividade da APX em resposta a estresses ambientais como salinidade, frio, intoxicação por metais, seca, calor, ozônio, alta intensidade luminosa e ataque por patógenos, entre outros, tem sido relatada em diferentes espécies de plantas (YOSHIMURA et al., 2000; SHARMA; DUBEY, 2004). Esses dados indicam que esta enzima desempenha papel importante na detoxificação de EROs produzidas em condições de estresses (SHIGEOKA et al., 2002).

4.6.6. Peroxidase (EC 1.11.1.7):

A enzima peroxidase (POD) são hemoproteínas de oxidoredutase, específicas para acceptor de hidrogênio (ALFENAS, 1998), e estão presentes em certas células animais, em microrganismos e em tecidos vegetais. São encontradas em diversas isoformas, que usam diferentes redutores e estão localizadas em diversos compartimentos celulares (CAMPA, 1991), como núcleo, mitocôndrias, ribossomos, paredes celulares e membranas celulares (HOAGLAND, 1990). As peroxidases desempenham um importante papel na biossíntese da parede celular, mas também estão envolvidas nas respostas ao estresse.

As peroxidases de plantas são classificadas em três classes: Classe I, que se encontra o citocromo c; a Classe II que inclui a peroxidase dependente de manganês e lignase, que são enzimas extracelulares fúngicas e a classe III que inclui as enzimas genericamente denominadas peroxidases e são secretadas para o exterior da célula ou transportadas para dentro de vacúolos (GASPAR et al., 1985; SIEGEL, 1993). Sob condições de estresse, as plantas tendem a aumentar a atividade da POD e, às vezes, é a primeira enzima a ter atividade alterada, independentemente do substrato utilizado ou do estresse aplicado (SIEGEL, 1993), atuando como um marcador bioquímico (ROSSI; LIMA, 2001). A reação da peroxidase quando a mesma molécula orgânica é doadora de elétrons (envolvendo um elétron cada) seria a seguinte:



Mesmo com a função ainda não bem esclarecida, as PODs desempenham funções como a catálise da oxidação e biossíntese de lignina, gerando H_2O_2 a partir de NADH (GOLDBERG et al., 1985), oxidação de compostos fenólicos (FRY, 1986) e inibição do crescimento através da oxidação do ácido indol-3-acético (HOAGLAND, 1990).

A atividade das POD é freqüentemente aumentada em resposta ao estresse, pois a proteção celular contra reações oxidativas é uma das principais funções dessa enzima. Isto se deve ao fato das PODs decompor o H_2O_2 produzido nas reações catalisadas pela SOD (BOR et al., 2003).

As PODs também apresentam função antioxidante em células vegetais expostas a condições de estresse, conforme observado por Knörzner et al. (1996). LIMA et al. (1998) observaram aumento da peroxidase em calos de arroz submetidos a estresse salino, concluindo que esta enzima poderia ser usada como parâmetro para identificar estresse fisiológico e que o aumento de sua atividade pode estar associado à habilidade de certos genótipos em degradar substâncias tóxicas como radicais livres, fenóis e outros liberados em condições de estresse.

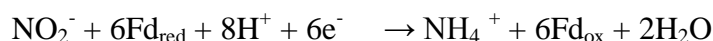
4.6.7. Nitrato Redutase

A nitrato redutase (NR), é a primeira enzima que atua no processo de assimilação do nitrogênio nas plantas, é responsável pela redução do nitrato a nitrito (KÖHLE et al., 2002), conforme a equação abaixo:



O NAD(P)H se refere a NADH ou NADPH (nicotinamida adenina dinucleotídeo reduzido). O NADH é o doador de elétrons para que a NR reduza o nitrato a nitrito, é o agente redutor na parte aérea das plantas (SOLOMONSON; BARBER, 1990; CELESTINO, 2006) e atua em conjunto com o molibdênio que é o co-fator desta enzima (VIEIRA et al., 1992; CAMPBELL, 1999). Nos tecidos não clorofilados, como raízes, o agente redutor pode ser tanto o NADH quanto o NADPH (WARNER; KLEINHOF, 1992; ARAUJO, 2011).

Qualquer fator que interfira na funcionalidade a enzima NR pode comprometer a transformação do N nítrico. A seqüência do metabolismo do N também é de suma importância, visto que, o nitrito é um íon altamente reativo e potencialmente tóxico. A toxidez por nitrito não ocorre porque as células vegetais transportam rapidamente o nitrito que foi originado pela redução do nitrato do citosol para o interior dos cloroplastos das folhas e nos plastídeos nas raízes (TAIZ; ZEIGER, 2004). Nessas organelas, a enzima nitrito redutase reduz o nitrito a amônio, conforme a equação:



Onde o Fd representa a ferredoxina e os símbolos subscritos red e ox, forma reduzida e oxidada, respectivamente. O amônio derivado da absorção pela raiz, ou produzido por assimilação do nitrato ou da fotorrespiração, é convertido a glutamina e glutamato pelas ações seqüenciais da glutamina sintetase e glutamato sintase, que estão localizadas no citosol e nos plastídeos das raízes ou dos cloroplastos (CELESTINO, 2006).

Alguns metabólitos nitrogenados, como o aminoácido prolina, tendem a acumular nos tecidos vegetais sob estresse hídrico. Como a assimilação do nitrogênio é

reduzida sob tais condições, pode-se supor que tais compostos se originam da rotatividade de proteínas. É neste contexto que as enzimas envolvidas na incorporação de amônia a compostos orgânicos, os quais podem agir como precursores para diferentes metabólitos, podem ter importante papel na sobrevivência de plantas durante estresse (FERREIRA et al, 2002).

Uma resposta fisiológica particularmente sensível à redução do potencial da água em plantas é a alteração da síntese protéica, associada à estruturação dos polissomas e aos processos de transcrição e tradução (MORILLA et al., 1973), podendo assim levar a degradação da nitrato redutase.

4.7. PARÂMETROS FISIOLÓGICOS

4.7.1. Conteúdo relativo de água (CRA)

O CRA é considerado como um indicador das condições hídricas da planta, que corresponde à quantidade de água no tecido, num dado instante, comparada com a máxima quantidade de água que ele poderá reter (ANGELOCCI, 2002).

Pincelli (2010) afirma que o controle das funções fisiológicas está diretamente relacionado com o conteúdo hídrico da planta e alterações no CRA afetam diretamente todo o aparato fotossintético. Se o período de seca for prolongado, a deficiência hídrica pode afetar a cultura, com redução na altura da planta, na taxa de crescimento relativo, o índice de área foliar, conteúdo relativo de água e na taxa fotossintética.

Para avaliar o grau de deficiência hídrica de uma planta é comum utilizar-se de variáveis relacionadas às folhas, como o conteúdo relativo de água foliar e o potencial hídrico, sendo este último o mais utilizado em estudos fisiológicos (ANGELOCCI, 2002).

Em estado de deficiência hídrica o aparato fotossintético pode apresentar variação de acordo com o cultivar. Colom; Vazzana (2003), estudando o CRA e a taxa fotossintética de cultivares da gramínea *Eragrostis curvula*, em que constataram que o cultivar tolerante exibiu maior atividade fotossintética associada à maior CRA em comparação o cultivar sensível submetidas à deficiência hídrica.

Dalmago (2004), estudando plantas sem irrigação, constatou que o maior conteúdo relativo de água sob plantio direto (PD) pode ser atribuído à maior disponibilidade de água às plantas. Marcum; Murdoch (1990), analisando tecido de plântula de

grama , com aumento da salinidade, verificaram que houve diminuição do conteúdo reativo de água, sinalizando que o ajuste osmótico não é resultado exclusivo da acumulação de soluto, como também da desidratação do tecido da planta ocasionado por um estresse.

Kunz et al (2007), em experimento com milho e deficiência hídrica verificaram que os baixos valores de conteúdo relativo de água nos tratamentos não irrigados podem ser atribuídos à combinação de elevada demanda evaporativa com baixa disponibilidade hídrica do solo.

4.7.2. Deficiência hídrica e Trocas gasosas

Quando a planta está sujeita a um estresse hídrico, muitos de seus processos fisiológicos são atingidos, como abertura estomática, fotossíntese, síntese de proteínas, atividade enzimática e hormonal. Sendo o arroz uma cultura que apresenta elevada exigência em água por unidade de fitomassa produzida (MACHADO; LAGÔA, 1994), a ocorrência de deficiência hídrica, mesmo que moderada, provoca grande instabilidade na produção, em função dos vários processos fisiológicos direta ou indiretamente atingidos (PUPATTO, 2003).

As trocas gasosas atuam no balanço energético das folhas, participando da regulação de sua temperatura, de maneira a deixá-la dentro da faixa de valores adequados aos processos fisiológicos das plantas e de adaptação destas ao ambiente. O controle da transpiração é realizado pelo fechamento estomático, que é o único processo no *continuum* solo-planta-atmosfera que possui essa resposta instantânea (PINCELLI, 2010).

Sugere-se que as plantas estão dotadas com um sistema efetivo para controlar a ação deletéria de radicais livres como o H_2O_2 , O_2 , OH^- (BROETTO et al. 2002). Plantas expostas a condições de estresse, notadamente o hídrico, podem apresentar acúmulo de substâncias como prolina e poliaminas. O acúmulo desses compostos sob deficiência hídrica tem sido associado com a tolerância das plantas a essa condição desfavorável, podendo representar um mecanismo regulador de perda de água mediante aumento da osmolaridade celular (FUMIS; PEDRAS, 2002) e também como marcadores bioquímicos de alterações metabólicas geradas por diferentes tipos de estresse (LIMA et al., 2004). Como também redução da taxa fotossintética (CHAVES, et al., 2009), decréscimo no potencial hídrico

(SOUZA, et al., 2001); síntese de novas proteínas e mRNAs; prevenção da esterilidade do pólen e do aborto do embrião durante o florescimento (KOZLOWSKI; PALLARDY, 2002).

Plantas submetidas à deficiência de água no solo podem caracterizar-se por apresentar reduções da produção de folhas, da área foliar, o fechamento estomático, acelerada senescência e a abscisão foliar, o crescimento da raiz para regiões mais profundas do solo em busca de maior umidade, aumentando a relação raiz/parte aérea, e a redução da matéria seca (TAIZ; ZEIGER, 2004). A inibição da fotossíntese induzida pelo estresse hídrico pode ser devida à limitação estomática, como verificado em quatro diferentes espécies de gramíneas, por Ghannoum et al. (2003).

De acordo com Cerqueira (2011), o metabolismo do carbono nas plantas está vinculado à atmosfera através das trocas gasosas onde, durante a fotossíntese, as plantas absorvem CO_2 e liberam O_2 enquanto que no processo respiratório e na fotorrespiração as trocas gasosas são invertidas. Em plantas iluminadas, a fotossíntese aparente ou fotossíntese líquida resulta do consumo de CO_2 no ciclo de Calvin subtraído do CO_2 liberado na respiração e fotorrespiração.

O transporte de elétrons do PSI e PSII durante a fotossíntese depende do tipo de célula e condições ambientais. No caso de plantas C_3 (arroz) em condições de crescimento, a função principal do fluxo de elétrons no PSI é o aumento da produção de ATP em relação à NADPH a fim de equilibrar o balanço de energia do cloroplasto. Embora muitas questões fundamentais permaneçam sobre os componentes envolvidos no fluxo de elétrons e o grau em que esta via opera em Plantas C_3 , há um consenso geral de opinião de que o fluxo de elétrons é um componente essencial dos mecanismos de cloroplasto, que servem para coordenar e equilibrar o metabolismo energético do estado redox (FOYER; SHIGEOKA, 2011).

Em condições de estresse hídrico, as trocas gasosas podem apresentar alterações de forma distinta, de acordo com a espécie, tanto por limitações difusivas, restringindo a disponibilidade de dióxido de carbono para assimilação, quanto por limitações metabólicas, pelo aumento do efeito foto-inibitório (GLAZ et al., 2004).

Segundo Taiz; Zeiger (2004) torna-se necessário conhecer os mecanismos fisiológicos e bioquímicos de resposta da espécie em relação ao estresse hídrico. Portanto, todos os fatores ambientais que interferem no mecanismo de absorção e assimilação

de água e nutrientes, terão influência negativa sobre o metabolismo da planta, diminuindo o crescimento e a produtividade das culturas.

Com foco na característica tolerância à deficiência hídrica, alguns cultivares tradicionais de arroz têm evoluído mecanismos que transmitem tolerância não só à deficiência hídrica como também a outros estresses abióticos (PESSOA FILHO, 2008).

Para proteger o aparato fotossintético do estresse oxidativo, as plantas necessitam dissipar o excesso de energia, produzindo, assim, aumento de substâncias e enzimas antioxidantes. Nesse sentido, o sistema de defesa anti-oxidativo tem papel fundamental na aquisição de tolerância pelas plantas. A possível função dessa resposta é a proteção do aparato fotossintético, a preservação da integridade de membranas e a proteção de DNA e de proteínas (CHAGAS, 2005). O sistema de SOD-APX-CAT protege a maquinaria fotossintética de danos oxidativos em plantas expostas a condições de ERO (CAVALCANTI et al., 2004).

De acordo com Vítolo e Souza (2012), quando a planta sofre algum tipo de estresse a fotossíntese, e respiração, o transporte de elétrons pela membrana e a atividade enzimática são reduzidas, quando a integridade funcional dos cloroplastos e membranas mitocondriais são afetados.

Para Epstein (1994), o silício está envolvido em vários aspectos estruturais, fisiológicos e bioquímicos, portanto, o de promover melhorias no metabolismo, ativar genes de produção de fenóis e enzimas relacionadas com mecanismos de defesa da planta. A aplicação de silício ajuda a manter a estabilidade redox de plantas submetidas a estresse salino (AL-AGHABARY et al, 2004) mantendo a atividade de enzimas antioxidantes ao nível de controle sem estresse.

5. MATERIAL E MÉTODOS

Foram conduzidos dois experimentos, no primeiro utilizaram-se dois cultivares de arroz o Curinga e o IAC 202.

5.1. Localização dos experimentos

A pesquisa foi conduzida no Departamento de Engenharia Rural – Energia na Agricultura – UNESP, Campus de Botucatu, São Paulo, em casa de vegetação. O solo utilizado foi um Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 1997), coletado na Fazenda Experimental Lageado, na gleba denominada de “Patrulha”.

5.2. Delineamento experimental

O delineamento experimental foi em blocos casualizados em esquema fatorial 4 tensões x 2 corretivos, com 4 repetições, no total de 4 blocos com 16 vasos, totalizando 64 vasos. Os tratamentos foram constituídos por quatro potenciais mínimos de água no solo (-10, -30, -50 e -70 kPa) combinadas com duas formas de correção da saturação do solo (ausência e presença de silício). Os corretivos utilizados foram misturados ao solo o calcário dolomítico e silicato de cálcio e magnésio, em vasos de cor preta com 17 kg de solo.

5.3. Instalação e condução dos experimentos

Antes da implantação do experimento foi realizada a caracterização química do solo (Tabela 1). Essa caracterização foi realizada com o objetivo de estabelecer a quantidade de corretivo para elevação da saturação por bases a 50%, que é a saturação

recomendada para a cultura do arroz (CANTARELLA; FURLANI, 1997) e ao mesmo tempo para constituição dos tratamentos com ausência e presença de Si.

Juntamente com a aplicação dos corretivos para correção de acidez e elevação da saturação foi realizada a fertilização do solo, com 150 mg dm^{-3} de **P** e 80 mg dm^{-3} de **K**, nas formas de super fosfato triplo e cloreto de potássio, respectivamente.

Após a aplicação dos corretivos e fertilizantes o solo foi incubado durante 30 dias, com umidade na capacidade máxima de retenção de água. Após a incubação, foi realizada novamente a caracterização química do solo (Tabela 1) de acordo com a metodologia proposta por Raij et al. (2001).

Tabela 1. Atributos químicos do solo antes e após a incubação com calcário e silicato de cálcio e magnésio. Botucatu-SP, 2012.

Corretivos de acidez	Si g dm^{-3}	pH	M.O.	P (resina)	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V
		CaCl_2	g dm^{-3}	mg dm^{-3}	-----	$\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$	-----	%			
Sem correção	4	4,0	14	7	73	0,4	5	2	7,4	80	34
Calcário	6	4,6	16	44	51	3,5	34	11	48	99	49
Silicato	8	4,6	20	50	52	3,4	27	19	49	101	49

*Si: silício, pH: potencial de hidrogênio, M.O.: matéria orgânica, P: fósforo, H: hidrogênio, Al: alumínio, K: potássio, Ca: cálcio, Mg: magnésio, SB: soma de base, CTC: capacidade de troca catiônica, V: saturação de base.

As unidades experimentais foram instituídas por vasos com capacidade para 17 litros de solo. A quantidade do solo nos vasos foi padronizada mediante pesagem, foram colocados 15 kg de solo em cada vaso.

A semeadura do arroz foi realizada no início de fevereiro de 2010, com 20 sementes por vasos e após a emergência foram mantidas as 8 plantas mais uniformes. Após a emergência das plantas, foram fornecidos os micronutrientes junto com a reposição de água aos vasos. As quantidades aplicadas foram: $2,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de B; $3,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de Mn; $10,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de Zn e $1,5 \text{ mg dm}^{-3}$ de Cu, fornecidos nas formas de H_3BO_3 , MnSO_4 , ZnSO_4 , CuSO_4 , respectivamente. O nitrogênio também foi fornecido com a água de irrigação na forma de sulfato de amônio. Foram aplicados 80 mg dm^{-3} de N em duas épocas. A primeira aplicação foi realizada aos 15 dias após emergência (DAE) e a segunda aos 30 DAE. Até os 30 DAE os vasos foram mantidos na capacidade de campo -10 kPa.

Os tratamentos com restrição hídrica foram iniciados aos 30 dias após a emergência e mantidos até a colheita. As lâminas de água utilizadas constaram de um

tratamento controle (-10 kPa) e deficiência hídrica leve, moderada e severa, que corresponderam a -30, -50 e -70 kPa, respectivamente. Os volumes de água para cada potencial hídrico foram determinados pela curva da capacidade de retenção de água do solo. Esse parâmetro foi determinado no laboratório de hidráulica do Departamento de Engenharia Rural, Unesp/Botucatu. A metodologia utilizada foi a de placas de pressão recomendada por Richards (1949) e Topp et al., (1993) Tabela 2. A tensão de água no solo foi controlada mediante pesagem diária de todos os vasos em todos os tratamentos, para o cálculo do volume de reposição da água evapotranspirada.

Tabela 2. Relações entre teores de água e potenciais de água do solo (base massa seca) utilizados no experimento.

		Potencial hídrico solo (Kpa)					
		Saturado	-10	-30	-50	-100	-150
Teor de água	24	15	12	11,2	10,3	8,3	

5.4. Avaliações biométricas

A cada coleta, foi realizado um desbaste eliminando uma planta a cada coleta, sendo que ao final ficaram apenas quatro plantas para análises agronômicas.

5.4.1. Matéria seca da parte aérea

Foram realizadas coletas durante três fases (perfilhamento, florescimento e enchimento de grãos) para análise da parte aérea da planta sendo posteriormente pesado, seco em estufa a 60°C até peso constante, com pesagem final e determinado a massa de matéria seca.

5.4.2. Altura de plantas

Foram feitas determinações de altura das plantas, uma planta por vaso, no final do experimento, sendo que as plantas foram medidas do colo até o ápice da haste maior.

5.5. Teor de silício na planta

As coletas das plantas para determinação do Si na parte aérea foram realizadas em duas épocas (Tabela 3). A primeira coleta foi realizada antes das plantas passarem pela deficiência hídrica (perfilhamento). A segunda coleta foi realizada na fase de florescimento por ser a fase mais indicada para determinação de nutrientes na parte aérea das plantas. A análise foi realizada no laboratório de análise foliar do Departamento de Produção Vegetal, FCA/UNESP, conforme metodologia descrita por Malavolta et al (1997).

Tabela 3. Épocas de coleta de folhas para determinação do teor de silício nas folhas.

COLETA	*DAE	**DADH / ESTÁDIO FENOLÓGICA
Primeira	30	0 - Perfilhamento
Segunda	70	40 - Florescimento

*DAE – dias após a emergência; **DADH – dias após a deficiência hídrica.

Para análise de silício foi utilizada a parte aérea da planta de arroz (colmo + folhas), que foi coletada no final do experimento. O material foi seco em estufa a 60°C até atingir peso constante, moído e acondicionado em embalagens plásticas. Utilizou-se a metodologia descrita por Elliott; Snyder (1991) adaptada por Korndörfer et al. (1999c).

Amostras de 0,1000g da parte aérea foram colocadas em tubos plásticos, seguida do acréscimo de 2 ml de H₂O₂ p.a (30%) e 3 ml de NaOH (1:1) para digestão. Os tubos foram agitados e colocados na autoclave por um período de 1 hora a 123°C e 1,5 atm de pressão.

Uma alíquota de 5 ml do sobrenadante foi retirada dos tubos e colocada em copos plásticos. Em seguida acrescentaram-se 15 ml de água destilada, 1 ml de HCL (1:1) e 2 ml de molibdato de amônio, seguido de uma leve agitação. O Si presente no material transforma-se em H₄SiO₄ que desenvolve a cor amarela na presença do agente complexante, que é o molibdato de amônio em meio ácido (FARIA, 2000).

Depois de 5 a 10 minutos, adicionou-se 2 ml de ácido oxálico, procedendo-se novamente uma leve agitação. A leitura foi feita em espectrofotômetro no comprimento de onda de 410nm.

5.6. Parâmetros bioquímicos

As análises bioquímicas foram realizadas durante o ciclo fenológico das plantas (Tabela 4). Acompanhando a atividade metabólica das enzimas envolvidas no mecanismo de desintoxicação das ERO.

Tabela 4. Épocas de coleta de folhas para realização das análises bioquímicas.

COLETA	*DAE	**DADH / ESTÁDIO FENOLÓGICA
Primeira	30	0 - Perfilhamento
Segunda	50	20 - Emborrachamento
Terceira	70	40 - Florescimento
Quarta	84	54 - Enchimento de grãos

*DAE – dias após a emergência; **DADH – dias após a aplicação de deficiência hídrica.

5.6.1. Análise de Pigmentos

Foram utilizados discos foliares frescos com 1,04 cm² de diâmetro os quais foram mantidos tubos de ensaio contendo 1 mL de dimetil formamida (DMF) por 24 h no escuro, para extração dos pigmentos. Após a incubação, a solução contendo os pigmentos foi submetida a leitura de densidade ótica em espectrofotômetro nos comprimentos de onda 480; 646,8 e 663,8 nm. Os teores de clorofila foram determinados a partir de fórmulas específicas, descritas por LEE et al., (1987).

Clorofila *a* = (12 x A_{663,8} – 3,11 x A_{646,8}) ; Clorofila *b* = (20,76 x A_{646,8} – 4,88 x A_{663,8})

Carotenóides = (1000 x A₄₈₀ – 1,12 Clorofila *a* – 34,07 Clorofila *b*) / 245,

Onde, A é a absorbância no comprimento de onda indicado.

5.6.2. Atividade enzimática

A coleta do material vegetal (folhas) para as análises bioquímicas foram realizadas em quatro épocas diferentes, conforme estágio fenológico das plantas (Tabela 4).

Conforme o ciclo da cultura do arroz, as coletas serão realizadas durante as três fases do ciclo do arroz (C1 – estágio de plântula, C2 – estágio vegetativo e C3 – estágio reprodutivo).

As amostras foram moídas na presença de Nitrogênio líquido, até a obtenção de um pó fino. Após pesagem, as amostras foram armazenadas em frascos Eppendorf, em ultrafreezer a -80°C .

O extrato para as análises enzimáticas foi obtido pela ressuspensão do material vegetal (300 mg) em 5,0 mL de tampão fosfato de potássio 0.1 M, pH 7,8.

Após centrifugação por 10 minutos a 5.000 x g, o sobrenadante foi coletado e armazenado em ultrafreezer a -80°C .

5.6.2.1. Superóxido dismutase (E.C. 1.15.1.1)

A determinação da atividade da SOD considera a capacidade da enzima em inibir a fotorredução do NBT (Azul de nitrotetrazólio cloreto). A atividade foi determinada pela adição de 50 μL de extrato bruto a uma solução contendo 13 mM de metionina, 75 μM de NBT, 100 nM de EDTA e 2 μM de riboflavina em 3,0 ml de tampão fosfato de potássio 50 mM, pH 7.8.

A reação foi iniciada pela iluminação dos tubos, em câmara composta por tubos fluorescentes (15 W), a 25°C . Após 5 minutos de incubação, o final da catálise foi determinada pela interrupção da luz (GIANNOPOLITIS; RIES, 1977). O composto azul formado pela fotorredução do NBT, determinado pelo incremento na absorção a 560 nm. Os tubos considerados brancos para a análise, receberam os mesmos reagentes, porém foram mantidos cobertos com papel alumínio, portanto, abrigados da luz. Uma unidade de SOD foi definida como a quantidade de enzima necessária para a inibição de 50% da fotorredução do NBT. Para o cálculo da atividade específica da enzima, considera-se a percentagem de inibição obtida, o volume da amostra e a concentração de proteína na amostra ($\mu\text{g} / \mu\text{L}$).

5.6.2.2. Catalase (E.C. 1.11.1.6)

A atividade da enzima catalase foi determinada por medição em um aparelho espectrofotômetro a um comprimento de onda de 240 nm pelo monitoramento da variação da absorção do peróxido de hidrogênio, conforme Peixoto *et al.* (1999). Para o teste, foi adicionado 50 μL de extrato bruto a 950 μL de um tampão fosfato de potássio 50 mM, pH 7,0 suplementado com peróxido de hidrogênio a uma concentração final de 12,5 mM. A variação de absorção (ΔE) foi calculada em um intervalo de 90 s, sendo a atividade da enzima

calculada utilizando-se um coeficiente de extinção molar $\varepsilon = 39,4 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$. A atividade específica ($\mu\text{Kat } \mu\text{g Prot}^{-1}$) da catalase, levou-se em consideração a concentração de proteína solúvel no teste.

5.6.2.3. Peroxidase (EC 1.11.1.7)

A atividade da enzima POD foi determinada a partir da diluição (1:25) de 100 μL de extrato bruto e adicionados a 4,9 mL de solução tampão fosfato de potássio 25 mM, pH 6,8 contendo 20 mM de Pyrogallol e 20 mM H_2O_2 . Após incubação por 1 minuto a reação foi paralisada com 0,5 mL de H_2SO_4 e a leitura da absorbância feita a 420 nm. Para o cálculo da atividade específica ($\mu\text{Kat } \mu\text{g}^{-1}$ de proteína) da enzima POD foi utilizado um coeficiente de extinção molar de $2,47 \text{ mM cm}^{-1}$ (PEIXOTO et al. 1999).

5.6.2.4. Ascorbato Peroxidase (E.C. 1.11.1.11)

Para a análise da atividade da enzima APX, inicialmente prepara-se uma solução de trabalho contendo uma alíquota de 100 μL de extrato bruto com 2,9 mL de tampão fosfato de potássio 50 mM, pH 6,0 (volume final de 3,0 mL). A esta solução acrescenta-se ascorbato e peróxido de hidrogênio, em concentração final de 0,8 e 1,0 mM, respectivamente. A determinação da variação da extinção, é efetuada a 290 nm, sendo que a atividade específica da enzima ($\mu\text{Kat } \mu\text{g Prot}^{-1}$) deve ser calculada a partir de um coeficiente de extinção molar de $2,8 \text{ mM cm}^{-1}$ (KOSHIBA, 1993).

5.6.2.5. Nitrato Redutase

Pesou-se 200 mg de tecido foliar (provenientes do terço médio). A matéria fresca pesada foi colocada em tubos de ensaio com 5 mL de solução de incubação (JAWORSKI, 1971). Esta solução foi constituída por tampão fosfato (KH_2PO_4 0,1 M; pH 7,5), KNO_3 (0,1M), n-propanol (3% v/v) e NADH (β -nicotinamida adenina dinucleotídeo, forma reduzida). O n-propanol foi usado para aumentar a permeabilidade celular ao nitrato e ao nitrito. O NADH foi utilizado como doador de elétrons para ativação da enzima nitrato redutase. Isto foi necessário porque o congelamento das amostras em nitrogênio líquido inativou o NADH presente naturalmente na planta. O tecido vegetal, submerso na solução de

incubação, foi infiltrado à vácuo durante um minuto com descanso de 30 segundos. Este procedimento foi repetido três vezes e teve por finalidade aumentar a penetração da solução nos tecidos.

Após a infiltração, os tubos foram cobertos com papel alumínio e mantidos, na ausência de luz, em banho-maria a 30 °C, por 30 minutos. Finalizada a incubação efetuou-se a filtragem do material. O material filtrado foi diluído oito vezes em tampão fosfato. Desta diluição retirou-se uma alíquota de 1 mL a qual foi adicionado 1 mL de sulfanilamida 1% (para interromper a reação) e 1 mL de N-naftil-etilenodiamino 0,02%. Após a adição destes reagentes procedeu-se a leitura de absorbância em espectrofotômetro a 540 nm. A atividade da enzima foi expressa em $\mu\text{moles de NO}_2^-$ liberados por grama de matéria fresca na solução de incubação no período de uma hora ($\mu\text{moles de NO}_2^- \text{h}^{-1} \text{gmf}^{-1}$), com base na curva padrão de NaNO_3 (0, 5, 10, 20, 25, 40 e 50 μM) de acordo com a metodologia proposta por Jaworski (1971).

5.7. Parâmetros fisiológicos

A coleta das plantas para as análises fisiológicas e/ou avaliações fotossintéticas (trocas gasosas) foram realizadas em três épocas diferentes (Tabela 5).

Tabela 5. Épocas de coleta de folhas para realização das análises fisiológicas.

COLETA	*DAE	**DADH / ESTÁDIO FENOLÓGICA
Primeira	30	0 - Perfilhamento
Segunda	50	20 - Emborrachamento
Terceira	70	40 - Florescimento

*DAE – dias após a emergência; **DADH – dias após a deficiência hídrica.

5.7.1. Conteúdo Relativo de água

Coletou-se dois discos foliares (0,69 cm^2 cada) e determinou-se a massa de matéria fresca dos mesmos (W_f) em balança analítica (Tecnal Equip. Lab., Piracicaba, SP, Brasil). A massa do tecido túrgido (W_t) foi obtida após a hidratação dos discos por 24 h em água deionizada. Após este tempo, retirou-se o excesso de água com lenço de papel dos discos túrgidos para determinar a massa do tecido túrgido. A massa do tecido seco (W_d) foi obtida depois que os discos foram secos por 48 h a 80°C em estufa de circulação de

ar forçada. CRA foi calculado por intermédio de fórmula, conforme a metodologia apresentada por Jamaux et al. (1997):

$$CRA = [(Wf - Wd) \cdot (Wt - Wd) - 1] \times 100$$

5.7.2. Medidas de trocas gasosas

As medidas de trocas gasosas foram realizadas com sistema aberto portátil de fotossíntese, com analisador de CO₂ e vapor d'água por radiação infra-vermelha ("Infra Red Gas Analyser – IRGA", modelo LI-6400, LI-COR). O IRGA mede a diferença entre a concentração de CO₂ e vapor d'água do ar, ao sair das câmaras denominadas amostra (onde está inserida a folha) e referência (sem folha), obtendo-se as concentrações de CO₂ e de vapor d'água que foram assimilados (assimilação de CO₂) e liberados (transpiração de vapor d'água) pelos estômatos da folha, respectivamente.

Este sistema aberto portátil de fotossíntese permitiu determinar às seguintes variáveis:

- Taxa líquida de assimilação de CO₂ (*A*), μmol CO₂ m⁻² s⁻¹,
- Condutância estomática (*g_s*), mmol m⁻² s⁻¹,
- Taxa de transpiração (*E*), mol m⁻² s⁻¹,

As medidas de trocas gasosas foram efetuadas sob condições naturais, em dias claros e sem nuvens em horário estabelecido de forma padrão, às 10:00 h (horário solar). As avaliações foram feitas em todas as plantas de todos os tratamentos (n=16), sendo duas folhas por planta colocada dentro da câmara, sempre na região mediana da folha mais recentemente expandida. Cada folha permaneceu em equilíbrio dentro da câmara por 1 a 2 minutos, antes do registro dos valores. Tais medições foram realizadas durante todo o ciclo, nos diferentes estádios fenológicos da cultura (emborrachamento, florescimento e maturação).

5.8. Produção de grãos

A produtividade de grãos foi obtida pela colheita das panículas de uma planta por vaso. A trilha dos grãos (das panículas) foi realizada manualmente. Os grãos

passaram por um processo de limpeza para a separação da palha e das espiguetas chochas. Após esta operação, os grãos foram pesados e em seguida calculou-se a produtividade em gramas por planta.

5.9. Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância. As médias dos tratamentos com e sem silício foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% pelo programa SISVAR.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. ANÁLISES BIOMÉTRICAS

6.1.1. MATÉRIA SECA DA PARTE AÉREA

A matéria seca de ambos os cultivares foi influenciada apenas pela tensão de água no solo (kPa) na fase de enchimento de grãos (Tabela 6). Para o cultivar Curinga observou-se que para a tensão de água no solo de -10 kPa a matéria seca da parte aérea foi de 57 g planta⁻¹ com aplicação de calcário e 62 com aplicação de silício. Quando as plantas foram submetidas a -70 kPa a matéria seca foi 26 e 31 g planta⁻¹, para o calcário e silicato respectivamente (Figura 1A e Tabela 22 – Anexos). Para o cultivar IAC 202 a produção de matéria seca com -10 kPa foi 45 g planta⁻¹ com aplicação de calcário e 47 com aplicação de silício. Quando as plantas foram submetidas -70 kPa a matéria seca foi 26 e 28 g planta⁻¹, para o calcário e silicato respectivamente (Figura 1B e Tabela 22 – Anexos).

De acordo com Oliveira et al. (1996), um período de deficiência hídrica moderada ocasionou decréscimo de 14,7% na matéria seca do arroz de sequeiro. A maior tensão de água no solo reduziu a produção de matéria seca (Figura 1), afetada pela condição simulada de deficiência hídrica e variando de cultivar para cultivar (GUIMARÃES et al, 2006).

Tabela 6. Análise da variância e coeficiente de variação para matéria seca da parte aérea do cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em três épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Variáveis	Fase fenológica		
	Perfilhamento	Florescimento	Enchimento de grãos
		Curinga	
Corretivo¹	ns	ns	ns
kPa²	ns	ns	**
Corretivo*kPa	ns	ns	ns
CV³	15	13	11
		IAC 202	
Corretivo¹	ns	ns	ns
kPa²	ns	ns	**
Corretivo*kPa	ns	ns	ns
CV³	16	15	18

¹Calcário e Silício; ²Tensão de água no solo; ³Coeficiente de variação; ns e ** = não significativo e significativo a 1% de probabilidade, respectivamente.

Embora fossem instalados experimentos independentes para cada cultivar de arroz, observou-se que, em condição de baixo déficit hídrico, o cultivar Curinga produziu maior quantidade de matéria seca em relação ao IAC 202. No entanto, esta diferença foi diluída a medida que a restrição de água no solo foi maior (Figura 1A e 1B). Ressalta-se também que na terceira coleta os valores de matéria seca tenderam a ser maiores quando o corretivo utilizado foi o silicato. Esse comportamento foi observado para os dois cultivares de arroz em todas as tensões de água no solo (Tabela 22 - anexos). Resultados semelhantes foram encontrados por Junior et al (2009), estudando a produção de matéria seca em cultivares de arroz com aplicação de silício. Os autores observaram que o cultivar Curinga mostrou-se superior em relação ao outro cultivar avaliado.

Existem variações entre cultivares quanto a resistência períodos com deficiência hídrica (HERNANDES et al., 2010). Cultivares de diferentes cruzamentos genótipos se adaptam as modificações e ambiente de diversas maneiras. Os cultivares aqui estudados apresentaram variação em relação a tolerância à deficiência hídrica.

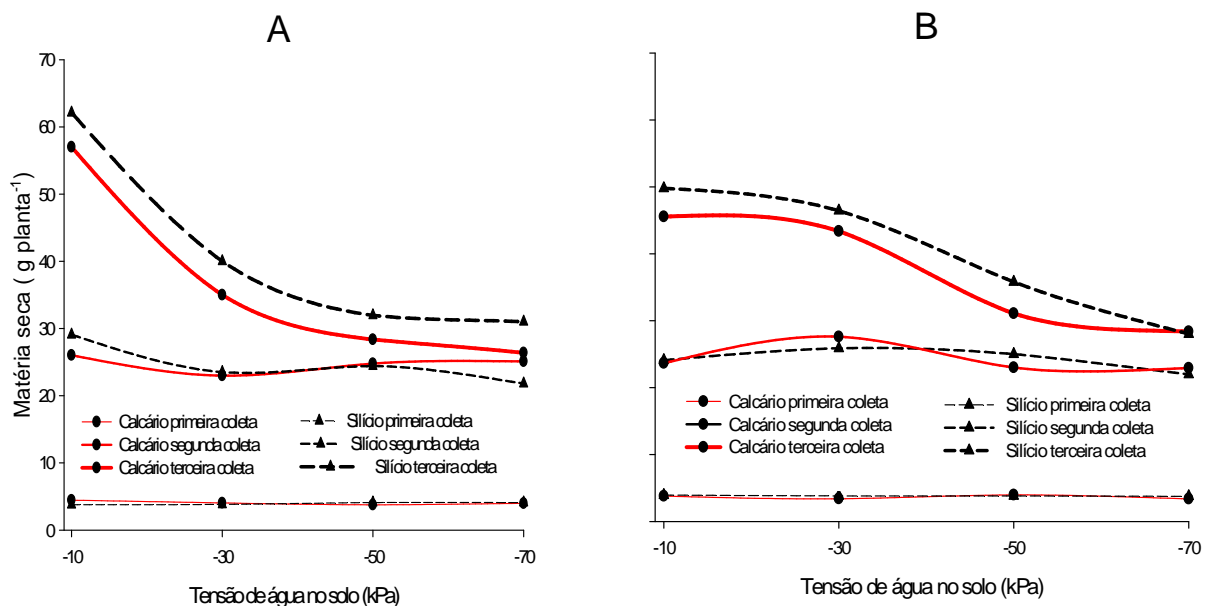


Figura 1. Matéria seca da parte aérea do cultivar Curinga (A) e do cultivar IAC 202 (B), em função do manejo de água e silício, no final de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

6.1.2. ALTURA DE PLANTAS

Para altura de plantas observa-se na Tabela 7, o desdobramento da interação com e sem silício nas diferentes tensões de água. Houve efeito significativo para tensão de água no solo e para corretivos. O efeito para o cultivar Curinga foi observado apenas com -70 kPa e para cultivar IAC 202 para as tensões de água no solo de -50 e -70 kPa (Figura 2 e Tabela 23 – anexo). Quando houve efeito de corretivo, a maior altura das plantas foi observada com a aplicação de silício. Nas tensões mais leves -10 e -30 kPa o Curinga apresentou maior altura, porém nas tensões maiores houve decréscimo (Figura 2).

Tabela 7. Análise da variância e coeficiente de variação para altura dos cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, na fase de florescimento. Botucatu (SP), 2012.

Variáveis	Cultivar	
	Curinga	IAC 202
Corretivo ¹	*	*
kPa ²	**	**
Corretivo*kPa	*	*
CV ³	12	10

¹Calcário e Silício; ²Tensão de água no solo; ³Coeficiente de variação; ns e ** = não significativo e significativo 1% de probabilidade, respectivamente.

Estes resultados corroboram com os de Yoshida et al., (1969); Takahashi, (1995); Faria, (2000), que observaram aumento da altura de plantas com adição de silício. Esse aumento da altura deve-se ao maior comprimento da lâmina foliar de plantas adicionadas com silício (Foto 1 e 2 – Anexos).

É notável a redução da altura nas maiores tensões de água (Figura 2). Kramer (1994) relata que essa redução, provavelmente, ocorre devido a menor expansão celular e à diminuição da turgescência das células sob condições de déficit hídrico. Resultados semelhantes em cultivares de arroz foram encontrados por Mauad (2003; 2006), Arf (2001), Crusciol et al. (2003 a) e Crusciol et al. (2003b).

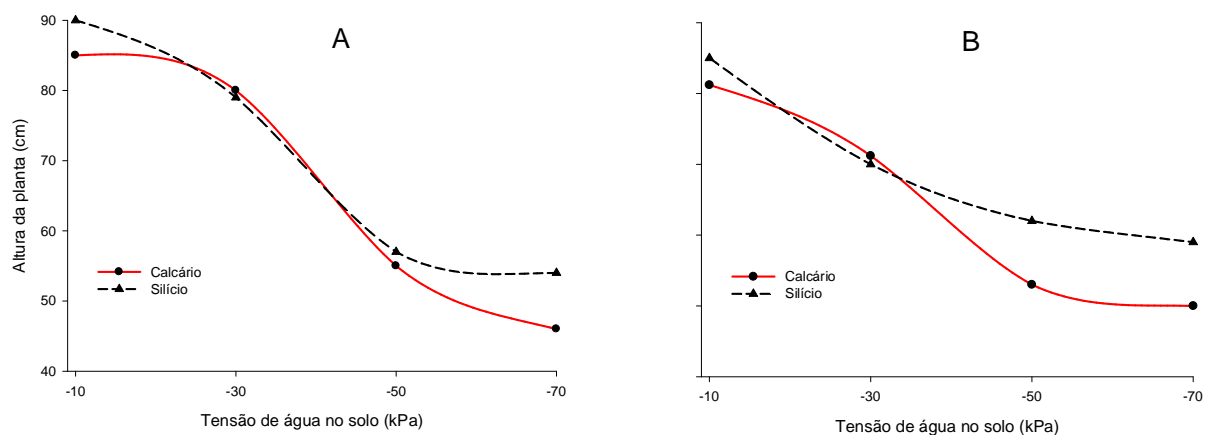


Figura 2. Altura das plantas do cultivar Curinga (A) e do cultivar IAC 202 (B), em função do manejo de água e silício. Botucatu (SP), 2012.

6.2. TEOR DE Si

De acordo com a Tabela 8 houve diferença no teor de Si em função dos corretivos utilizados para ambos os cultivares. A adubação com silício proporcionou maior teor deste nutriente em relação ao já existente no solo. No entanto, a diferença entre os corretivos foi observada na fase de florescimento (Figura 3 e Tabela 24 - anexos).

Esses resultados concordam com os de Oliveira (2009) que avaliando os níveis de absorção de silício em arroz, verificou que as plantas de arroz absorveram cerca de 5% do silício disponível na primeira semana de cultivo, porém no final do cultivo a extração foi de 90% do silício disponível na solução nutritiva.

Tabela 8. Análise da variância e coeficiente de variação para o teor de Si da parte aérea do cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em três épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Variáveis	Fase fenológica	
	Perfilhamento	Florescimento
	Curinga	
Corretivo ¹	**	**
kPa ²	ns	ns
Corretivo*kPa	ns	ns
CV ³	21	17
	IAC 202	
Corretivo ¹	**	**
kPa ²	ns	ns
Corretivo*kPa	ns	ns
CV ³	20	17

¹ Calcário e Silício; ² Tensão de água no solo; ³ Coeficiente de variação; ns e ** = não significativo e significativo a 1% de probabilidade, respectivamente.

Entre as diferentes tensões de água não foram verificadas diferenças significativas, porém houve tendência de um acréscimo no teor de Si à medida que a deficiência hídrica foi mais severa (Figura 3).

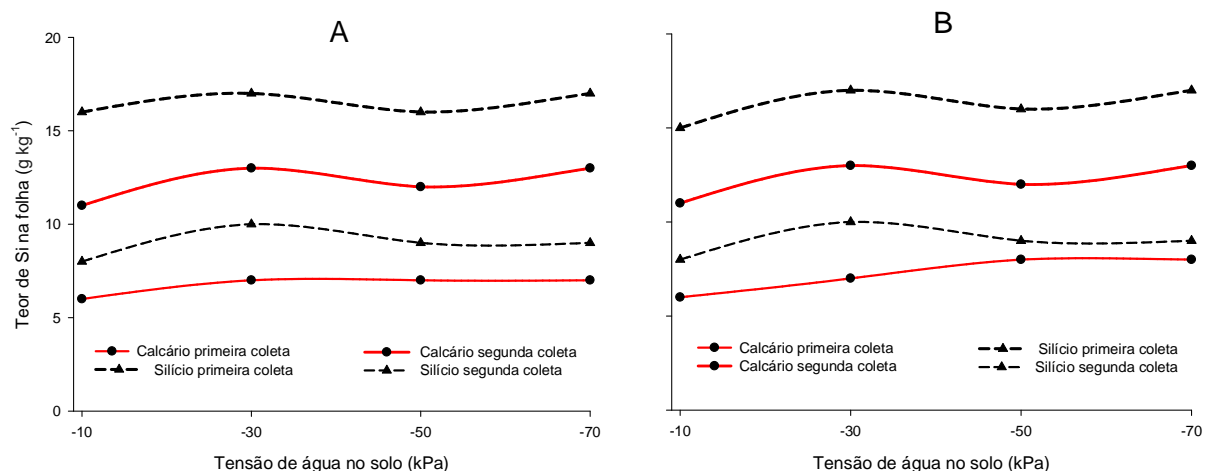


Figura 3. Teor de Si na parte aérea do cultivar Curinga (A) e do cultivar IAC 202 (B), em função do manejo de água e silício, em duas épocas de avaliação (perfilhamento e florescimento). Botucatu (SP), 2012.

Os dados obtidos no presente trabalho podem indicar que em condições de déficit hídrico o mecanismo de absorção de Si é alterado, possivelmente em função de benefícios proporcionados à planta pela maior absorção do elemento, sendo

necessária uma maior disponibilidade do elemento no solo para um efetivo aumento da absorção. Segundo Pulz (2007), a presença de uma maior quantidade de silício disponível no solo parece trazer benefícios à cultura em relação ao déficit hídrico, visto que a absorção do elemento foi aumentada quando a disponibilidade de água no solo foi reduzida.

6.3. PARÂMETROS BIOQUÍMICOS

6.3.1. Clorofila *a*

O teor de Clorofila *a* do cultivar Curinga foi influenciado pelos corretivos apenas na fase de florescimento (terceira coleta). O cultivar IAC 202 não foi influenciada pelos corretivos utilizados. As tensões de água no solo proporcionaram efeito significativo em ambas os cultivares nas fases de florescimento e enchimento de grãos (Tabela 9). Na primeira coleta o conteúdo de clorofila não foi alterado por ter sido realizada antes do estabelecimento de deficiência hídrico. Na segunda coleta, o tempo de exposição das plantas à restrição hídrica não foi suficiente para que houvesse alteração do conteúdo de clorofila nas folhas.

Com relação ao efeito do corretivo Si para o cultivar Curinga, os dados diferiram quando a tensão de água no solo foi -30 kPa (Tabela 25 – anexos). Esse aumento dos níveis de clorofila em relação a aplicação de silício, segundo Agarie et al (1998b) está associado à prevenção do progresso da senescência foliar, devido à manutenção da fotossíntese e proteção da destruição da clorofila, principalmente em condições de altas temperaturas e baixa umidade.

Entre as gramíneas, o arroz possui grande capacidade de absorção de Si pelas suas raízes, o qual é translocado, acompanhando o fluxo de transpiração, acumulando-se na parte aérea (OLIVEIRA, et al., 2007). A aplicação de silício em arroz em maiores tensões de déficit hídrico aumenta o conteúdo de glicolipídeos e fosfolipídeos, o que estaria relacionado ao incremento do conteúdo de clorofila e a maior estabilidade e funcionamento da membrana plasmática (WANG; GALLETTA, 1998).

Oliveira et al. (2007) estudando o efeito do pH da rizosfera na disponibilidade do Si no solo verificaram que a aplicação de Si conferiu maior valor SPAD (“Soil Plant Analysis Development”), quando comparado aos tratamentos que não receberam

aplicação de Si. Resultados semelhantes foram obtidos por Braga et al. (2009), com maior teor de clorofila quando os propágulos do morangueiro foram suplementados com fonte de silício.

O aumento do teor de clorofila pelo fornecimento de Si as plantas foi observado por Al-aghabary et al. (2005) em tomateiro. Possivelmente, este comportamento esteja associado ao fato de o Si ser acumulado nas células epidérmicas da parte aérea, melhorando o ângulo de abertura das folhas tornando-as mais eretas, diminuindo o auto-sombreamento e favorecendo um melhor aproveitamento da luz (KORNDORFER et al., 1999).

Tabela 9. Análise da variância e coeficiente de variação para Clorofila *a* em folhas de arroz cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Variáveis	Fase fenológica			
	Perfilhamento	Emborrachamento	Florescimento	Enchimento de grãos
	Curinga			
Corretivo ¹	Ns	ns	**	ns
kPa ²	Ns	ns	**	**
Corretivo*kPa	Ns	ns	*	*
CV ³	11	13	7	12
	IAC 202			
Corretivo ¹	Ns	ns	ns	ns
kPa ²	Ns	ns	**	**
Corretivo*kPa	Ns	ns	ns	ns
CV ³	8	15	12	18

¹Calcário e Silício; ²Tensão de água no solo; ³Coefficiente de variação; ns, ** e * = não significativo e significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente.

O teor de clorofila *a* do cultivar IAC 202 não foi influenciado pela presença ou ausência de Si em nenhuma das quatro coletas de plantas. Quando considerada apenas a média os maiores valores de clorofila *a* foram observados na primeira coleta (21-22 $\mu\text{g cm}^{-2}$). A partir da segunda coleta os teores decresceram para valores entre 10 e 13 $\mu\text{g cm}^{-2}$ (Tabela 25 – anexos).

Quanto às épocas de coleta de plantas observaram-se maiores valores de clorofila *a* na primeira coleta, ou seja, na fase de perfilhamento com queda progressiva a

cada coleta, de modo que na quarta coleta os valores foram 50% menores em relação a primeira coleta (Figura 4A e 4B; Tabela 26 - anexos).

Pincelli (2010) estudando cultivares de cana-de-açúcar tolerantes à deficiência hídrica observou queda no teor de clorofila *a* quando esses foram submetidos a falta de água. Silva et al. (2006) relata que o monitoramento da fluorescência da clorofila *a* nas gramíneas forrageiras pode ser útil na identificação da capacidade de tolerância dessas espécies à deficiência hídrica.

A biossíntese da clorofila nas plantas ocorre em uma série de processos bioquímicos dependentes de vários estímulos do meio como também fatores genéticos e nutricionais (BUCHANAN et al, 2000). Em relação ao fator nutricional o silício é citado por vários autores proporcionando aumento de pigmentos, com consequente aumento da taxa fotossintética (GONG et al, 2005; CARVALHO JUNIOR, 2008; SOUZA, 2008).

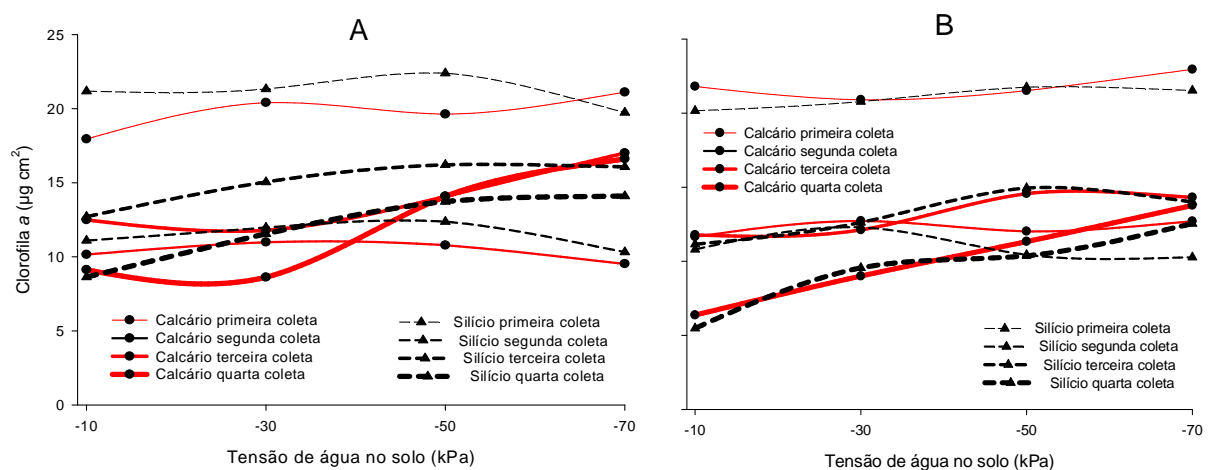


Figura 4. Teor de Clorofila *a* em folhas de arroz, cultivar Curinga (A) e cultivar IAC 202 (B), em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

6.3.2. Clorofila *b*

Os dados de clorofila *b* não foram alterados pela aplicação dos corretivos, independente do cultivar utilizada. As tensões de água no solo no cultivar influenciaram os teores de clorofila em ambos os cultivares a partir da fase de emborrachamento (Tabela 10).

Assim como observado para clorofila *a* os maiores valores foram observados na primeira coleta, na fase de perfilhamento (Figura 5A e 5B; Tabela 26 - anexos). De acordo com Lee (1988), estudos realizados evidenciaram que os teores de clorofila variam muito entre as diferentes espécies, assim como também podem variar entre genótipos de uma mesma espécie.

Tabela 10. Análise da variância e coeficiente de variação para Clorofila *b* em folhas de arroz cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Variáveis	Fase fenológica			
	Perfilhamento	Emborrachamento	Florescimento	Enchimento de grãos
	Curinga			
Corretivo¹	ns	ns	ns	ns
kPa²	ns	**	**	**
Corretivo*kPa	ns	**	*	*
CV³	18	19	10	16
	IAC 202			
Corretivo¹	ns	ns	ns	ns
kPa²	ns	**	**	**
Corretivo*kPa	**	ns	ns	ns
CV³	16	19	20	26

¹Calcário e Silício; ²Tensão de água no solo; ³Coeficiente de variação; ns e ** e * = não significativo e significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente.

Quando considerada a média os maiores valores de clorofila *b* foram observados na primeira coleta (11-12 $\mu\text{g cm}^2$). A partir da segunda coleta os teores decresceram para valores entre 4 e 6 $\mu\text{g cm}^2$ (Tabela 26).

A clorofila *a* tem papel fundamental no processo de bioconversão de energia. De acordo com Ito et al. (1996), as clorofilas *a* e *b* são interconvertidas no ciclo da clorofila e formam complexos de clorofila-proteína, que são importantes na regulação e organização do fotossistema.

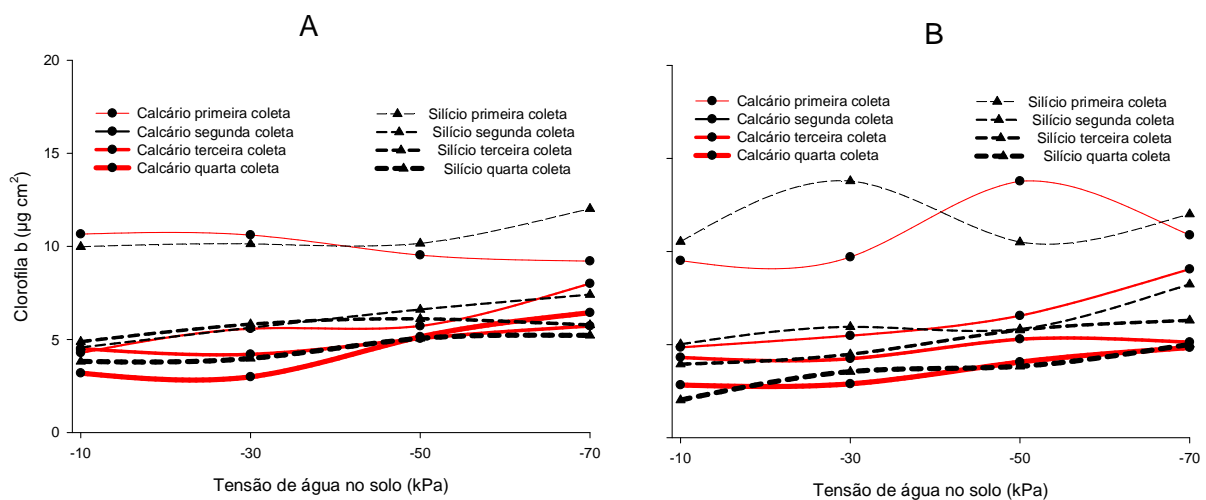


Figura 5. Teor de Clorofila *b* em folhas de arroz, cultivar Curinga (A) e cultivar IAC 202 (B), em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Os teores de clorofila *a* foram maiores do que os da clorofila *b* em todas as coletas. A clorofila *a* é o pigmento utilizado para realizar a fase fotoquímica (o primeiro estágio do processo fotossintético), enquanto que os demais pigmentos auxiliam na absorção de luz e na transferência da energia radiante para os centros de reação, sendo assim chamados de pigmentos acessórios, como é o caso da clorofila *b* (STREIT et al, 2005). A clorofila *b* é convertida em clorofila *a* através de uma enzima chamada clorofila *a* oxigenase, que catalisa a conversão do grupo metil ao grupo aldeído (XU et al., 2001).

Além disso, tanto para clorofila *a* quanto para clorofila *b* os valores foram maiores na primeira coleta. Isto ocorreu em razão da primeira coleta ter sido realizada antes das plantas terem sido submetidas a deficiência hídrica. Segundo Pincelli (2010) a deficiência hídrica é um dos estresses ambientais responsáveis pela diminuição de pigmentos nas folhas, fazendo com que o ciclo de vida da planta seja alterado.

A diminuição no teor de clorofila *a* e *b*, além da deficiência hídrica imposta, o estágio de senescência pode ter influenciado essa queda. Segundo Hendry; Price (1993) a deficiência hídrica é um dos estresses ambientais responsáveis pela diminuição de pigmentos nas folhas, fazendo com que o ciclo de vida da planta seja alterado. Porém, a relação entre clorofila *a* e *b* em plantas pode ser usada como indicativo de resposta ao

sombreamento e a senescência prematura, e a relação entre clorofila e carotenóides é usada em menor proporção para diagnosticar a taxa de senescência sob estresse hídrico.

Segundo Marques (2009) o estresse pode promover redução na fotossíntese líquida. Este efeito é geralmente associado a uma limitada capacidade de síntese e/ou maior degradação de clorofilas totais, clorofila a e clorofila b, indicando que sob estresse as plantas parecem necessitar de rotas alternativas de dissipação de energia a fim de evitar problemas de fotoinibição e fotoxidação.

6.3.3. Carotenóides

O teor de carotenóides não foi influenciado pelos corretivos de solo utilizados, independente da cultivar utilizada. Quanto a deficiência hídrica observou-se efeitos a partir da fase de florescimento, porém não houve um padrão de influência nos carotenóides (Tabela 11).

De acordo com Knox; Dodge (1985) os carotenóides tem um papel importante na proteção do pigmento clorofila sob condições de estresse e são conhecidos por manter as reações fotodinâmicas, protegendo a clorofila da peroxidação lipídica e impedindo o colapso da membrana dos cloroplastos.

Por serem moléculas altamente insaturadas, os carotenóides são susceptíveis a isomerização e oxidação. Calor, luz e o pH promovem a isomerização dos carotenóides trans, como são normalmente encontrados na natureza, para a forma cis, com ligeira perda de cor e atividade biológica. A oxidação, principal causa de degradação dos carotenóides, depende da disponibilidade de oxigênio, tipo de carotenóide e de seu estado físico. É estimulado pela luz, calor, metais, enzimas oxidativas e peróxidos, e é inibida por antioxidantes (MESCHÉDE, 2009).

Tabela 11. Análise da variância e coeficiente de variação para carotenóides em folhas de arroz cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Variáveis	Fase fenológica			
	Perfilhamento	Emborrachamento	Florescimento	Enchimento de grãos
Curinga				
Corretivo ¹	ns	ns	ns	ns
kPa ²	ns	ns	**	**
Corretivo*kPa	ns	ns	ns	ns
CV ³	17	18	9	17
IAC 202				
Corretivo ¹	ns	ns	ns	ns
kPa ²	ns	ns	**	**
Corretivo*kPa	ns	ns	ns	ns
CV ³	13	18	18	20

¹Calcário e Silício; ²Tensão de água no solo; ³Coeficiente de variação; ns e ** e * = não significativo e significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente.

Assim como observado para as clorofilas a maior quantidade de carotenóides foi observada na primeira coleta (Figura 6). A atividade enzimática pode ter levado a degradação dos carotenóides. Segundo Streit et al. (2005), a degradação do carotenóide é estimulada por luz, calor, metais, enzimas oxidativas e peróxidos.

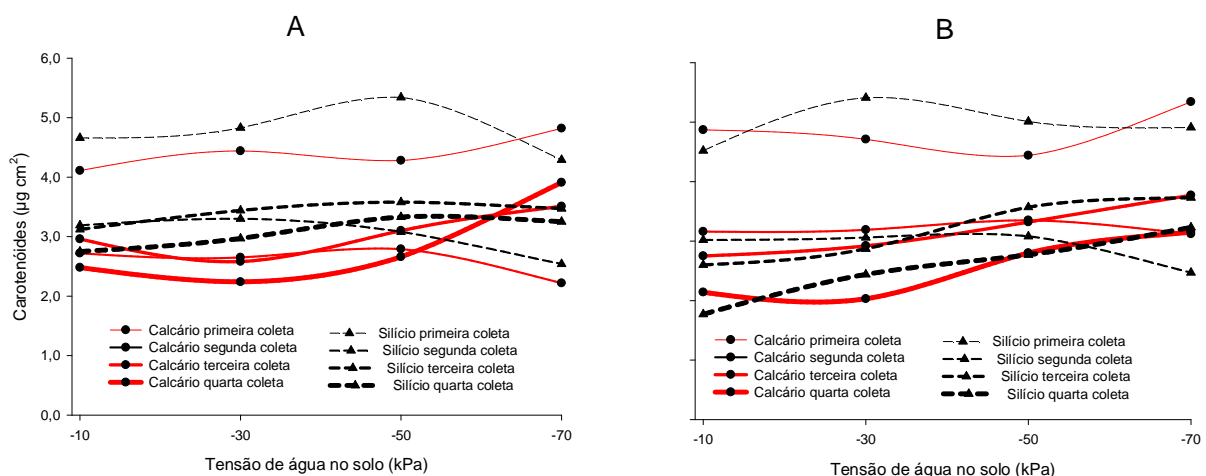


Figura 6. Teor de carotenóides em folhas de arroz, cultivar Curinga (A) e cultivar IAC 202 (B), em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

6.3.4. Superóxido dismutase (E.C. 1.15.1.1)

Os dados da análise de variância da atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) estão contidos na Tabela 12. Houve efeito da aplicação de corretivo em todas as coletas para o cultivar Curinga e a partir do florescimento para o cultivar IAC 202. Quanto as tensões de água no solo os efeitos aconteceram a partir da fase de emborrachamento.

Tabela 12. Análise da variância e coeficiente de variação para SOD em folhas de arroz cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Variáveis	Fase fenológica			
	Perfilhamento	Emborrachamento	Florescimento	Enchimento de grãos
	Curinga			
Corretivo¹	**	**	**	**
kPa²	ns	**	**	**
Corretivo*kPa	ns	**	**	**
CV³	11	11	6	8
	IAC 202			
Corretivo¹	ns	ns	**	**
kPa²	ns	**	**	**
Corretivo*kPa	ns	ns	**	*
CV³	14	10	7	12

¹Calcário e Silício; ²Tensão de água no solo; ³Coeficiente de variação; ns e ** e * = não significativo e significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente.

A maior atividade da SOD foi observada a partir do florescimento (terceira e quarta coleta), porém a medida que a disponibilidade de água diminui no solo a atividade enzimática diminui bruscamente em ambos os cultivares (Figura 7).

Os resultados do IAC 202 da atividade da superóxido dismutase (SOD), quando diferiram foram superiores com a presença de Si, com exceção da segunda coleta com a tensão de água no solo foi -30 kPa. Na primeira coleta a atividade foi maior com a adição de Si quando a tensão de água no solo foi -70 kPa. Na segunda coleta observou-se o efeito da aplicação de Si para as tensões de água a partir de -50 kPa. Na terceira coleta os efeitos foram observados para as tensões -10 e -30 kPa. Na quarta coleta os efeitos do Si foram observados apenas para a tensão -10 kPa. A partir de -10 kPa não houve mais efeito da

aplicação de Si. A terceira e quarta coleta foram realizadas aos 40 e 54 dias após o estabelecimento da deficiência hídrica. Este período maior de restrição hídrica foi a provável razão pela qual não houve efeito da aplicação de Si. Outro aspecto que deve ser considerado é que as plantas estavam na fase reprodutiva e nesse estágio o comportamento enzimático pode ser alterado (Tabela 28 - anexos).

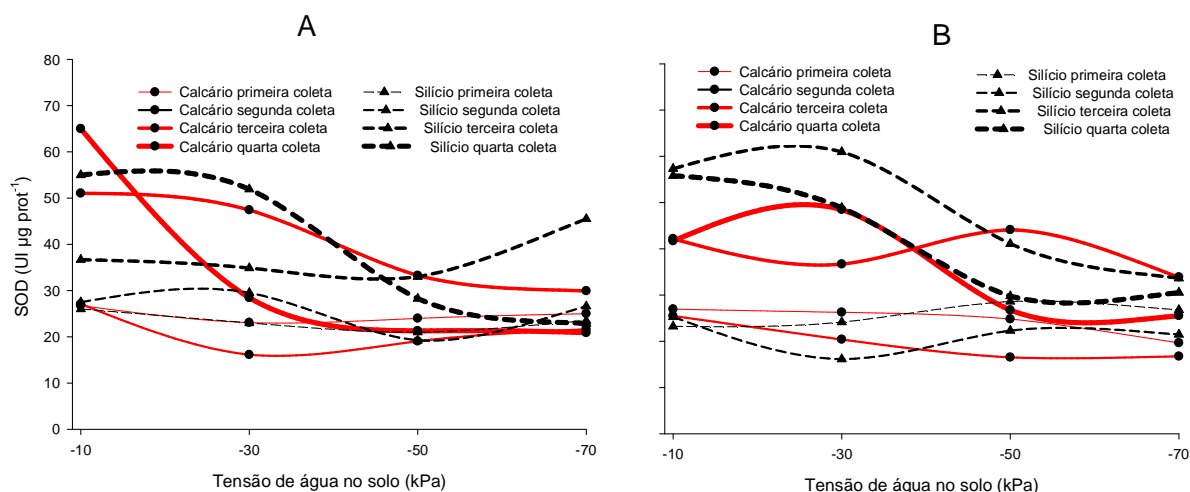


Figura 7. Atividade da enzima superóxido dismutase em folhas de arroz, cultivar Curinga (A) e cultivar IAC 202 (B), em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

É importante destacar, que de maneira geral nos dois experimentos, a medida que se intensificou o estresse por deficiência hídrica houve redução da atividade da SOD (Figura 7). Outro ponto a ser destacado é que a atividade da SOD foi maior na terceira e quarta coleta em relação a primeira e a segunda. Este comportamento é evidenciado quando observado os valores médios da atividade da enzima (Tabela 28). No entanto, embora os valores médios da SOD foram maiores na terceira e quarta coleta, houve decréscimo quando a deficiência hídrica foi igual ou superior a -50 kPa. Estes resultados demonstram que a partir de certo grau de estresse hídrico o complexo enzimático de defesa da planta é prejudicado.

Deuner (2007) afirma que, uma condição de estresse torna-se crítica, causando injúrias nos tecidos das plantas sempre que os níveis de acumulação de Eros exceder a capacidade de destoxificação. Assim, o fator que determina o estresse oxidativo é a velocidade com que as plantas ativam suas reservas antioxidantes (Ranieri et al., 1993). Tais

espécies ativas de oxigênio provocam o que se conhece por estresse oxidativo, o qual resulta, em última análise, em danos celulares que podem levar à morte da planta (MITTLER, 2002).

Ribeiro (2007) trabalhando com estresse por alumínio em dois cultivares de arroz também verificou decréscimo na atividade de SOD em folha de arroz. O decréscimo na atividade desta enzima pode ter como consequência o aumento da peroxidação de lipídios, provocando sérios danos a integridade das membranas (HUANG; GUO, 2005).

A enzima SOD age na dismutação de espécies reativas de oxigênio, comuns em situação de estresse ambiental. A formação destas espécies tende a se dividir de forma compartimentalizada nas células, conforme a intensidade da atividade enzimática antioxidante (SFALCIN, 2009). A enzima SOD apresenta aumento de atividade, sempre que as plantas são submetidas a um ambiente estressante, como salinidade, altas temperaturas, estresse hídrico, alta intensidade luminosa, ataque fitopatogênico e ou insetos (BROETTO et al., 2002).

6.3.5. Catalase (E.C. 1.11.1.6)

Os dados da análise de variância da atividade da enzima catalase (CAT) estão contidos na Tabela 13. Houve efeito da aplicação de corretivo em todas as coletas para o cultivar Curinga e na fase de florescimento para o cultivar IAC 202. Quanto as tensões de água no solo, só não houve efeito para o cultivar Curinga na fase de emborrachamento.

Na Figura 8, verifica-se que não houve um padrão de atividade enzimática. De maneira geral, nas coletas a partir do florescimento a atividade foi maior com baixa deficiência hídrica e decaiu a medida que a disponibilidade de água no solo foi menor. Com o aumento da intensidade do estresse a catalase é susceptível e degrada-se, sendo fortemente dependente de um sistema contínuo de síntese (HERTWIG et al, 1992).

Essa diminuição na atividade da enzima pode ser explicado devido a um aumento das taxas de respiração celular, em função da alteração das rotas metabólica quando comparada ao controle -10 kPa. Comprometimentos na atividade da catalase podem ocorrer como resposta à salinidade, altas intensidades luminosas, temperatura e outros eventos estressantes, com diminuição de sua atividade (KALIR; POLJAKOFF-MAYBER, 1981; BROETTO, 2002).

Tabela 13. Análise da variância e coeficiente de variação para CAT em folhas de arroz cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Variáveis	Fase fenológica			
	Perfilhamento	Emborrachamento	Florescimento	Enchimento de grãos
	Curinga			
Corretivo¹	**	**	*	**
kPa²	**	ns	**	**
Corretivo*kPa	**	ns	**	*
CV³	8	6	8	5
	IAC 202			
Corretivo¹	ns	ns	*	Ns
kPa²	**	**	**	**
Corretivo*kPa	ns	**	*	*
CV³	13	13	13	14

¹Calcário e Silício; ²Tensão de água no solo; ³Coeficiente de variação; ns e ** e * = não significativo e significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente.

A redução na atividade da catalase indica que plantas submetidas ao estresse mais severo, o H₂O₂ produzido pode ser mais consumido em processos oxidativos, como na peroxidação de lipídios, do que eliminado do metabolismo pelas ação de enzimas antioxidantes.

Como estas reações elementares, ocorrem em nível de mitocôndrias e peroxissomos, postula-se que a atividade da catalase tenha acompanhado os eventos de dismutação de peróxido de hidrogênio, em cooperação com a enzima ascorbato peroxidase. Esta reação faz parte do ciclo água-água, cuja reação básica de dismutação de radicais livres foi desencadeada pela SOD (SFALCIN, 2009).

A partir dos dados médios da Tabela 29 (anexos), observa-se uma tendência da maior atividade da CAT nos tratamentos que receberam silício. Schmidt et al. (1999) verificaram que o silício proporcionou aumento nos níveis de enzimas antioxidantes, na capacidade fotossintética e o no conteúdo de clorofila em gramados sob condições de baixa umidade. O maior nível de enzimas antioxidantes em plantas tratadas com silício parece criar condições de tolerância ao estresse hídrico.

De acordo com Moldes et al. (2006) o silício promove a atividade de enzimas antioxidantes tais como a CAT. Broetto et al. (2002) relatam que alterações na

atividade da catalase podem ocorrer em resposta a salinidade, altas intensidades luminosas, temperaturas e outros eventos estressantes.

Ferreira (2008) observou que a aplicação de silício em folhas de algodão nas coletas antes da formação dos botões florais proporcionou correlação positiva entre a dose de silício e atividade catalase, mas em 8 semanas essa tendência diminuiu até se tornar uma correlação negativa em 11 semanas.

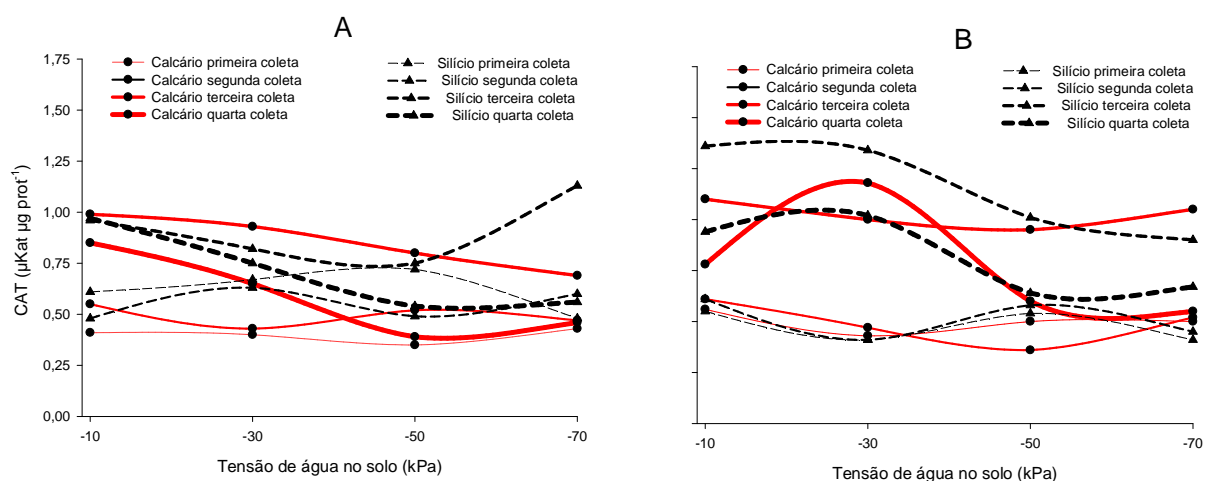


Figura 8. Atividade da enzima catalase em folhas de arroz, cultivar Curinga (A) e cultivar IAC 202 (B), em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

6.3.6. Peroxidase (EC 1.11.1.7)

Na Tabela 14 estão contidos os resultados da análise de variância da atividade da enzima peroxidase (POD) em plantas de arroz cultivar Curinga e IAC 202. O efeito dos corretivos de solo foram observados apenas para o cultivar IAC 202 a partir do florescimento. Quanto as tensões de água no solo houve alteração na atividade da enzima para o cultivar Curinga em todas as coletas e para a IAC 202 no florescimento e enchimento de grãos.

A atividade da POD não teve comportamento padrão de resultado para o cultivar Curinga (Figura 9A). Não foi possível identificar tendência de aumento ou diminuição da atividade com as tensões de água estabelecidas e corretivos utilizados. Para a

cultivar IAC 202, também não observou-se a tendência clara dos efeitos dos tratamentos. A maior atividade foi observada na fase de florescimento quando o corretivo utilizado foi o calcário. A superioridade dos valores foi constatada para as tensões de água no solo -50 e -70 kPa. Nas menores tensões de água no solo -10 e -50 kPa a maior atividade da POD foi observado quando utilizou-se o silicato de cálcio como corretivo de solo (Figura 9B e Tabela 30 - anexos). Verna et al. (2003) observaram aumento na atividade da peroxidase em arroz quando submetidos a condições de estresse.

Tabela 14. Análise da variância e coeficiente de variação para POD em folhas de arroz cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Variáveis	Fase fenológica			
	Perfilhamento	Emborrachamento	Florescimento	Enchimento de grãos
	Curinga			
Corretivo¹	ns	ns	ns	Ns
kPa²	**	*	**	**
Corretivo*kPa	ns	ns	**	**
CV³	12	14	9	14
	IAC 202			
Corretivo¹	ns	ns	*	*
kPa²	ns	ns	**	**
Corretivo*kPa	ns	ns	**	**
CV³	14	20	12	15

¹Calcário e Silício; ²Tensão de água no solo; ³Coeficiente de variação; ns e ** e * = não significativo e significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente.

Tavares et al. (2011) avaliando alterações enzimáticas em sementes de trigo recobertas com Si relatam que a expressão da enzima não foi alterada pela utilização de diferentes doses de Si no tratamento de sementes, em relação à testemunha. Houve pouca influencia da deficiência hídrica na atividade da enzima peroxidase.

Da mesma forma que se observou para SOD e CAT a atividade da peroxidase quando considerado os valores médios aumentou na terceira coleta e na quarta teve uma pequena queda. Este comportamento é evidenciado quando observado os valores médios da atividade da enzima (Tabela 30). Nas duas últimas coletas com valores próximos à coleta inicial, provavelmente devido à adaptação da planta ao estresse.

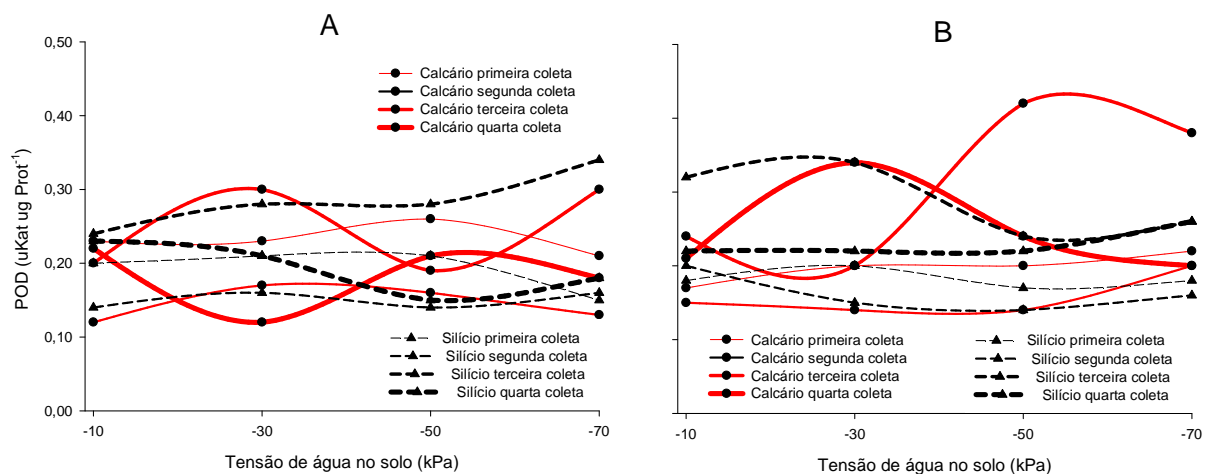


Figura 9. Atividade da enzima peroxidase em folhas de arroz, cultivar Curinga (A) e cultivar IAC 202 (B), em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

A enzima POD apresenta função antioxidante em células vegetais expostas a condições de estresse. Estas enzimas, além de desempenharem importante papel na biossíntese da parede celular, catalisam a reação entre um agente redutor e o H_2O_2 , para produzir um composto oxidado e água (IUBMB, 2007). A POD apresenta função antioxidante nas células vegetais expostas a condições de estresse por decompor o H_2O_2 produzido pela SOD, tendo ação semelhante à da CAT (BOR et al., 2003).

6.3.7. Ascorbato Peroxidase (E.C. 1.11.1.11)

A análise de variância para atividade da enzima ascorbato peroxidase (APX), de ambos os cultivares, está contida na Tabela 15. A atividade da APX não foi influenciada pelos corretivos de solo. Quanto as tensões de água no solo para a cultivar Curinga os efeitos ocorreram no florescimento e enchimento de grãos e para o cultivar IAC 202 no enchimento de grãos.

A maior atividade da APX foi observada quando foi utilizado o calcário como corretivo, este comportamento foi observado em ambos os cultivares (Figura 10A e 10B). A atuação maior dessa enzima nesses estádios pode indicar um maior potencial de remoção de H_2O_2 no interior das células. Um maior consumo de H_2O_2 deve estar contribuindo para menor formação do radical hidroxila e, assim, reduzir os danos causados no

metabolismo deste cultivar (RIBEIRO, 2007). Nas coletas realizadas no florescimento e enchimento de grãos observou-se tendência de redução da atividade enzimática quando a restrição de água no solo foi mais severa.

Mizuno et al. (1998) relatam que o acúmulo de níveis tóxicos de H_2O_2 em tecidos vegetais, causados por diferentes tipos de estresses pode resultar em ação combinada das enzimas CAT e APX, no sentido de proteger as células das plantas das ações dos peróxidos. O sistema antioxidativo enzimático é desencadeado por sucessões de enzimas ligadas no combate a radicais oxidativos a célula. Os resultados revelam uma diminuição dessa atividade em determinados momentos podendo estar relacionado a uma maior concentração de EROs em relação a enzimas antioxidativas. Ribeiro (2007) observou decréscimo na atividade da APX em folhas de arroz estressadas com alumínio. As enzimas CAT e APX utilizam como substrato o H_2O_2 , sendo a APX (em nível de μM) e a CAT (a nível de mM). A diferença funcional entre as duas é que a APX parece ser responsável pela modulação fina da ERO, enquanto a CAT deve exercer papel de remoção de H_2O_2 durante o estresse (ROSA, 2008).

Tabela 15. Análise da variância e coeficiente de variação para APX em folhas de arroz cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Variáveis	Fase fenológica			
	Perfilhamento	Emborrachamento	Florescimento	Enchimento de grãos
	Curinga			
Corretivo¹	ns	ns	ns	**
kPa²	ns	ns	**	**
Corretivo*kPa	ns	ns	ns	**
CV³	13	19	12	13
	IAC 202			
Corretivo¹	ns	ns	ns	Ns
kPa²	ns	ns	ns	*
Corretivo*kPa	ns	*	ns	Ns
CV³	25	23	25	34

¹Calcário e Silício; ²Tensão de água no solo; ³Coeficiente de variação; ns e ** e * = não significativo e significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente.

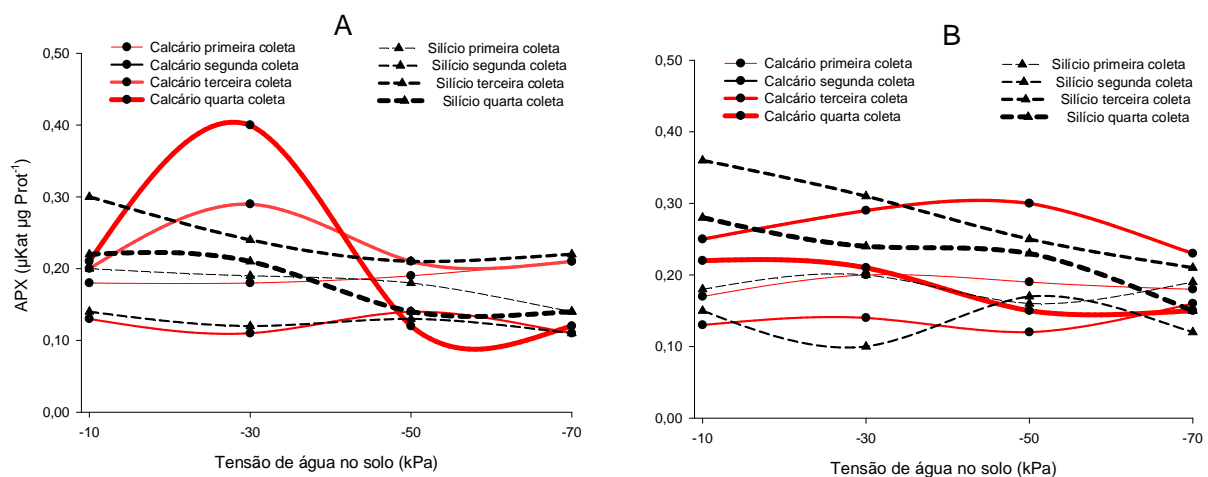


Figura 10. Atividade da enzima ascorbato peroxidase em folhas de arroz, cultivar Curinga (A) e cultivar IAC 202 (B), em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

6.3.8. Nitrato Redutase

A análise de variância para atividade da enzima nitrato redutase (NR), de ambos os cultivares, está contida na Tabela 16. Observa-se que não houve efeito dos corretivos na atividade da NR.

Os dados da atividade da enzima nitrato redutase (NR) para o cultivar Curinga e IAC 202, referentes às quatro épocas de coleta de plantas estão contidos na Figura 11 e na Tabela 32 (anexos). A partir da segunda coleta observa-se que houve redução da atividade da NR como o aumento do estresse por déficit hídrico. Estes dados estão de acordo com os de Bandurska (1991) que observou redução da atividade da NR em cevada em condição de déficit hídrico. Segundo Carelli et al. (1996) a NR é frequentemente utilizada como indicadora de estresses e de outras mudanças associadas aos fatores moduladores do crescimento das plantas.

Embora o efeito dos tratamentos não tenha obedecido um padrão constante entre as coletas houve queda na atividade da NR da primeira até a última coleta (Tabela 32 - anexos), coincidindo com a entrada da senescência vegetal e a diminuição da taxa de assimilação de CO_2 . Esses resultados corroboram com os encontrados por Moro (2011) que

também observou diminuição da atividade da NR com o aumento dos dias após a emergência do arroz.

Tabela 16. Análise da variância e coeficiente de variação para NR em folhas de arroz cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Variáveis	Fase fenológica			
	Perfilhamento	Emborrachamento	Florescimento	Enchimento de grãos
	Curinga			
Corretivo ¹	ns	ns	ns	Ns
kPa ²	**	**	ns	**
Corretivo*kPa	ns	ns	ns	Ns
CV ³	11	15	28	19
	IAC 202			
Corretivo ¹	ns	ns	ns	Ns
kPa ²	**	**	**	Ns
Corretivo*kPa	ns	ns	ns	Ns
CV ³	11	20	25	37

¹Calcário e Silício; ²Tensão de água no solo; ³Coeficiente de variação; ns e ** e * = não significativo e significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente.

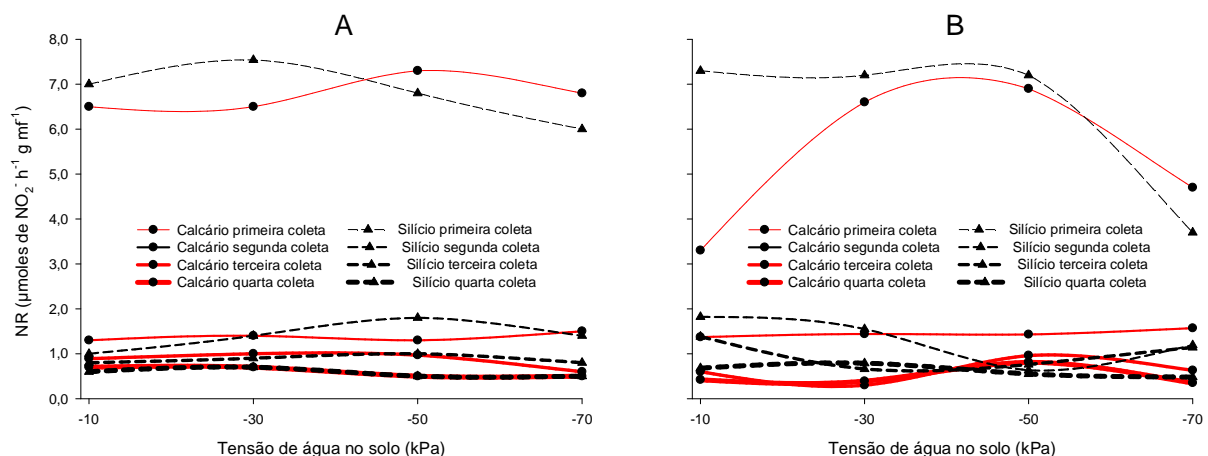


Figura 11. Atividade da enzima nitrato redutase em folhas de arroz, cultivar Curinga (A) e cultivar IAC 202 (B), em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Analisando a atividade da NR em IAC 202 com disponibilidade de nitrogênio em sistema de plantio direto com restrição hídrica, Celestino (2006), não verificou diferença em relação ao manejo de água. Sendo que a NR apresenta baixa atividade no escuro,

em condições normais de ativação e na presença de luz, a sua ação seria da ordem de 70% a 90%, reduzindo para 10% a 30% no escuro (KAISER; HUBER, 2001). Porém, mecanismos que afetam a entrada de CO₂, como a abertura estomática ou a capacidade da planta de manter a turgidez afeta diretamente a atividade da NR, como a taxa fotossintética (CELESTINO, 2006).

É possível que a inibição da NR se constitua em um processo regulatório na ausência de crescimento ativo em plantas estressadas, que evoluiu no sentido de conservar energia quando a fotossíntese é diminuída (SINHA; NICHOLAS, 1981). Segundo Marur et al (2000) para a conservação de energia é um requisito essencial para a sobrevivência durante o estresse, supõe-se que uma rápida redução da atividade da NR se traduza numa vantagem metabólica.

6.4. Análises Fisiológicas

6.4.1. Conteúdo Relativo de água

De acordo com a Tabela 17 da análise de variância o conteúdo relativo de água (CRA) nas folhas do arroz Curinga foi alterado pela presença do silício. Os maiores efeitos da presença do Si no CRA foram observados na segunda e terceira coleta (Tabela 33-anexo).

Com relação a tensão de água no solo houve efeito significativo dos tratamentos nas fases de perfilhamento, emborrachamento e florescimento (Tabela 17). Houve pouca variação do CRA com a aplicação dos corretivos de solo. De forma geral as tensões de água afetam o CRA nas menores disponibilidade de água (-70 kPa) Figura 12.

Oliveira e Castro (2002) relatam que o acúmulo de silício nos órgãos de transpiração provoca a formação de dupla camada de sílica, causando assim redução da transpiração por diminuir a abertura dos estômatos limitando assim a perda de água (FARIA, 2000). Na quarta coleta verificou-se que os tratamentos não influenciaram no CRA. Isto pode ter acontecido pelo tempo de exposição ao estresse hídrico e também pela mudança de fase fenológica da cultura (enchimento de grãos).

Para o IAC 202 o CRA foi influenciado pela presença e ausência de Si. As diferenças ocorreram na terceira e quarta coleta, sendo que, com a presença de Si o CRA foi maior (Tabela 17). Na terceira coleta, a diferença ocorreu quando a tensão de água no solo

foi -70 kPa (Tabela 33- anexo). Os valores de CRA do tratamento sem Si foram de 66% e com Si 77%. Na quarta coleta as diferenças ocorreram a partir da tensão de água de -50 kPa. Com -50 kPa observou-se CRA de 62% na ausência de Si e 68% na presença. Quando a tensão de água no solo foi -70 kPa, o CRA do tratamento sem Si foi 54% e com Si 66% (Tabela 33- anexo).

Tabela 17. Análise da variância e coeficiente de variação para conteúdo relativo de água (CRA) em folhas de arroz cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Variáveis	Fase fenológica			
	Perfilhamento	Emborrachamento	Florescimento	Enchimento de grãos
	Curinga			
Corretivo ¹	*	**	**	Ns
kPa ²	**	**	**	*
Corretivo*kPa	**	**	*	Ns
CV ³	2	2	3	3
	IAC 202			
Corretivo ¹	ns	ns	**	**
kPa ²	**	**	**	**
Corretivo*kPa	**	**	**	**
CV ³	3	4	4	4

¹Calcário e Silício; ²Tensão de água no solo; ³Coeficiente de variação; ns e ** e * = não significativo e significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente.

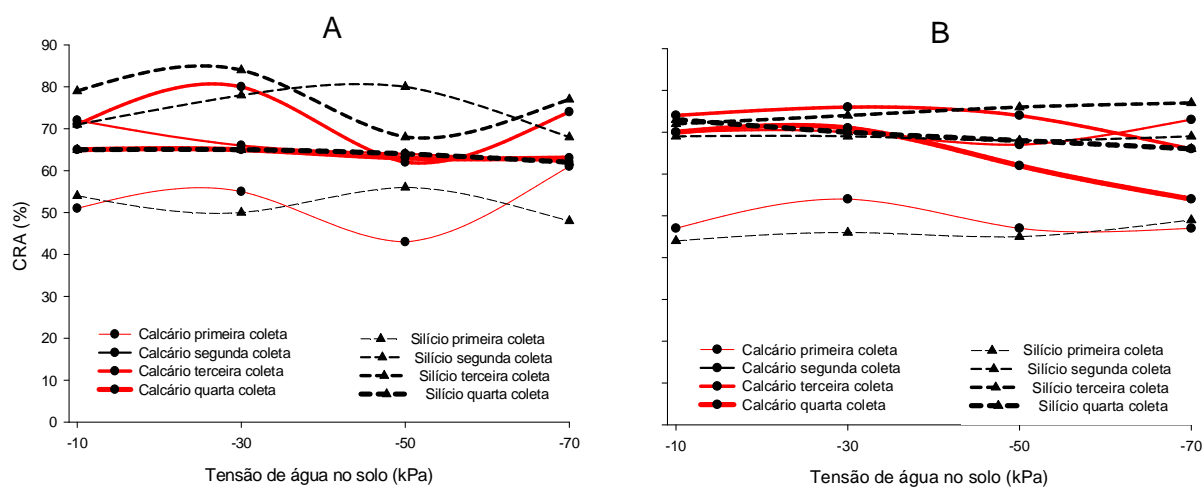


Figura 12. Conteúdo relativo de água (CRA) em folhas de arroz, cultivar Curinga (A) e cultivar IAC 202 (B), em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Dayanandam et al (1983) afirmam que os depósitos de sílica nos tecidos foliares promovem redução na taxa de transpiração, limitando assim a perda de água (FARIA, 2000). Nas gramíneas esses mecanismos de absorção, distribuição e acumulação de silício estão intimamente ligados, apresentando maiores acúmulos de sílica nos seus tecidos (RUPPENTHAL, 2011).

A resposta fotossintética frente à deficiência hídrica pode apresentar variação de acordo com o cultivar, como observado por Colom; Vazzana (2003) quando estudaram o CRA e a taxa fotossintética de cultivares da gramínea *Eragostris curvula*, em que constataram que o cultivar tolerante exibiu maior atividade fotossintética associada à maior CRA em comparação o cultivar sensível quando submetidas à deficiência hídrica.

Quando todo o conteúdo de água de um tecido ou célula está abaixo do nível de água mais alto exigido no estado de total hidratação, existe uma deficiência hídrica (TAIZ e ZEIGER, 2004). O déficit hídrico pode acarretar distúrbios fisiológicos e metabólicos nas plantas, ocasionando quedas no desempenho produtivo (PIMENTEL, 2004; TAIZ e ZEIGER, 2004). O controle das funções fisiológicas está diretamente relacionado com o conteúdo hídrico da planta e alterações no CRA afetam diretamente todo o aparato fotossintético. São várias as alterações ocorridas nas plantas devido a escassez de água (SMIT; SINGELS, 2006).

O mecanismo de absorção, distribuição e acúmulo de silício estão intimamente ligados as gramíneas, que apresentam maiores tendências ao acúmulo de sílica em seus tecidos (RUPPENTHAL, 2011). Savant et al. (1997a) afirmam que após o silício ser absorvido pelas plantas como ácido monossilícico e a água ser perdida pela evapotranspiração, o silício fica depositado no tecido da epiderme das folhas de arroz. Assim, há evidências de que a redução da transpiração cuticular pode chegar a 30% nas plantas tratadas com silício (YOSHIDA et al., 1959).

6.4.2. Taxa de assimilação de CO₂

A taxa líquida de assimilação de CO₂ para cultivar Curinga foi alterada pela presença ou ausência do Si (Tabela 18). Na terceira coleta ocorreu o uma diminuição na taxa de assimilação de CO₂ mais acentuada (Tabela 34 – anexo) Esses resultados corroboram com os de Machado, et al (1996) avaliando cultivares de arroz de sequeiro submetidos à

deficiência hídrica, em diferentes fases do crescimento reprodutivo, observaram queda na taxa de assimilação de CO₂.

No cultivar IAC 202 (Tabela 29) houve diferença entre a adubação com silício e as plantas sem o corretivo na fase de florescimento. Com exceção da última lâmina de água (-70kPa), a adubação silicatada apresentou maiores valores que os tratamentos sem o corretivo. Em todas as coletas a taxa de assimilação de CO₂ foi diminuindo com as maiores tensões de água (Figura 13). Quando a planta encontra-se em situação de estresse hídrico ocorre o fechamento dos estômatos, a fim de evitar a completa desidratação das folhas, com isto limita a difusão do CO₂ para o mesofilo foliar o que acarreta diminuição da fotossíntese (CHAVES et al., 2009).

Muitos autores relatam que o silício é um promotor de fotossíntese melhorando a penetração da luz no dossel da planta por manter as folhas mais eretas; aumenta a atividade radicular, promovendo a absorção de água e nutrientes (SHI et al, 2001).

Observa-se diminuição significativa entre o tratamento controle e a maior tensão de água durante a terceira e a quarta coleta, com a redução da assimilação de CO₂. Com o aumento do déficit hídrico as plantas tendem a fechar os estômatos acarretando a diminuição da fotossíntese (HSIAO, 1972; CHAVES et al., 2009). Essa redução causa efeitos prejudiciais diretamente sobre o aparelho fotossintético, enquanto que as taxas respiratórias não são afetadas (SASSAKI; MACHADO, 1999). De acordo com Pupatto (2003) a entrada de CO₂ atmosférico para as células fotossintéticas do mesofilo ocorre pelos estômatos. No entanto, quando estes estão abertos ocorre perda de água da folha para a atmosfera.

Tabela 18. Análise da variância e coeficiente de variação para Taxa de assimilação de CO₂ em folhas de arroz cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Variáveis	Fase fenológica		
	Perfilhamento	Emborrachamento	Florescimento
	Curinga		
Corretivo ¹	**	**	**
kPa ²	**	**	**
Corretivo*kPa	**	**	**
CV ³	6	8	10
	IAC 202		
Corretivo ¹	ns	ns	**
kPa ²	**	**	**
Corretivo*kPa	**	**	**
CV ³	8	6	5

¹Calcário e Silício; ²Tensão de água no solo; ³Coeficiente de variação; ns e ** e * = não significativo e significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente.

Quando as plantas são submetidas à deficiência hídrica, podem reduzir a condutância estomática (gs), limitando a entrada de CO₂ até a câmara subestomática reduzindo a difusão do carbono até o sítio de carboxilação, resultando na diminuição na assimilação de carbono (YU et al., 2004). A redução da fotossíntese líquida pode ocorrer por fatores estomáticos e não-estomáticos (de origem bioquímica e fotoquímica). Podendo haver uma baixa regulação do aparato fotoquímico e bioquímico se a disponibilidade de CO₂ é o componente mais limitante para a fotossíntese em plantas sob deficiência hídrica (FLEXAS et al., 2006). Quando os estômatos estão fechados, se estabelece nas plantas certa resistência à perda de água, com reflexos sobre as atividades metabólicas, devido à redução da difusão do CO₂ para o mesófilo e menor rendimento quântico do fotossistema II (BAKER, 1993; JACOBS *et al.*, 1996; CHAVES *et al.*, 2010).

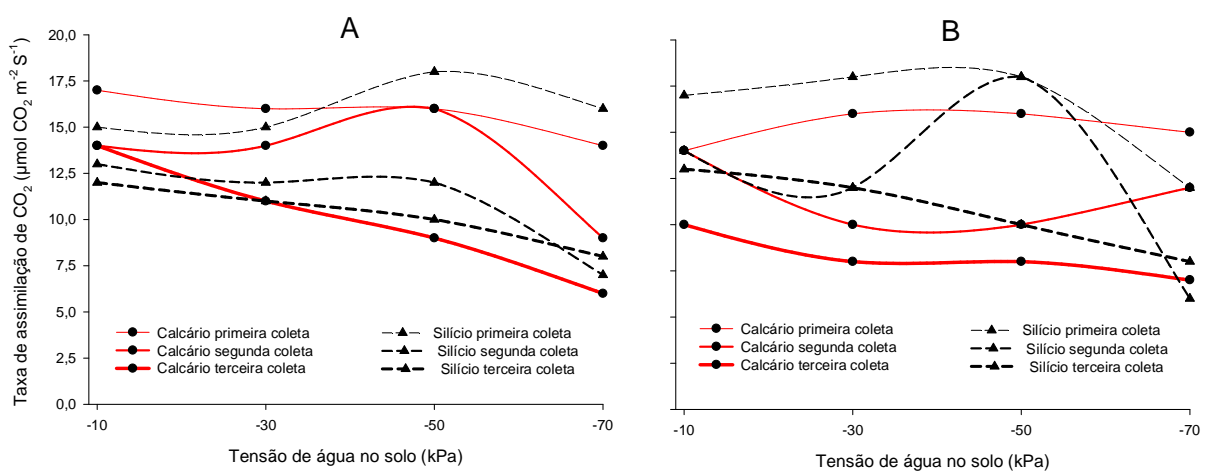


Figura 13. Taxa de assimilação de CO_2 em folhas de arroz, cultivar Curinga (A) e cultivar IAC 202 (B), em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Sanda et al (2011) relata que parte da redução da fotossíntese pode ser atribuída aos efeitos não estomáticos em nível de cloroplasto, sendo um dos principais indicativos da inibição da fotossíntese o transporte de elétrons e a fotofosforilação. A redução na síntese de ATP, uma resposta inicial à deficiência hídrica, pode levar à redução na capacidade de regeneração da ribulose bifosfato (RuBP), reduzindo a fotossíntese potencial (LAWLOR; TEZARA, 2009; PINHEIRO; CHAVES, 2011), comprometendo assim a atividade da Rubisco (LAWLOR; TEZARA, 2009; PARRY et al., 2002).

De acordo com Sanda et al (2011) mecanismos não estomáticos a nível de cloroplastos, como o transporte de elétrons e a fotofosforilação podem estar relacionados a inibição ou redução da fotossíntese. Havendo redução na síntese de ATP, um indicativo inicial à deficiência hídrica, pode levar à redução na capacidade de regeneração da ribulose bifosfato (RuBP), reduzindo a fotossíntese potencial (LAWLOR; TEZARA, 2009; PINHEIRO; CHAVES, 2011). Uma vez que a fosforilação é reduzida sob deficiência hídrica, a atividade da Rubisco será retardada (LAWLOR; TEZARA, 2009; PARRY et al., 2002).

O fotossistema II depende da água para a geração de energia química, requerida posteriormente para a fixação de CO_2 , variações na disponibilidade hídrica geram menor eficiência do fotossistema II, ou seja, com recurso de água limitado, menos ATP e NADPH são formados e, como consequência, menos CO_2 é fixado (LU; ZHANG, 1999;

SOUZA et al., 2005). Há diminuição na difusão de CO₂ da atmosfera até o sítio de carboxilação, geralmente é considerada a principal causa da redução da fotossíntese em condições de deficiência hídrica (GRASSI; MAGNANI, 2005; PINHEIRO; CHAVES, 2011).

Foi observado enrolamento foliar em ambos os cultivares estudadas, propiciando a minimização da perda de água durante o estresse. Quando há um enrolamento da folha, a área efetiva para captação de luz é reduzida, aumentando assim a resistência à entrada de CO₂, reduzindo assim a fotossíntese (GOMES, 1996).

6.4.3. Condutância estomática (g)

A análise de variância da condutância estomática (g) para o cultivar Curinga (Tabela 19) não apresentou diferença significativa. Porém, os valores foram diminuindo a cada coleta, esta constatação torna-se mais evidente quando se observa a média em cada coleta (Tabela – anexo 35). Pupatto (2003) trabalhando com aplicação de silício em arroz observou decréscimo da condutância estomática em cultivar de sequeiro com deficiência hídrica.

Observa-se que o fechamento estomático ocorreu tanto na deficiência hídrica como nas diferentes coletas levando as plantas a um nível de desidratação. A condutância estomática varia em função do cultivar, da idade da folha e do pré-condicionamento das plantas (SCHULZE; HALL, 1982; DAI et al., 1992).

Machado; Lagôa (1994) avaliando trocas gasosas e condutância estomática em três espécies de gramíneas, observaram que onde há ausência de resposta da taxa de assimilação de CO₂ em função da condutância estomática, o aumento na condutância provoca aumentos somente na taxa de transpiração e, conseqüentemente, há queda na eficiência fotossintética do uso de água.

Para o cultivar IAC 202 (Tabela 19) a aplicação de silício diferiu-se a partir da lâmina de -30kPa na segunda e terceira coleta. Mesmo nas coletas as quais não foram observadas diferenças significativas, o valor da condutância estomáticas nas plantas com silício foram maiores quando comparadas as que não receberam este corretivo (Tabela – anexo 35).

Tabela 19. Análise da variância e coeficiente de variação para condutância estomática em folhas de arroz cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Variáveis	Fase fenológica		
	Perfilhamento	Emborrachamento	Florescimento
	Curinga		
Corretivo ¹	ns	ns	ns
kPa ²	ns	ns	ns
Corretivo*kPa	ns	ns	ns
CV ³	17	55	31
	IAC 202		
Corretivo ¹	ns	**	**
kPa ²	ns	**	ns
Corretivo*kPa	ns	*	ns
CV ³	17	21	23

¹Calcário e Silício; ²Tensão de água no solo; ³Coeficiente de variação; ns e ** e * = não significativo e significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente.

Estudando o efeito da aplicação de silício em cana-de-açúcar Bastos et al. (2009) também não obtiveram diferença significativa em relação a condutância estomática foliar. Em relação ao arroz, segundo Ekanauake et al. (1993) o condicionamento à seca, ou uma previa exposição a períodos curtos de deficiência hídrica, afetam as relações osmóticas e o comportamento estomático.

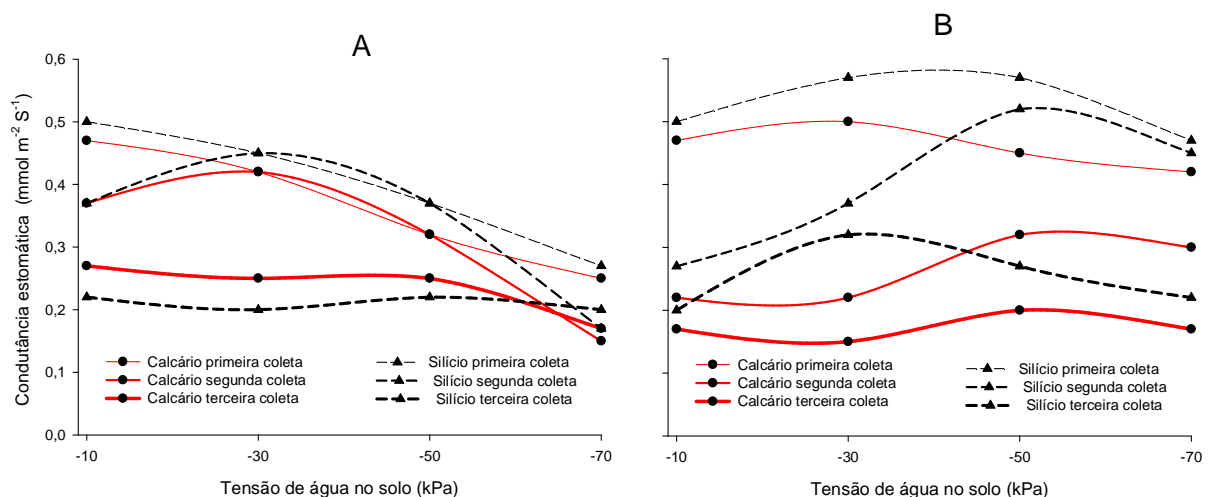


Figura 14. Condutância estomática em arroz, cultivar Curinga (A) e cultivar IAC 202 (B), em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Gomes (1996), em seus estudos com dois cultivares de arroz sob imposição de deficiência hídrica também observou decréscimo na condutância estomática, visto que o estômato age como regulador da troca de CO_2 e conseqüentemente também regula a perda de água. Resultados também semelhantes aos de Gonçalves (2008) que trabalhando com dois cultivares de cana suscetível e tolerante a deficiência hídrica, também observou efeito de cultivar, regime hídrico e época de avaliação, e uma redução na condutância estomática dos cultivares avaliados. Vários estudos têm indicado que a luz, a disponibilidade hídrica no solo e a umidade relativa são os principais fatores ambientais que afetam o comportamento estomático (MACHADO; LAGOA, 1994).

Brodribb; Holbrook (2003), estudando o fechamento estomático e características fisiológicas em folhas durante a desidratação, relatam que a condutância foliar é composta em pequena parte pela condutância cuticular da epiderme e, estando aberto os estômatos, a (g) é controlada pelas células guarda dos estômatos. Sendo que a (g) é proporcional ao número e tamanho dos estômatos e diâmetro da abertura do estômato, características estas que dependem de outros fatores endógenos e ambientais.

6.4.4. Transpiração (E)

De maneira geral no cultivar Curinga, o déficit hídrico e a aplicação de silício influenciaram de forma pontual na transpiração nas plantas de arroz (Tabela 20). Ao longo do período de exposição das plantas aos tratamentos foi possível observar mesmo sem existir diferença significativa entre os tratamentos, uma tendência de queda na transpiração (Figura 15). Essa queda na transpiração também é observada entre os tratamentos com maiores deficiências hídricas (-50 e -70 kPa). Padrão também observado nos valores de trocas gasosas, com diminuição da assimilação de CO_2 .

Em condições naturais, a taxa de transpiração nas folhas é influenciada pela incidência da energia radiante, pelo déficit de saturação do vapor do ar e pela resistência difusiva (PIMENTEL, 2004).

Chaves (1991) considera que para evitar o dessecamento do vegetal, ocorre o fechamento estomático como primeira linha de defesa. Com o fechamento estomático ocasiona uma redução do fluxo de H_2O para fora da folha do que no fluxo CO_2 que chega aos cloroplastos, reduzindo mais a taxa transpiratória que a taxa fotossintética (NOBEL, 1999). Os

estômatos regulam a perda de água através da transpiração, respondendo ao déficit hídrico com a alteração da condutância estomática a uma faixa crítica de valores do potencial hídrico foliar (LARCHER, 2000).

Com a redução da condutância estomática, pode reduzir também a perda de água, assim reduzindo a desidratação das células das plantas, será limitado seu crescimento foliar e a produtividade (TURNER, 1986). Segundo Taiz; Zeiger (2009) a transpiração é resultado de vapores de água através de estômatos abertos, porém quando estes se fecham há na planta uma certa resistência a perda de água, atingindo assim as atividades metabólicas, devido a difusão da redução do CO₂ para o mesófilo e menor rendimento quântico do PSII (JACOBS *et al.*, 1996; CHAVES *et al.*, 2010).

No cultivar IAC 202, observa-se que a taxa de transpiração foi afetada durante a segunda e terceira coleta, com um estresse hídrico mais severo -50kPa. Analisando a tabela 20 de análise de variância, houve diferença estatística entre a interação com e sem silício no tratamento a -50 kPa, com valores de 8,5 e 11,2; 5,8 e 7,6 (mol H₂O m⁻² S⁻¹) na segunda e terceira coleta respectivamente (Tabela – anexo 36). Mesmo nas amostras que não houve diferença significativa os valores de transpiração com silício apresentaram-se maiores. Resultado que pode remeter a uma possível relação da camada sílica com a diminuição da perda de água na planta (Figura 15).

Tabela 20. Análise da variância e coeficiente de variação para transpiração em folhas de arroz cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Variáveis	Fase fenológica		
	Perfilhamento	Emborrachamento	Florescimento
	Curinga		
Corretivo¹	ns	*	ns
kPa²	ns	**	**
Corretivo*kPa	ns	ns	ns
CV³	8	21	13
	IAC 202		
Corretivo¹	ns	**	**
kPa²	*	**	**
Corretivo*kPa	ns	ns	ns
CV³	5	9	12

¹Calcário e Silício; ²Tensão de água no solo; ³Coefficiente de variação; ns e ** e * = não significativo e significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente.

Madeiros et al (2009) estudando a influência do Si nas trocas gasosas e produção de biomassa da cana-de-açúcar, também observaram diferenças significativas com a aplicação de silício.

Em ambientes com restrição hídrica, seja por problemas de falta de água no solo ou por altas demandas atmosféricas de água, a planta tende a fechar seus estômatos para economizar água, reduzindo as perdas por transpiração, o que pode limitar a entrada de CO₂ na folha para a fotossíntese (FLEXAS et al., 2009; PINHEIRO; CHAVES, 2011).

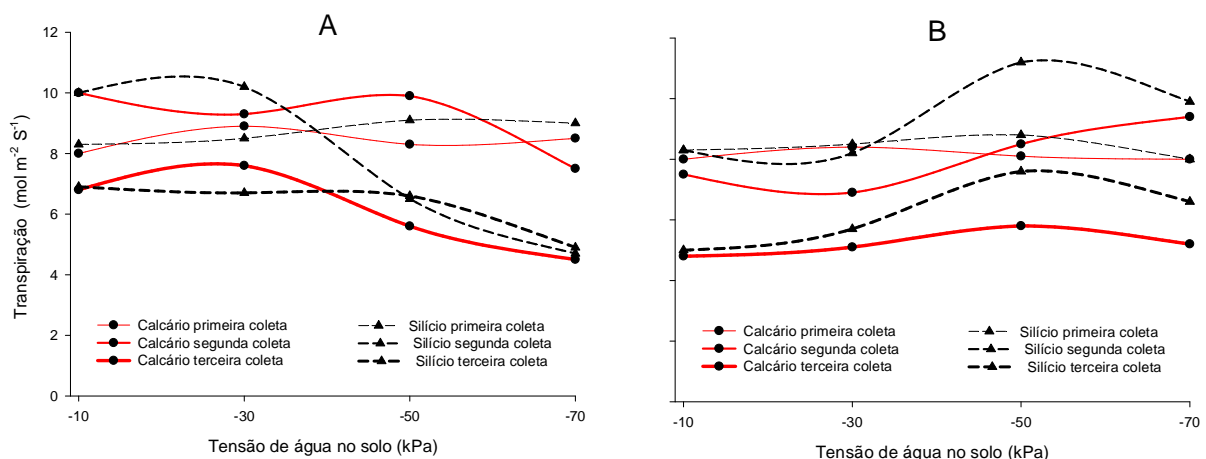


Figura 15. Transpiração (E) em arroz, cultivar Curinga (A) e cultivar IAC 202 (B), em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

O acesso de CO₂ atmosférico às células fotossintéticas do mesófilo ocorre através da abertura estomática. Por essa mesma via, entretanto, ocorre perda de água no sentido da superfície interna hidratada da folha para a atmosfera (MACHADO, 1994)

Quando há mudanças nas taxas de assimilação de CO₂, devido ao aumento de déficit hídrico na planta, conseqüentemente, alteram-se também as taxas de transpiração. Portanto, nos dias em que foram verificadas menores taxas de fotossíntese, também observou-se uma tendência em menores taxas de condutância e transpiração, possibilitando assim a economia de água por parte da planta. Resultados que corroboram com os de Gomes (1996).

6.5. PRODUÇÃO DE GRÃOS

A produção de grãos foi influenciada pelos corretivos e pelas tensões de água em ambas os cultivares (Tabela 21). De maneira geral a medida que o restrição de água foi intensificada houve redução na produtividade de grãos. A exceção foi a cultivar Curinga, cuja a produtividade não foi reduzida a medida que a deficiência hídrica foi maior, quando o corretivo utilizado foi o silicato de cálcio. Isto pode ter ocorrido por este cultivar ser mais eficiente no uso da água principalmente quando com adição de silício (Figura 16).

Ambos os cultivares apresentaram acréscimo de produção na presença de silício, principalmente quando aumentava as tensões de água. Isto demonstrando que a aplicação de silício poderá beneficiar a produção de arroz com deficiência hídrica. Crusciol et al, 2003c, afirma que o arroz cultivado no sistema de sequeiro apresenta, em geral, além da baixa produtividade, qualidade de grão inferior quando comparado com o grão oriundo de cultura irrigada por inundação. A maior causa desse problema, além dos atribuídos à genética do material, está relacionada com os freqüentes períodos de deficiência hídrica que a planta sofre durante o ciclo.

Segundo Martins (2007) os resultados de produção 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.

Gomes et al (2011) trabalhando com fontes de silício para o arroz em função de fontes e tempo de incubação, observaram que a matéria seca da parte aérea foi maior, com a aplicação de silicato de cálcio.

Tabela 21. Análise da variância e coeficiente de variação para produtividade de grãos dos cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício.

Variáveis	Cultivar	
	Curinga	IAC 202
Corretivo ¹	**	**
kPa ²	*	**
Corretivo*kPa	*	**
CV ³	12	16

¹Calcário e Silício; ²Tensão de água no solo; ³Coeficiente de variação; ns e ** = não significativo e significativo 1% de probabilidade, respectivamente.

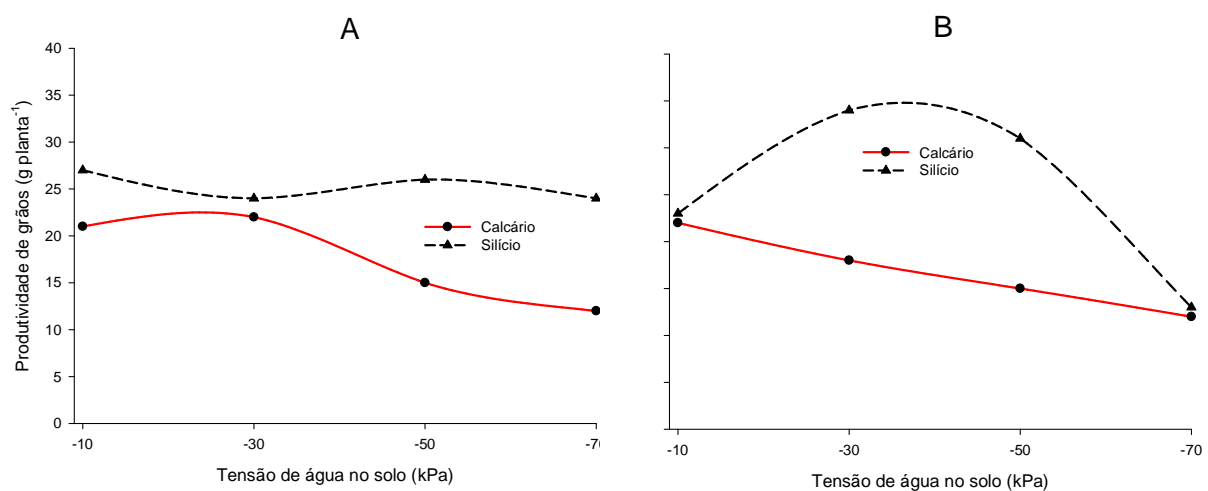


Figura 16. Produção de grãos do arroz, cultivar Curinga (A) e cultivar IAC 202 (B), em função do manejo de água e silício. Botucatu (SP), 2012.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Silício proporcionou:

Aumento da atividade enzimática da SOD e CAT. O Conteúdo relativo de água (CRA) aumentou. Transpiração menor em condições de maiores deficiência hídricas. Na Taxa de assimilação de CO₂ ambos os cultivares apresentaram aumento com a aplicação do silício, porém o IAC 202 apresentou valores maiores, conseqüentemente nos dois cultivares houve aumento da matéria seca, altura de plantas e produção de grãos.

A aplicação de silício em cultivares de arroz, é uma prática benéfica a diversos parâmetros fisiológicos, resultando em plantas com maior altura e produção de grãos.

Os aspectos bioquímicos da aplicação de silício em condição de deficiência hídrica aumentam a produção de enzimas, desencadeando assim reações metabólicas do sistema antioxidante favorecendo a resistência das mesmas sob o estresse hídrico.

Deficiência Hídrica:

Em relação à atividade enzimática a SOD e a CAT apresentaram aumento no decorrer das coletas, e diminuição nas maiores tensões, a POD e a APx não apresentaram diferenças significativas com maiores tensões de água, a NR diminuiu com o passar das coletas não diferindo significativamente entre as tensões, seguindo a queda de *A* e *g*. A transpiração seguiu uma tendência de queda com maiores tensões de água no cultivar Curinga. Com aumento da deficiência hídrica as clorofilas *a* e *b* apresentaram maiores teores.

8. CONCLUSÕES

A aplicação de silício promoveu aumento na altura de planta em ambos os cultivares com deficiência hídrica mais severa -70kPa.

O cultivar IAC 202 apresentou maiores valores de conteúdo relativo de água, taxa de assimilação de CO₂, condutância estomática e transpiração, em todas as condições de estresse.

Com lâminas de deficiência hídrica mais intensa, os parâmetros fisiológicos e a atividade da superóxido dismutase aumentaram com a aplicação de silício até a tensão de -50kPa.

O silício resultou em maior produção de grãos em ambos os cultivares, mesmo com restrições hídricas mais intensas.

9. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AGARIE, S.; AGATA, W.; KAUFMAN, P.B. Involvement of silicon in the senescence of rice leaves. **Plant Production Science**, Tokyo, v.1, n.2, p.104-105, 1998a.

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 Prod. Science*.v.1, p.96-103, 1998b.

AGRIANUAL. Agrianual 2003 – Anuário da agricultura brasileira. São Paulo: FNP Consultoria & Comércio Ed. Argos, 2003. 536p.

AL-AGHABARY, K.; ZHU, Z.; SHI, Q. Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 27, n.12, p. 2101-2115, 2004.

AL-AGHABARY, K.; ZHUJUN, Z.; QINHUA, S. Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. **Journal of Plant Nutrition**, v. 27, n. 12, p. 2101-2115, 2005.

ALFENAS, A.C. **Eletroforese de isoenzimas e proteínas afins**: fundamentos e aplicações em plantas e microrganismos. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1998. 574p.

ALSCHER R. G.; HESS J.L. (Eds.). **Antioxidants in higher plants**. CRC press, Boca Raton, FL, 1993, p. 31-58.

ALSCHER, RG; ERTURK, N; HEALTH, LS. Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants. **Journal of experimental Botany**, Antioxidants and Reactive Oxygen Species in Plants Special Issue, v.53, n.372, p.1331-1341, 2002.

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 Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2004.

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

ANGELOCCI, L. R. **Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: introdução ao tratamento biofísico**. Piracicaba: L. R. Angelocci, 2002. 272p.

ANJUM, F. et al. Water stress in barley (*Hordeum vulgare* L.). I. Effect on chemical composition and chlorophyll contents. **Pakistan Journal of Agricultural Science**, Faisalabad, v. 40, p. 45-49, 2003.

APEL, K.; HIRT, H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 55 p.373-399, 2004.

ARAÚJO, A. M. S. **Absorção e metabolismo de nitrogênio por arroz em diferentes agroecossistemas sob disponibilidade sazonal de N⁺NO₃⁻**. 2011. 204f. Tese (Doutorado em Agronomia/Ciência do solo). Seropédica, Rio de Janeiro, 2011.

ARAÚJO, S.; DEMINICIS, B. Fotoinibição da fotossíntese. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 463-472, out./dez. 2009.

ARF, O et al. Resposta de cultivares de arroz de sequeiro ao preparo do solo e à irrigação por aspersão. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 36, n. 6, p. 871-879, jun. 2001.

ARF, O. et al. Uso de etil-trinexapac em cultivares de arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. n. 2, v. 42, p. 150-158, abr./jun. Goiânia, 2012.

ARF, O. Resposta de cultivares de arroz de sequeiro ao preparo do solo e à irrigação por aspersão. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 36, n. 6, p. 871-879, jun. 2001.

ARMSTRON, D. L. P. **Lodo de esgoto alcalinizado como fonte de nitrogênio no desenvolvimento inicial da cultura do arroz**. 2006. 80f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Concentração Ciência do Solo) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

ASADA, K. Production and action of active oxygen species in photosynthetic tissue. In: FOYER, C.H.; MULLMEAU, P.M. (eds). **Causes of photooxidative stress and amelioration of defense system in plants**. CRC Press, Boca Raton, FL, 1994, p.77-107.

ASCH, F et al. Drought-induced changes in rooting patterns and assimilate partitioning between root and shoot in upland rice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 93, n. 2-3, p. 223-236, 2005.

ASPINAL, D.; PALEG, L. G. Proline accumulation: physiological aspects In: PALEG, L. G.; ASPINALL, D. **The Physiology and Biochemistry of Drought Resistance in Plants**. New York: Academic Press. 1981, p. 205-259.

ASSIS, J.S.; LIMA FILHO, J.M.P. Aspectos fisiológicos da videira irrigada. In: LEÃO, P.C. de S., SOARES, J.M., (Ed.) **A viticultura no semi-árido brasileiro**. Petrolina: EMBRAPA Semi-Árido, 2000. p.129-142.

BAEK K.H., SKINNER D.Z. Alteration of antioxidant enzyme gene expression during cold acclimation of near isogenic wheat lines. **Plant Science**, v. 165. p. 1221–1227, 2003.

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

BANDURSKA, H. Effect of proline on nitrate reductase activity in water-stressed barley leaves. **Acta Physiologiae Plantarum**, Heidelberg, v.13, p.3-11, 1991.

BARBOSA FILHO, M. P. et al. Silicato de cálcio como fonte de silício para o arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, Minas Gerais, v. 25, p. 325-330. 2001.

BARBOSA FILHO, M.P. et al. **Importância do silício para a cultura do arroz**. Uma revisão. **INFORMAÇÕES AGRONÔMICAS Nº 89 – MARÇO/2000**.

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

BASAGLI, M. A. B. et al. Efeito da aplicação de silicato de sódio na resistência de plantas de trigo ao pulgão-verde *Schizaphis graminum* (Rond.) (Hemiptera: Aphididae). **Neotropical Entomologic**, Londrina, v. 32, n. 4, p. 659-663, 2003.

BASTOS, M.L.; VIEIRA, A.O.; AQUINO, B.F. Influência da escória siderúrgica sobre trocas gasosas e produção de biomassa da cana-de-açúcar. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 6, n. 2, p. 121-129, 2009.

BECKER, T.W.; FOCK, H.P. The activity of nitrate reductase and pool sizes of some amino acids and some sugars in water-stressed maize leaves. **Photosynthesis Research**, Netherlands v. 8, p. 267-74, 1986.

BHATTACHARJEE, S. Reactive oxygen species and oxidative burst: roles in stress, senescence and signal transduction in plant, **Curriculum Science**. n. 89 p. 1113e1121. 2005.

BIANCHI, C.A.M. et al. Condutância da folha em milho cultivado em plantio direto e convencional em diferentes disponibilidades hídricas. **Ciência Rural**, v.37, p.315-322, 2007.

BLOKHINA, O.; VIROLAINEN, E.; FAGERSTEDT, K. V. Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress: a review. **Annals of Botany**, Oxford, v. 91, Spec No, p. 179-194, 2003.

BLUM, A. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 112, n. 2/3, p. 119–123, June 2009.

BLUM, A. Drought resistance – is it really a complex trait? **Functional Plant Biology**, v. 38, p. 753–757, 2011.

BOLHÀR-NORDENKAMPF, H. R. et al. Chlorophyll fluorescence as a probe of the photosynthetic competence of leaves in the field: a review of current instrumentation. **Functional Ecology**, v. 3, p. 497-514. 1989.

BONOW, S. Caracterização morfológica de cultivares de arroz visando a certificação da pureza varietal. **Ciência agrotécnica**, Lavras, v. 31, n. 3, p. 619-627, maio/jun., 2007.

BOR, M.; ÖZDEMİR, F.; TÜRKAN, I. The effect of salt stress on lipid peroxidation and antioxidants in leaves of sugar beet *Beta vulgaris* L. and wild beet *Beta maritima* L. **Plant Science**, v.164, p.77-84, 2003.

BRAGA, F.T. et al. Características anatômicas de mudas de morangueiro micropropagadas com diferentes fontes de silício. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 44, p. 128-132, 2009.

BRASIL. Decreto nº 4954, de 14 de janeiro de 2004. Aprova o regulamento da lei nº 6894 de 16 de janeiro de 1980, que dispõe sobre inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes ou biofertilizantes destinados à agricultura, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, p. 215, jan. 2004. Seção 1.

BRAY, E. A. Molecular responses to water deficit. **Plant Physiology**, Rockville, v. 103, p.1035-1040, 1993.

BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C. M. regulação da absorção e assimilação do nitrogênio nas plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 2, p. 365-372, 2000.

BRIGHT, J. ABA-induced NO generation and stomatal closure in Arabidopsis are dependent on H₂O₂ synthesis, **The Plant Journal**. n. 45, p. 113-122, 2006.

BRODRIBB, T. J.; HOLBROOK, N. M. Stomatal closure during leaf dehydration, correlation with other leaf physiological traits. **Plant Physiologic**, v. 132, n. 4, p. 2166-2173, 2003.

BROETTO, F.; LUTTGE, U.; RATAJCZAK, R. Influence of light intensity and salt treatment on mode of photosynthesis and enzymes of the antioxidative response system of *Mesembryanthemum crystallinum*. **Functional Plant Biology**, Victoria, v29, p.13-23, 2002.

BROETTO, F. et al. Respostas bioquímicas durante a indução de estresse salino em plantas de pimentão cultivadas em sistema fertirrigado. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 21, n. 2, p. 290, jul. 2003.

BUCHANAN, B.B.; GRUISSEM, W.; JONES, R.L. (Ed.). Biochemistry and molecular biology of plants. Rockville: ASPP. 2000. 1408p.

BUZETTI, et al. Resposta de cultivares de arroz a doses de nitrogênio e do regulador de crescimento cloreto de cloromequat. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.41, n.12, p.1731-1737, dez. Brasília, 2006.

CAMPA, A. Biological roles of plant peroxidases: known and potential function. In J Everse, MB Grisham, eds, **Peroxidases in Chemistry and Biology**, Vol II. CRC Press, Boca Raton, FL, 1991, p 25-50.

CAMPBELL, W. H. Nitrate reductase structure function and regulation on bridging to gap between biochemistry and physiology. Annual Review. **Plant Physiology Plant Molecular Biology**, v.580, p. 277-303, 1999.

CANTARELLA, H.; RAIJ, B.; CAMARGO, C.E.O. Cereais. In: RAIJ, B. et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed .Campinas: Campinas: IAC, 1997. 285 p. (Boletim Técnico 100).

CARELLI, M.L.C.; UNGARO, M.R.G.; FAHL, J.I.; NOVO, M.C.S.S. Níveis de nitrogênio, metabolismo, crescimento e produção de girassol. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Campinas, v.8, p.123-130, 1996.

CARUSO, M.E. et al. Trocas gasosas e relações hídricas em dois cultivares de arroz de sequeiro submetidos à deficiência hídrica, em diferentes fases do crescimento reprodutivo. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Campinas, v. 8 (2), p.139-147, 1996.

CARVALHO JUNIOR, P.C. de. Aplicação de silicato de potássio via foliar o morangueiro: fotossíntese, produção e qualidade. (Graduação em Agronomia). Universidade Federal de Uberlândia, UFU, 32f, 2008.

CASTILHO, E.G. et al. Lowland rice yield as affected by timing of water deficit and nitrogen fertilization. **Agronomy Journal**, Madison, v. 84, p.152-159, 1992.

CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C.A.C. Efeito da aplicação superficial de calcário e silicato na cultura da soja. In: Simpósio sobre silício na agricultura, 4. 2007. **Anais...Botucatu**, São Paulo, 2007.

CAVALCANTI, F.R. et al. Superoxide dismutase, catalase and peroxidase activities do not confer protection against oxidative damage in salt-stressed cowpea plants. **News Phytologist**, v.163, p.563-571, 2004.

CAVALCANTI, F.R. Superoxide dismutase, catalase and peroxidase activities do not confer protection against oxidative damage in salt-stressed cowpea leaves. **New Phytologist** 163, 563–571.

CAVERZAN, A. **Caracterização funcional dos genes de ascorbato peroxidase de arroz (*Oryza sativa* L.) nas interações entre estresse oxidativo e estresses abióticos**. 2008. 91 f. Dissertação (Mestrado em Biologia Celular e Molecular) – Centro de Biotecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

CELESTINO, J. C. **Atividade da enzima redutase do nitrato, em arroz cultivado em solo proveniente de áreas sob diferentes preparos, água e doses de nitrogênio**. 2006. 48 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Sistemas de Produção) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

CELESTINO, J. C. **Atividade da enzima redutase do nitrato, em arroz cultivado em solo proveniente de áreas sob diferentes preparos, água e doses de nitrogênio**. 2006. 48f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/ Sistemas de Produção) - Faculdade de Engenharia - UNESP, Ilha Solteira, 2006.

CERQUEIRA, R.C. **Influência do frio e do déficit hídrico nas características fisiológicas e bioquímicas em videiras (*Vitis vinifera* L.) cv. Thompson Seedless**. 2011, 124 f. Tese (Doutorado em Agronomia/ Horticultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.

CHAGAS, R.M. **Alterações fotossintéticas e respostas oxidativas em plantas de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) tratadas com paraquat**. 2007. 82 f. Dissertação (Mestrado em Fisiologia e Bioquímica de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2007.

CHANDRU, H.K. et al. Kinetics of woundinduced activation of antioxidative enzymes in *Oryza sativa*: differential activation at different growth stages. **Plant Science**, v.16, p.935-941, 2003.

CHAUDIÉRE, J.; FERRARI-ILIOU, R. Intracellular antioxidants; from chemical to biochemical mechanisms. **Food and Chemical Toxicology**, Oxford, v. 37, n. 9. p. 949-962, 1999.

CHAVES, M. M. et al. Grapevine under deficit irrigation: hints from physiological and molecular data. **Annals of Botany**, Oxford, v. 105, p. 661-676, 2010.

CHAVES, M. M.; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt Stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell. **Annals of Botany**, Oxford, v. 103, p. 551-560, 2009.

CHAVES, M. M.; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt Stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell. **Annals of Botany**, Oxford, v. 103, p. 551-560, 2009.

CHAVES, M.M. Effects of water stress on carbon assimilation. **Journal Exposition Botanic**, v.42: p. 1-16. 1991.

COLOM, M. R.; VAZZANA, C. Photosynthesis and PSII functionality of drought-resistant and drought sensitive weeping lovegrass plants. **Environmental and Experimental Botany**, Paris, v. 49, n. 2, p. 135-144, 2003.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Produção de grãos: safra 2010/11: 7º levantamento. Disponível em: <www.conab.gov.br>. Acesso em: 15 março de 2012.

CORPAS, F.J.; BARROSO, J.B.; del RIO, L.A. Peroxisomes as a source of reactive oxygen species and nitric oxide signal molecules in plant cells. **Trends in Plant Science**, v. 6, p. 145-150, 2001.

COSTA, L.C., MORISON, J., DENNETT, M. Effects of the weather on growth and radiation intercepted by Faba bean. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 32 (3), p. 277-281, 1997.

CRAWFORD, R.M.M.; HENDRY, G.A.F.; GOODMAN, B.A. (Ed.). **Oxygen and environmental stress in plants**. Edinburgh: Royal Society of Edinburgh, 1994. p.131-154.

CRUSCIOL, C.A.C. et al. Componentes de produção e produtividade de grãos de arroz de sequeiro em função do espaçamento e da densidade de semeadura. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 56, n. 1 p. 53-62, 1999a.

CRUSCIOL, C.A.C.; MACHADO, J.R.; ARF, O.; RODRIGUES, R.A.F. Matéria seca e absorção de nutrientes em função do espaçamento e da densidade de semeadura em arroz de terra alta. **Scientia Agricola**, Piracicaba. v. 56, n. 1, p. 63-70, 1999b.

CRUSCIOL, C. A. C. **Crescimento radicular, nutrição e produção de cultivares de arroz de terras altas em função da disponibilidade hídrica e de fósforo**. 2001. 111 f. Tese (Livre docência) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

CRUSCIOL, C.A.C. et al. Manejo de irrigação por aspersão com base no Kc e adubação mineral na cultura de arroz de terras altas. **Bragantia**, Campinas, v.62, p.465-75, 2003a.

CRUSCIOL, C. A. C. Influência de lâminas de água e adubação mineral na nutrição e produtividade de arroz de terras altas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 647-654, 2003 b.

CRUSCIOL, C.A.C. Produtividade do arroz de terras altas sob condições de sequeiro e irrigado por aspersão em função do espaçamento entre fileiras. **Agronomia**, v.37, n°.1, p.10 - 15, 2003c.

CRUSCIOL, C. A.C.C et al. Doses de fósforo e crescimento radicular de cultivares de arroz de terras altas. **Bragantia**. v.64, n.4, p.643-649, Campinas, 2005.

CRUSCIOL, C. A. C.; PULZ, A. L.; LEMOS, L. B.; SORATTO, R. P.; LIMA, G. P. P. Effects of silicon and drought stress on tuber yield and leaf biochemical characteristics in potato. **Crop Science**, Madison, v. 49, n. 3, p. 949-954, 2009.

CULTIVO DO ARROZ DE TERRAS ALTAS. Disponível em:
< [ttp://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozTerrasAltas/irrigacao.htm](http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozTerrasAltas/irrigacao.htm) > Acessado em fevereiro de 2012.

DAI, Z.; EDWARD, G.E.; KU, M.S.B. Control of photosynthesis and stomatal conductance in *Ricinus communis* L. (Castor bean) by leaf to air vapor pressure deficit. **Plant Physiology**, Lancaster, v. 99(4), 1426- 1434, 1992.

DALMAGO, G.A. **Dinâmica da água no solo em cultivo de milho sob plantio direto e preparo convencional**. Porto Alegre, 2004. 243p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DAREN, C. Plant genotypes, silicon concentration and silicon related responses. In: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.; KORNDORFER, G.H. (Coords). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier Science, 2001. p. 149-158.

DAYANANDAM, P.; KAUFFMAN, P. B.; FRANKIN, C. I. Detection of silica in plant. **American Journal of Botany**, v. 70, p. 1079-1084. 1983.

DE DATTA, S.K. **Principles and practices of rice production**. New York: John Willey, 1981. 618 p.

DEREN, C.W.; DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.; MARTIN, F.G. Silicon concentration, disease response, and yield components of rice genotypes grown on flooded organic histosols. **Crop Science**, v.34, p.733-37, 1994.

DEUNER, S. **Sistema antioxidante em mudas de cafeeiro sob condições de déficit hídrico**. Lavras: UFLA, 2007. 65p.

DJAMIN, A.; PATHAK, M.D. Role of silica in resistance to Asiatic rice borer, *Chilo suppressalis* (Walker) in rice varieties. **Journal of Economic Entomology**, Lanham, v.60, p.347-351, 1967.

DONG, Z.A.; XIE, F.T. Effects of drought treatments at different stages on the enzyme activities and membrane permeabilities of soybeans. **Soybean Science**, v.14, p.290-298, 1995.

DÖRR, L.C. et al. Alterações enzimáticas em sementes de trigo recobertas com silício. In: XX CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA. 2011. **Anais....** III Mostra científica. UFPEL. 2011.

EKANAYAKE, I.J.; DE DATTA, S.K.; STEPONKUS, P.L. Effect of water deficit stress on diffusive resistance, transpiration and spikelet desiccation of rice (*Oryza sativa* L.). **Annals of Botany**, v.72, p. 73-80, 1993.

ELLIOT, C.L., SNYDER, G.H. Autoclave-induced digestion for the colorimetric determination of silicon in rice straw. **Journal Agriculture Food Chemistry**. v.39, p.1118-1119, 1991.

ELSTNER, E.F. Mechanisms of oxygen activation in different compartments of plant cells. In: PELL, E.J.; STEFFEN, K.L., eds. **Active oxygenuoxidative stress and plant metabolism**. Rockville, MD: American Society of Plant Physiologists, 1991, p. 3-25.

ELSTNER, E.F. Mechanisms of oxygen activation in different compartments of plant cells. In: PELL, E.J.; STEFFEN, K.L., eds. **Active oxygenuoxidative stress and plant metabolism**. Rockville, MD: American Society of Plant Physiologists, 1991, p. 3-25.

EMBRAPA. Cultivo do arroz de terras altas. Disponível em:
< <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozTerrasAltas/irrigacao.htm> > Acessado em fevereiro de 2012.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Empresa Arroz e Feijão. BRSMG Curinga: Cultivar de Arroz de Terras Altas de Ampla Adaptação para o Brasil. **Comunicado técnico**. Santo Antônio de Goiás, GO. Novembro, 2005.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: CNPS, 1997. p. 212.

Empresa Arroz e Feijão. BRSMG Curinga: Cultivar de Arroz de Terras Altas de Ampla Adaptação para o Brasil. **Comunicado técnico**. Santo Antônio de Goiás, GO. Novembro, 2005.

ENGELS, C.; MARSCHNER, H. Plant uptake and utilization of nitrogen. In: BACON, P. E. (Ed.). *Nitrogen fertilization in the environment*. New York: Marcel Dekker, 1995. p.41-81.

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

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

ERASMO, E.A.L et al. Potencial de espécies utilizadas como adubo verde no manejo integrado de plantas daninhas. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 22, n. 3, p. 337-342, 2004.

FAGERIA, N. K. Deficiência hídrica em arroz de cerrado e resposta ao fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 15, p. 259-265, 1980.

FAGERIA, N. K.; SLATON, N. A.; BALIGAR, V. C. Nutrient management for improving lowland rice productivity and sustainability. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 80, p. 63-152, 2003.

FAGERIA, N.K et al. Resposta diferencial de genótipos de arroz de sequeiro à fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.19, n.2, p.261-267, 1995a.

FALQUETO, A. R. **Crescimento, fotossíntese e partição de assimilados em genótipos de arroz irrigado**. 2008, 104f, Tese (Doutorado em Agronomia/ Fisiologia Vegetal) Universidade Federal de Pelotas, 2008.

FARIA, R. **Efeito da acumulação de silício e a tolerância das plantas de arroz do sequeiro ao déficit hídrico do solo**. 2000. 125p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Solos. Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.

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

FAWE, A. Silicon-mediated accumulation of flavonir phytoalexins in cucumber. *Phytopathology*. St Paul, v. 88, n. 5, p. 396-401, may 1998.

FEIERABEND, J.; SCHAAN, C.; HERTWIG, B. Photoinactivation of catalase occurs under both high and low temperature stress conditions and accompanies photoinhibition of photosystem II. **Plant Physiology**, Rockville, v. 100, p. 1554-1561, 1992.

FERREIRA, C.M.; VILLAR, P.M. Aspecto da produção e do mercado do arroz. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.25, n.222. p.11-18, 2004.

FERREIRA, S.M. **O efeito do silício na cultura do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.): aspectos bioquímicos, qualidade de fibra e produtividade**. 2008, 67 f. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba 2008.

- FERREIRA, V.M. et al. Metabolismo do nitrogênio associado à deficiência hídrica e sua recuperação em genótipos de milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, n.1, p.13-17, 2002.
- FERRI, M.G. Histórico dos trabalhos botânicos sobre o cerrado. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 1963, São Paulo. **Anais...** São Paulo, Universidade de São Paulo, 1963. p.15-150.
- FIDELIS, R. R. et al. Eficiência no uso de nitrogênio de genótipos de arroz em solos de várzea irrigada. **Revista Verde**. v.7, n.1, p. 264 - 272 janeiro/março. Mossoró – RN, 2012.
- FIORI, M. P. **Comportamento de cultivares de tomateiro quanto à utilização de escórias siderúrgicas em ambiente protegido**. 2006. 54f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitotecnia) - Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade de Marília – UNIMAR, Marília, 2006.
- FLEXAS, J. et al. Photosynthesis limitations during water stress acclimation and recovery in the drought-adapted Vitis hybrid Richter-110 (V. berlandieri x V. rupestris). *Journal of Experimental Botany*. v.60: p.2362-2377, 2009.
- FLOSS, E.L. **Fisiologia das plantas cultivadas**. Passo Fundo: UPF, ed. 4, 2008. 749p.
- FORCE, L.; CRITCHLEY, C., VAN RENSEN, J. J. S. New fluorescence parameters for monitoring photosynthesis in plants. **Photosynthesis Research**, v. 78, p. 17-33, 2003.
- FORNASIERI FILHO, D.; FORNASIERI, J. L. **Manual da cultura do arroz**. Jaboticabal: Funep. n. 589 p. 2006.
- FOYER, C. H.; NOCTOR, G. Redox homeostis and antioxidant signaling: a metabolic interface between stress perception and physiological responses, **Plant Cell** n. 17, p. 1866 - 1875, 2005.
- FOYER, C.H.; LELANDAIA, M.; KUNERT, K.J. Photooxidative stress in plants. **Physiologia Plantarum**, v. 92, p. 696-717, 1994.
- FOYER, C.H.; NOCTOR, G.. Redox sensing and signaling associated with reactive oxygen in chloroplasts, peroxisomes and mitochondria. **Physiologic Plant**. n. 119 p.355-364, 2003.
- FOYER, C. H.; SHIGEOKA, S. Understanding Oxidative Stress and Antioxidant Functions to Enhance Photosynthesis. **Plant Physiology**, v. 155, p. 93-100, jan. 2011.
- FREITAS, L. B. **Silício na tolerância ao alumínio por plantas de arroz**. 2011. 113f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Produção Vegetal) – Faculdade de Ciência Agrárias, UNESP. 2011.

- FRY, S.C. Cross-linking of matrix polymers in growing cell wall of angiosperms. **Annual Review of Plant Physiology**, v.37, p.165-186, 1986.
- FU, J.; HUANG, B. Involvement of antioxidants and lipid peroxidation in the daptation of two cool-season grasses to localized drought stress. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 45, n. 2, p. 105-114, 2001.
- FUMIS, T.F.; PEDRAS, J.F. Variação nos níveis de prolina, diamina e poliaminas em cultivares de trigo submetidas a déficits hídricos. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 4, p. 449-453, abr. 2002.
- GALVÍNCIO, J. D.; PIMENTEL, R. M. M.; FERNANDES, J. G. Relação da temperatura do ar e do solo com a quantidade de clorofila a e b em jurema preta (*Mimosa tenuiflora* (Willd) Poiret) no semi-árido do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**. n. 03, p. 41-46, 2010.
- GAO, X. et al. Silicon improves water use efficiency in Maize palnt. **Journal of Plant Nutrition**. V. 27, n. 8, p. 1457-1470, 2004.
- GASPAR, T. et al. A two step control of basic and acid peroxidase and its significance for growth and development. **Physiologia Plantarum**, v.64, p.418-423, 1985.
- GHANNOUM, O. Nonstomatal limitations are responsible for drought-induced photosynthetic inhibition in four C₄ grasses. **New Phytologist**, v.159, p.599-608, 2003.
- GIANNOPOLITIS, C.N.; RIES, S.K. Supeóxido dismutases. I. occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, v. 59, p.309-314, 1977.
- GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. Review. **Plant Physiology and Biochemistry**. n. 48 p. 909-930, 2010.
- GILL, S.S. Amelioration of cadmium stress in crop plants by nutrients management: Morphological, physiological and biochemical aspects. **Plant Stress**. n. 5(Special Issue 1), v. 1-23, 2011.
- GLAZ, B.; MORRIS, D. R.; DAROUB, S. H. Sugarcane photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance due to flooding and water table. **Crop Science**, v.44, p.1633-1641, 2004.
- GOLDBERG, R.; LÊ, T.; CATESSON, A.M. Localization and proprieties of cell wall enzyme activities related to the final stages of lignin biosynthesis. **Journal of Experimental Botany**, v.36, p.503-510, 1985.

GOMES, C. F. Disponibilidade de silício para a cultura do arroz, em função de fontes, tempo de incubação e classes de solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 4, p. 531-538, out./dez. 2011.

GONÇALVES, E. R. **Fotossíntese, osmorregulação e crescimento inicial de quatro variedades de cana-de-açúcar submetida à deficiência hídrica**. 2008. 66 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Produção Vegetal)-Universidade Federal do Alagoas, Rio Largo, 2008.

GONÇALVES, E. R. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.4, p.378-386, 2010.

GONG, H.; ZHU, X.; CHEN, K.; WANG, S.; ZHANG, C. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, v. 169, p. 313-321, 2005.

GORANTLA, M. et al. Identification of stress-responsive genes in an indica rice (*Oryza sativa* L.) using ESTs generated from drought-stressed seedlings. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 58, n. 2, p. 253-265, Jan. 2007.

GRASSI, G.; MAGNANI, F. Stomatal, mesophyll conductance and biochemical limitations to photosynthesis as affected by drought and leaf ontogeny in ash and oak trees. **Plant, Cell and Environment**. v. 28. p. 834-849. 2005.

GRATÃO, P. L. et al. Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. **Functional Plant Biology**, Australia, n. 32, p. 481-494, 2005.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F. Adubação nitrogenada do arroz de terras altas no Sistema Plantio Direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, p.210-214, Campina Grande, PB, 2003.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; CASTRO, E. M. Comportamento de cultivares de arroz de terras altas no sistema plantio direto em duas profundidades de adubação. **Bioscience journal, Uberlândia**, v. 22, p. 53-59, jan. / abr, 2006.

GUIMARÃES, C.M. et al. Sistemas de Cultivo. In: SANTOS, A.B.; VIEIRA, N.R.A. **A cultura do Arroz no Brasil** – 2. Ed. Ver. Ampl. – Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 1000p.

GUIMARÃES, C.M.; STONE, L.F. Arroz de terras altas em rotação com soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 34, p. 127-132, 2004.

GUIMARÃES, C. M. Sistema radicular do arroz de terras altas sob deficiência hídrica. **Pesquisa Agropecuária**. Tropical, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 126-134, jan./mar. 2011.

- GUPTA, A. et al. Over-expression of superoxide dismutase protects plants from oxidative stress. Induction of ascorbate peroxidase in superoxide dismutase over-expressing plants. **Plant Physiology**, Rockville, v.103, p.1067-1073, 1993.
- HALLIWELL, B.; GUTTERIDGE, J.M.C. **Free radicals in biology and medicine**. New York: Oxford University Press. 1999, 936p.
- HEGEDÜS, A.; ERDEI, S.; HORVÁTH, G. Comparative studies of H₂O₂ detoxifying enzymes in green and greening barley seedlings under cadmium stress. **Plant Science**, Limerick, v. 160, p.1085–1093, 2001.
- HEINEMANN, A. B.; STONE, L. F.; FAGERIA, N. K.; CASTRO, L. M. de. Transpiration rate response to water deficit during vegetative and reproductive phase of upland rice cultivar. **Scientia Agricola**, v. 68, n. 1, p. 24-30. Piracicaba, 2011.
- HENDRY, G. A. F; PRICE, A. H. Stress indicators: chlorophylls and carotenoids. In: HENDRY, G. A. F.; GRIME, J. P. (Eds.) **Methods in comparative plant ecology**. London: Chapman; Hall, 1993. p. 148-152.
- HENRIQUES, J.A.P. Espécies reativas de oxigênio e avaliação de antioxidantes em sistemas biológicos. In: SERAFINI, L.A.; Barros, N.M.; AZEVEDO, J.L. (Coords) **Biotecnologia na Agricultura e na Agroindústria**, Guaíba: Agropecuária, v.1, p. 227-252, 2001.
- HERNANDES, A. et al. Doses, fontes e épocas de aplicação de nitrogênio em cultivares de arroz. **Ciência agrotecnica**, v. 34, n. 2, p. 307-312, mar./abr. Lavras,2010.
- HERTWIG, B.; STREB, P.; FEIERABEND J. Light dependence of catalase synthesis and degradation in leaves and the influence of interfering stress conditions. **Plant Physiology**, v. 100, p. 1547-1553, 1992.
- HEUER, B.; PLAUT, N.; FEDERMAN, E. Nitrate and nitrite reduction in wheat leaves as affected by different types of water stress. **Physiologia Plantarum**, v.46, p.318-323, 1979.
- HOAGLAND, R. E. Biochemical responses of plants to pathogens. In: HOAGLAND, R.E. (Ed.). **Microbes and microbial products as herbicides**. Washington: American Chemical Society, 1990. p.87-113.
- HOLZSCHUH, M. J. et al. Resposta do arroz irrigado ao suprimento de amônio e nitrato. Revista **Brasileira de Ciência do Solo**. v. 33, p.1323-1331, 2009.
- 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**, v.24, p.1-13, 2001.

HSIAO, T.C. Plant responses to water stress. **Annual Review of Plant Physiology**, 24:519-570, 1972.

HSIAO, T. C. Plant response to water stress. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 24, p. 519-570, 1973.

HUANG, M., GUO, Z. Responses of antioxidative system to chilling stress in two rice cultivars differing in sensitivity. **Biologia Plantarum**, 49:81-84, 2005a.

INZE, D.; VAN MONTAGU, M. Oxidative stress in plants. **Current Opinion in Biotechnology**, New York, v. 6, p. 153-158, 1995.

IUBMB. International Union of Biochemistry and Molecular Biology. Enzyme nomenclature – EC 1.11.1.7. (Peroxidase). Disponível em: <<http://www.chem.qmul.ac.uk/iubmb/enzyme/EC1/11/1/7.html>>. Acesso em: 10 dezembro de 2011.

JACKSON, M. L. Chemical composition of soils. In F. E. Bear (ed.) **Chemistry of the soil**. 2. ed. New York: Reinhold Publishing Corporation, 1964. p. 71-141.

JACOBS, C. M.; HURK, B. J. J. M. van den; BRUIN, H. A. R. de. Stomatal behaviour and photosynthetic rate of unstressed grapevines in semi-arid conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 80, p. 111-134, 1996.

JAMAUX, I.; STEINMETZ, A.; BELHASSEN, E. Looking for molecular and physiological markers of osmotic adjustment in sunflower. **New Phytologist**, Oxford, v. 137, p. 117-127, 1997.

JAWORSKI, E. G. Nitrate reductase assay in intact plant tissues. **Biochemical and Biophysical Research Communications**, Orlando, v. 43, p. 1274-1279, 1971.

JONES, H.G.; OSMOND, C.B. Photosynthesis by thin leaf slices in solution. I Properties of leaf slices and comparison with whole leaves. **Journal Bioscience Science**. v. 26. p. 15-24, Australian , 1973.

JONG van LIER, Q. Índices da disponibilidade de água às plantas. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1. p.95-106.

KAISER, W.M.; HUBER, S.C. Pos-translation regulation of nitrate reductase: mechanism, physiological relevance and environmental triggers. **Journal of Experimental Botany**, v.52, p. 1981-1989, 2001.

KALIR, A.; POLJAKOFF-MAYBER, A.; Changes in activity of malate dehydrogenase, catalase, peroxidase and superoxido dismutase in leaves of *Halimione portulacoides* L. aellen exposed to high sodium chloride concentrations. **Annals of Botany**. v. 47, p.75-85, 1981.

KNÖRZER, O.C., DURNER, J., BÖGER, P. Alterations in the antioxidative system of suspension-cultured soybean cells (*Glycine max*) induced by oxidative stress. **Physiologia Plantarum**, v.97, p.388-96, 1996.

KNOX, J. P.; DODGE, A. D. Singlet oxygen and plants. **Phytochemistry**, v. 24, p. 889-896, 1985.

KÖHLE, H. et al. Physiological effects of the strobilurin fungicide F 500 on plants. In: DEHNE, H. W. et al. (Coords.). **Modern fungicides and antifungal compounds III**. Bonn: Agro Concept GmbH, 2002. p. 61-74.

KONDORFER, G.H. et al. Influencia do silicato de cálcio na tolerância do arroz de sequeiro ao déficit hídrico no solo. In: FERTBIO 2002. Rio de Janeiro 2002. **Anais...**Rio de Janeiro: CPGA-CS/UFRRJ, 2002. CD-ROOM.

KORNDÖRFER G.H. et al. Efeito do silicato de cálcio no teor de silício no solo e na produção de grãos de arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 635-641, 1999b.

KORNDORFER GH; PEREIRA HS; CAMARGO MS. 2002. Silicato de cálcio e magnésio na agricultura. Uberlândia: UFU. 23p. (**Boletim técnico, 01**).

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

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**, Viçosa, v.23, p.101-106, 1999a.

KORNDÖRFER, G.H. et al. Avaliação de métodos de extração de silício em solos cultivados com arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v.23 p.101-6, 1999c.

KORNDÖRFER, G.H. et al. Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura. Uberlândia: UFU/Iciag, 2004.

KORNDÖRFER, G.H.; PEREIRA, H.S.; CAMARGO, M.S. Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura. 53p. (**Boletim técnico, 1**). Uberlândia: GPSi- ICIAG-UFU, 2003.

KOSHIBA, T. Cytosolic ascorbate peroxidase in seedlings and leaves of maize (*Zea mays*). **Plant and Cell Physiology**, v. 34, p.713-721, 1993.

KOZLOWSKI , T. T.; PALLARDY , S. G. Acclimation and adaptive responses of woody plants to environmental stresses. **Botanical Review**, Bronx, v. 68, n. 2, p. 270-334, Apr./June 2002.

KRAMER, P. J. **Water relations of plants**. Academic Press, Orlando, FL. 1983, 489p.

KRAUSE, G.H.; WEIS, E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 42, p. 313-349, 1991.

KUNZ, J. H. Uso da radiação solar pelo milho sob diferentes preparos do solo, espaçamento e disponibilidade hídrica. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.42, n.11, p.1511-1520, nov. 2007.

LANNA, A. C. Panorama Ambiental e Físio-Molecular do arroz de terras altas. **Embrapa Arroz e Feijão**. Santo Antônio de Goiás, GO. Documentos 274. 32p. 2012.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima Artes e Textos, 2000. 531 p.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. PRADO, C. H. B. A. (Trad.). São Carlos: Rima, 2006. 531p.

LAWLOR, D.W.; TEZARA, W. Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in water-deficient leaf cells: a critical evaluation of mechanisms and integration of processes. – **Annual Botanic**. v.103: 561-579. 2009.

LÁZARO, C. C. M. Efeito do sombreamento em variedades de *Stylosanthes guianensis*. 2007. 52f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/ Genética e Melhoramento de Plantas) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp. Jaboticabal, São Paulo, 2007.

LEE, D. W.; BREMMEIER, S.; SMITH, A. P. The selective advantage of anthocyanins in developing leaves of mango and cacao. **Biotropica**, v. 19, p. 40-49, 1987.

LEE, D.W. Simulating forest shade to study the development ecology of tropical plants: juvenile growth in three vines in India. **Journal of Tropical Ecology**, v.4, p.281-292, 1988.

LEITE, A. O ano do arroz. **Revista Atualidade Agrícola**. São Paulo, ago 2004. p. 6-7.

LIMA FILHO, O. F. Produtividade e manejo do solo: o caso do silício. **Embrapa Agropecuária Oeste**. Disponível em: <http://www.socitrus.com.br/silicio.htm>. 2009.

LIMA, G. P. P.; BROETTO, F.; BRASIL, O. G. Efeito da salinidade sobre o teor de proteínas e atividades da peroxidase e redutase de nitrato em calos de arroz. **Acta Biologica Leopoldensia**, v. 20, p. 357-363, 1998.

LIMA, M.G.S.; LOPES, N.F.; BACARIN, M.A.; MENDES, C.R. Efeito do estresse salino sobre a concentração de pigmentos e prolina em folhas de arroz. **Bragantia**, Campinas, v.63, n.3, p.335-340, 2004.

LOPES, F.C.A. Efeito de fontes de silício no controle de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* em tomateiro (*Lycopersicon esculentum* Mill.). 2006. 78 f. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

MA, J. F.; TAKAHASHI, E. Soil, Fertilizer, and Plant Silicon Research in Japan. 1º Edição, **Elsevier Science**. Amsterdam 2002.

MA, J.F. Role of silicon in enhancing the resistanc of plants to biotic and abiotic stresses. **Soil Science Plant Nutrition**, v.50, p.11-18, 2004.

MACHADO, E.C.; LAGÔA, A.M.M.A. Trocas gasosas e condutância estomática em três espécies de gramíneas. **Bragantia**, Campinas, v.53, n.2, p.141-149, 1994.

MADEIROS, L. B.; VIEIRA, A. O.; AQUINO, B. F. Influência da escória siderúrgica sobre trocas gasosas e produção de biomassa da cana-de-açúcar. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 6, n. 2, p. 121-129, mai /ago 2009.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 238p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. 2.ed. rev. atual. Piracicaba: POTAFÓS, 1997. 319 p.

MARCHEZAN, E. Aplicação de silício em arroz irrigado: efeito nos components da produção. **Bioscience journal**, v. 20, n. 3, p. 125-131, set. dec. 2004.

MARCUM, K.B. MURDOCH, C.L. Growth responses, ion relations, and osmotic adaptation of eleven C4 turfgrasses to salinity. **Agronomy Journal**. Madison, v. 82, p. 892-896, 1990.

MARQUEL, J. H et al. Resposta do arroz irrigado ao suprimento de amônio e nitrato. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v.3, p.1323-1331, 2009.

MARQUES, D. J. Estresse mineral induzido por fertilizantes potássicos em plantas de berinjela (*solanum melogena l.*) e seu efeito sobre parâmetros agronômicos e metabólicos. 2009. 168f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Horticultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP. Botucatu. 2009.

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

MARTINS, L. L.; MOURATO, M. P. Alterações no metabolismo de plantas em meios contaminados por metais pesados: stresse oxidativo. **Revista Agros**, Lisboa, v. 8, p. 6, 2008.

MARTINS, P. O. **Cinética de absorção de silício por cultivares de cana-de-açúcar e de arroz**. 2010. 79f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Produção Vegetal) – Faculdade de Ciência Agrárias, UNESP. 2010.

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 Solo**, v. 27, p. 867-873, 2003.

MAUAD, M. **Produção de plantas de arroz de sob a ação de silício e nitrogênio**. 2001. 87 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

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**, v. 27, p.867-873, 2003.

McLAREN, R. G.; CAMERON, K. C. Soil science: sustainable production and environmental protection. 2. ed. Auckland: Oxford University Press, 1996. 304 p.

MEDEIROS, R.D. **Efeitos da compactação do solo e da umidade sobre a absorção de N, P, K, os componentes de produção e a produtividade de grãos de arroz**. 2004. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

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

MENEZES-BENAVENTE, L. Salt stress induces altered expression of genes encoding antioxidant enzymes in seedlings of a brazilian indica rice (*Oryza sativa* L.). **Plant Science**, Limerick, v.166, n.2, p.323-331, 2004.

MENGEL, K.E.; KIRKBY, G.A. Further elements of importance. In: **Principles of plant**. 4.ed. Worblaufen- Bern, International Potash Institute, p.573-588. 1987.

MESCHEDE, D.K. et al. Alteração fisiológica da cana-de-açúcar pela aplicação de glyphosate e sulfometuron-methyl. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 413-419, 2011.

MISZALSKI, Z. et al. Subcellular localization and stress response of superoxide dismutase isoforms from leaves in the C3-CAM intermediate halophyte *Mesembryanthemum crystallinum* L. **Plant, Cell and Environment**, v.21, 169-179, 1998.
Science, v. 9, p. 405-410, 2002.

MISZALSKI, Z. et al. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in Plant**.

- MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends Plant Science**, v. 9, p. 405-410, 2002.
- MITTLER, R. Reactive oxygen gene network of plants. **Trends Plant Science**, n. 9 p. 490-498, 2004.
- MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Effect of silicon on the growth of soybean plants in a solution culture. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 31, n. 4, p. 625-636, Dec. 1985.
- MIZUNO, M., KAMEI, M., TSUCHIDA, H. Ascorbate peroxidase and catalase cooperate for protection against hydrogen peroxide generated in potato tubers during low-temperature storage. **Biochemistry Molecular Biology International**, v. 44, p.717-725, 1998.
- MOLDES, C.A. et al. Actividad de enzimas antioxidantes en algodón com diferentes dosis de silicio. In: REUNIÓN DE LA ASOCIACIÓN ARGENTINA DE FISIOLÓGÍA VEGETAL, 26., 2006, **Anais...** Chascomus, Argentina. Chascomus: AAFV, 2006. 1 CD-ROM.
- MOLLER, I.M., JENSEN, P.E., HANSSON, A. Oxidative modifications to cellular components in plants. **Annual Review of Plant Biology**, v.58, p.459-481, 2007.
- MONAKHOVA, O.F.; CHERNYADÈV, I.I. Protective role of kartolin-4 in wheat plants exposed to soil drought. **Journal of Applied Biochemistry and Microbiology**, Moscow, v. 38, n. 4, p. 433-440, 2002.
- MORAIS, R.R. et al. Chloroplastid pigment contents and chlorophyll a fluorescence in amazonian tropical three species. **Revista Árvore**, v. 31, n. 5, p. 959-966, 2007.
- MOREIRA, M.F., KLUGE. Arroz. In: CASTRO, P.R.C., KLUGE, R.A. (Eds.). **Ecofisiologia de cultivos anuais**. São Paulo: Nobel, 1999. p.91-108.
- MORENO, F.L.P. **Repuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico**. Una revisión Agronomía Colombiana, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.v. 27, n. 2, p. 179-191. 2009.
- MORILLA, C.; BOYER, J.S.; HAGEMAN, R.H. Nitrate reductase activity and polyribosomal content of corn having low leaf water potential. **Plant Physiology**, v.51, p.817-824, 1973.
- MORO, EDEMAR. **Formas de nitrogênio no solo e produção do arroz de terras altas em plantio direto**. 2011. 129 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.
- NASCENTE, A. S et al. Desenvolvimento e produtividade de cultivares de arroz de terras altas em função do manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. v. 41, n. 2, p. 186-192, abr./jun. Goiânia,2011.

NEPOMUCENO, A.L. et al. Tolerância à seca em plantas: Mecanismos fisiológicos e moleculares. **Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento**. Brasília-DF, v. 23, p.12-18, 2001.

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

NIU, X. et al. Ion Homeostasis in NaCl Stress Environments. **Plant Physiology**, v. 109, p. 735-742, 1995.

NOBEL, P. S. **Physicochemical and environmental plant physiology**. Academic Press, New York, 1999.

NOCTOR, G.; FOYER, C.H. A re-evaluation of the ATP: NADPH budget during C₃ photosynthesis. A contribution from nitrate assimilation and its associated respiratory activity. **Journal Expulsion Botanic**. n. 49, p. 1895-1908, 1998.

NOGUEIRA, R.J.M.C.; MORAES, J.A.P.V.; BURITY, H.A. Alterações na resistência à difusão de vapor das folhas e relações hídricas em aceroleira submetidas a déficit de água. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Londrina, v.13, n.1, p.75-87, 2001.

O AGRONÔMICO. **IAC 202: arroz de alta produtividade e qualidade para cultura de sequeiro**, Campinas, v. 52, n. 1, 2000.

OLIVEIRA C.A.S.; VALADAO L.T. **Manejo da água do solo no cultivo da batata**. Comunicado Técnico da Embrapa Hortaliças n.3, 1997. 8p.

OLIVEIRA, L.A. **Silício em planta de feijão e arroz: absorção, transporte, redistribuição e tolerância ao cádmio**. 2009. 158 f. Tese (Doutorado em Ciência/ Energia nuclear na agricultura e ambiente) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2009.

OLIVEIRA, L.A.; CASTRO, N.M. **Ocorrência de Sílica nas folhas de Curatella americana L. e de Davilla elliptica ST. Hil. Ver.** Horizonte Científico, 2002. Disponível em: <WWW.Propp.ufu.br/revistaeletrônica/B/OCORRENCIA.pdf.>. Acesso em: 10 de janeiro de 2012.

OLIVEIRA, L.A.; KORNDÖRFER, G.H.; PEREIRA, A.C. Acumulação de silício em arroz em diferentes condições de pH da rizosfera. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 685-690, 2007.

PARRY, M.A.J. et al. Rubisco activity: effects of drought stress. **Annals of Botany**. v.89. p.833-839. 2002.

PASTORI, G.M.; FOYER, C.H. Common components, networks, and pathways of cross-tolerance to stress. The central role of 'redox' and abscisic acid-mediated controls. **Plant Physiol**. v. 129, p. 7460-7468, 2002.

PEAK, D. Evidence for complex, collective dynamics and emergent, distributed computation in plants. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v.101, p.918-922, 2004.

PEIXOTO, P.H.P. et al. Aluminum effects on lipid peroxidation and the activities of enzymes of oxidative metabolism in sorghum. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Viçosa, v.11, n.3, p.137-43, 1999.

PENG, C.L et al. Response to high temperature in flag leaves of super high-yielding rice Pei'ai 64S/E32 and Liangyoupeijiu. **Rice Science**. n. 12, p. 179-186, 2005.

PEREIRA, H. S. Silicon sources for rice crop. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 65, n. 5, p. 522-528, 2004.

PERSHIN, B.M.; PERSHINA, A.N.; EGORINA, L.M. Silicon and rice production in the Primorskii region. **Agrokhimiya**, Lebedeva, v. 10, n. 1, p. 68- 74, 1995.

PESSOA FILHO, M. A. C. P. **Identificação de regiões genômicas associadas ao controle de tolerância à seca em variedades tradicionais de arroz de sequeiro (*Oryza sativa* spp. japonica)**. 2008. 249 f. Tese (Doutorado em Biologia Molecular) – Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

PETERS, G. A.; CALVERT, H. F. The Azzola – Anabaena symbiosis. In: RAOS, N. S. S. (Eds.). *Advances in agricultural microbiology*. New Delhi: Oxford & Igh, 1982. p. 191-218.

PIMENTEL, C. **A relação da planta com a água**. Seropédica, Edur. 191p.

PINCELLI, R.P. **Tolerância à deficiência hídrica em cultivares de cana-de-açúcar avaliada por meio de variáveis morfofisiológicas**. 2010. 78 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010. 78p.

PINHEIRO, B.S et al. Características morfológicas da planta relacionadas à produtividade. In: **A cultura do arroz no Brasil**. 2 ed. ver. Ampl. – Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. p. 231-284.

PINHEIRO, C; CHAVES, M. M. Photosynthesis and drought: can we make metabolic connections from available data? *Journal Experimental Botany*. v.62: p.869-882, 2011. *Plant Nutrition*, Tokyo, v. 27, p. 347-355, 1981.

POLLE, A. Dissecting the superoxide dismutase-ascorbate-glutathione-pathway in chloroplasts by metabolic modeling. *Computer simulations as a step towards flux analysis*. **Plant Physiology**, Rockville, v.126, p.445-462, 2001.

- PONNAMPERUMA, F.N. Growth-limiting factors of aerobic soils. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE, Los Baños, Filipinas. Major research in upland rice. Los Baños, 1975. p. 40-43.
- POZZA, A. A. A. Suprimento do silicato de cálcio e a eficiência nutricional de variedades de cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1705-1714, 2009.
- PRABHU, A.S. et al. Influência de fertilização com Si sobre mancha de grãos em arroz. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, DF, v. 21, p. 405, 1996.
- PRASERTSAK, A.; FUKAI, S. Nitrogen availability and water stress interaction on rice growth and yield. **Field Crop Res.**, Amsterdam, v.52, p.249-260, 1997.
- PRATES, F. B. S. **Crescimento, Desenvolvimento e Nutrição de Pinhão Manso Adubado com Lodo de Esgoto e Silicato de Cálcio e Magnésio**. 2010. 93 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Instituto de Ciências Agrárias, UFMG. Montes Claros, 2010.
- PRIMAVESI, A. C. Absorção de cátions e ânions pelo capim-coastcross adubado com uréia e nitrato de amônio. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.40, n.3, p.247-253, mar. 2005.
- PULZ, A. L. et al. Influência de silicato e calcário na nutrição, produtividade e qualidade da batata sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 4, p. 1651-1659, 2008.
- PULZ, A.L. **Estresse hídrico e adubação silicatada em batata (*Solanum Tuberosum* L.) c.v. Bintje**. 2007. 68 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.
- PUPATTO, J. G. C. et al. **Atributos químicos do solo, crescimento radicular e produtividade do arroz de acordo com a aplicação de escórias**. Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília, v.39, n.12, p.1213-1218, dez. 2004.
- PUPATTO, J.G.C. **Trocas gasosas e eficiência de uso da água da cultura do arroz irrigado por aspersão em função da aplicação de silício**. 2003. 151 f. Tese (Doutorado em Agronomia /Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.
- PURCINO, A.A.C. et al. Atividade da redutase do nitrato em genótipos antigos e modernos de milho, cultivados sob dois níveis de N. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Londrina, v. 6, n. 1, p. 41-46, 1994.
- RABELLO, A.R. **Identificação de genes responsivos à seca em raiz de arroz de sequeiro (*Oryza sativa* L.)**. 2008. 80 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/ Produção Sustentável) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2008.

RAFI, M.M.; EPSTEIN, E.; FALK, R.H. Silicon deprivation causes physical abnormalities in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Journal Plant Physiology**, London, v.151, p.497-501, 1997.

RAIJ, B. et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

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

RANGEL, P. H. N. Ganhos na produtividade de grãos pelo melhoramento genético do arroz irrigado nomeio-norte do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 8, p. 1595-1604, 2000.

RANIERI, A. et al. Gluthatione-ascorbic acid cycle in pumpkin plants grown under polluted air in open-top chambers. **Journal of Plant Physiology**, v. 142, p. 286-290, 1993.

RAVEN, J. A. The transport and function of silicon in plants. **Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society**, v. 58, p. 179-207, 1983.

REDDY, A. R.; CHAITANYA, K. V.; VIVEKANANDAN, M. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v. 161, p. 1189-1202, 2004.

RIBEIRO, C. **Sistema de defesa contra estresses oxidativos em dois cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.) com tolerância diferencial ao alumínio**. 2007. 61 f. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

RICE-EVANS, C.A.; DIPLOCK, A.T.; SYMONS, M.C.R. **Techniques in free radical research**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers BV, 1991. v.22, 291p.

RICHARDS, L.A. Methods of measuring moisture tension. **Soil Science**, v.68, p.95-112, 1949.

RODRIGUES, R.A.F.; ARF, O. Manejo de água em cultivares de arroz de terras altas. Características fenológicas e agronômicas. In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ, 7., 2002, Florianópolis. **Anais...**Santo Antonio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2002. p.361-4.

RODRIGUES, R.A.F.; SORATTO, R.P.; ARF, O. Manejo de água em arroz de terras altas no sistema de plantio direto, usando o tanque classe A. **Engenharia Agrícola**, v.24, n.3, p.546-556, 2004. Set. 2010.

RODRIGUEZ-AMAYA, D.; KIMURA, M. HARVESTPLUS. Handbook for carotenóides analysis. Washington, DC and Cali: IFPRI and CIAT, 2004. 58 p. (HarvestPlus Technical Monograph, 2).

ROSA, S.B. **Caracterização funcional das isoformas citosólicas e peroxissomais de ascorbato peroxidase em arroz**. 2008, 156 f. Dissertação (Mestrado em Biologia celular e molecular) - Centro de Biotecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

ROSSI, C.; LIMA, G.P.P. Cádmio e atividade da peroxidase durante a germinação de sementes de feijoeiro. **Science Agriculture**, v.58, n.1, p.197-199, 2001.

RUPPENTHAL, V. **Adubação silicatada na cultura de soja e sua influência na tolerância ao déficit hídrico**. 2011, 71 f. Dissertação (Mestrado em Proteção de Plantas). Universidade do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2011.

SAATH, R. Qualidade do café natural e despulpado em diferentes condições de secagem e tempos de armazenamento. 2010. 246 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010.

SANDA, S. et al. Responses of the photosynthetic electron transport system to excess light energy caused by water deficit in wild watermelon. **Physiologia Plantarum**. v.142: p.247-264. 2011.

SANTOS, G.R. et al. Adubação com silício: influência sobre as principais doenças e sobre a produtividade do arroz irrigado por inundação. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 50, n.287, p.1-8, 2003.

SANTOS, M. C. **Efeito de diferentes doses de silício, nitrogênio e potássio na incidência da traça-do-tomateiro, pinta-preta e produtividade do tomate industrial**. 2008. 86f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Produção Vegetal) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária. Universidade de Brasília. 2008.

SANTOS, T. E. B et al. Variáveis microbiológicas e produtividade do arroz sob diferentes manejos do solo e água. **Acta Science Agronomy**. Maringá, v. 29, n. 3, p. 355-366, 2007.

SAVANT, N. K.; DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H. Depletion of plantavailable silicon in soils: a possible cause of declining rice yields. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 28, n. 13/14, p. 1245-1252, 1997a.

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

SCANDALIOS, J.G. Oxygen stress and superoxide dismutase. **Plant Physiology**, v. 101, p. 7-12, 1993.

SCANDALIOS, J.G. Molecular responses to oxidative stress. In: Hawkesford MJ & Buchner P (Editors), **Molecular Analysis of Plant Adaptation to the Environment**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 181-208. 2001.

SCANDALIOS, J.G. Oxidative stress: molecular perception and transduction of signals triggering antioxidant gene defenses, Brazilian. **Journal Medical Biologic**. n. 38, p. 995-1014, (2005).

SCHAFFER, L.; FEIERABEND, J. Photoinactivation and protection of glycolate oxidase in vitro and in leaves. **Zeitschrift für Naturforschung**, v. 55, p.361-372, 2000.

SCHMIDT, R.E.; ZHANG, X.; CHALMERS, D.R. Response of photosynthesis and superoxide dismutase to silica applied to creeping bentgrass grown under two fertility levels. **Journal of Plant Nutrition**, v.22, p.1763-1773, 1999.

SCHULZE, E.D.; HALL, A.E. Stomatal responses, water loss and CO₂ assimilation rates of plants in contrasting environments. In: LANGE, O.L. et al. **Physiological plant ecology**. II. Water relations and carbon assimilation. Berlin, Springer-Verlag, 1982. v. 12b, p. 181-230. (Encyclopedia of plant physiology).

SHARMA, P.; DUBEY, R. S. Ascorbate peroxidase from rice seedlings: properties of enzyme isoforms, effects of stresses and protective roles of osmolytes. **Plant Science**, v. 167, p. 541-550, 2004.

SHI, Z.J. et al. A study on the application of silicon fertilizer to cotton. **China Cotton**, Beijing, v.28, n.7, p.17-18, 2001.

SHIGEOKA, S. et al. Regulation and function of ascorbate peroxidase isoenzymes. **Journal of Experimental Botany**, v.53 (372), p.1305-1319, 2002.

SIEGEL, B.Z. Plant peroxidases: an organismic perspective. **Plant Growth Regulation**, v.12, p.303-312, 1993.

SILVA, E. F et al. Avaliação de cultivares de arroz de terras altas sob condições de sequeiro em cassilândia, MS. **Ciência agrotécnica**. v. 33, n. 1, p. 298-304, jan./fev. Lavras, 2009.

SILVA, E. F et al. Divergência fenotípica entre genótipos de arroz de terras altas. **Revista Brasileira de Ciência Agrária**. v.6, n.2, p.280-286, Recife, 2011.

SILVA, M.M.P. et al. Eficiência fotoquímica de gramíneas forrageiras tropicais submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.35, n.1, p.67-74, 2006.

Silva, N.E. Photosynthetic changes and protective mechanisms against oxidative damage subjected to isolated and combined drought and heat stresses in *Jatropha curcas* plants. **Journal of Plant Physiology** v. 165, p. 1157–1164, 2010.

SILVA, S. et al. Respostas fisiológicas de gramíneas promissoras para revegetação ciliar de reservatórios hidrelétricos, submetidas à deficiência hídrica. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v.25, n.1, p. 124-133, 2001.

SINHA, S.K.; NICHOLAS, D.J.D. Nitrate Reductase. In: PALEG, L.G.; ASPINALL, D. (Ed.) **The physiology and biochemistry of drought resistance in plants**. New York: Academic Press. 1981. p.145-168.

SMART, R.E.; BINGHAM, G.E. Rapid estimates of relative water content. **Plant Physiology**, v. 53, p. 258-260, 1974.

SOARES, A. M. S.; MACHADO, O. L. T. Defesa de plantas: Sinalização química e espécies reativas de oxigênio. **Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas**. v.1, n. 1, p. 9, 2007.

SOLOMONSON, L.P.; BARBER, M.J. Assimilatory nitrate reductase: functional properties and regulation. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 41, p. 225-253, 1990.

SOUSA, E. B. M. **Indicadores fisioquímicos para seleção de plantas de algodão herbáceo tolerantes à seca**. 2008. 94f. Dissertação (Mestrado em Botânica/Fisiologia Vegetal) Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, Recife, 2008.

SOUZA, C. R.; SOARES, A. M.; REGINA; M. A. Trocas gasosas de mudas de videira, obtidas por dois porta-enxertos, submetidos à deficiência hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 10, p. 1221-1230, 2001.

SOUZA, F. B. P. **Crescimento, desenvolvimento e nutrição de pinhão manso adubado com lodo de esgoto e silicato de cálcio e magnésio**. 2010, 94f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2010.

SOUZA, J.V. **Aplicação de silicato de potássio via foliar no milho: fotossíntese, crescimento e produtividade**. Monografia (Graduação em Agronomia). Uberlândia, UFU, 33f, 2008.

STEINMETZ, S.; MEIRELES, E.J.L. Clima. In: VIEIRA, N. R.A. **A cultura do arroz no Brasil**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. cap.3, p.58-87.

STEINMETZ, S.; REYNIERS, F. N.; FOREST, F. **Caracterização do regime pluviométrico e do balanço hídrico do arroz de sequeiro em distintas regiões produtoras do Brasil: síntese e interpretação dos resultados**. Goiânia: Embrapa- CNPAF, 1988. v. 1. (Embrapa-CNPAF. Documentos, 23).

STREIT, N.M., CANTERLE, L.P., CANTO, M.W., HECKTHEUER, L.H.H. As clorofilas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.3, p. 748-755, 2005.

TA, T. C.; OHIRA, K. Effects of various environmental and medium conditions on the response of Indica and Japonica rice plants to ammonium and nitrate nitrogen. *Soil Science & Plant Nutrition*, Tokyo, v. 27, p. 347-355, 1981.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, p.719, 2004.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, p.848, 2009.

TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of silica. In: MATSUO, T. et al. (Ed.). **Science of the rice plant: physiology**. Tokyo: Food and Agriculture Policy Research Center, cap. 5, p. 420-433. 1995.

TAKATSUKA, M. et al. Plant water relation and silicon concentration in two rice varieties differing in salinity tolerance. **Japan Journal Tropical Agriculture**, v.45, p.259-265, 2001.

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.

TAVARES, L.C. et al. Alterações enzimáticas em sementes de trigo recobertas com silício. XX CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA. **Anais... III Mostra científica**. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2011.

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

TOKURA, A. M. **Efeito do silício na fração fosfatada de solos cultivados com arroz e feijão**. 2004. 125p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais. 2004.

TOKURA, A. M. Silício e fósforo em diferentes solos cultivados com arroz de sequeiro **Acta Science Agronomy**. Maringá, v. 29, n. 1, p. 9-16, 2007.

TOKURA, A.M et al. Silício e fósforo em diferentes solos cultivados em arroz de sequeiro. **Acta Science Agronomy**. Maringá, v. 9, n. 1, p. 9-16, 2007.

TONIN, F.B. **Atividade de enzimas antioxidativas e absorção de silício em plantas de pimentão submetidas a estresse salino**. 2005. 104 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Horticultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

TOPP, G.C. et al. Soil water desorption curves. In: CARTER, M.R. (Ed). **Soil Sampling and Methods of analysis**. Florida: Lewis Publishers, 1993, p. 569-579.

TSANG, E.W.T. et al. Differential regulation of superoxide dismutases in plants exposed to environmental stress. **Plant Cell**, v.3, p.783- 92, 1991.

TURNER, N. C. Adaptation to water deficits: a changing perspective. *Austr. J. Plant Physiol.*, 1986. v. 43: p.175-190.

VAN BREUSEGEM, F. The role of active oxygen species in plant signal transduction. *Plant Science*, v.161, p.405-414, 2001.

VAN DER VORN, P. D. J. Uptake of Si by five plant species as influenced by variations in Si-supply. *Plant Soil*. v. 56, p. 153-156, 1980.

VERMAS, S.; DUBEY, R.S. Lead toxicity lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants. *Plant Science*, v.164, p.645-655, 2003.

VIEIRA, C.; NOGUEIRA, A. O.; ARAÚJO, G. A. Adubação nitrogenada e molíbdica na cultura do feijão. *Revista de Agricultura*, Piracicaba, v. 67, p. 117-124, 1992.

VÍTOLO, H. F.; SOUZA, G. M.; SILVEIRA, J. A.G. Cross-scale multivariate analysis of physiological responses to high temperature in two tropical crops with C₃ and C₄ metabolism. *Environmental and Experimental Botany*, v. 80, p. 54– 62. 2012.

VRANOVA, E.; INZE, D.; VAN BREUSEGEM, F. Signal transduction during oxidative stress. *Journal of experimental Botany*, v.53, n.372, p.1227-1236, 2002.

WAHID, A., et al., 2007. Heat tolerance in plants: an overview. *Environmental and Experimental Botany* v. 61, p. 199–223.

WANG, S.Y.; GALLETTA, G.J. Foliar application of potassium silicate induces metabolic changes ins strawberry plants. *Journal of Plant Nutrition*, v.21. p.157-167, 1998.

WARNER, R. L.; KLEINHOFS, E. Genetics and molecular biology of nitrate metabolism in higher plants. *Physiologia Plantarum*, Copenhagen, v.85, p. 245-252, 1992.

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

WREGGE, M.S. et al. Determinação das melhores épocas de semeadura do arroz de sequeiro, *Oryza sativa*, no Estado do Paraná. *Acta Scientiarum*, v.23, n.5, p.1179-1183, 2001.

XU, H. et al. Chlorophyll b can serve as the major pigment in functional photosystem II complexos of cyanobacteria. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v.98, n.24, 2001.

YEO, A.R. et al. Silicon reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) insaline conditions and this is accounted for by a reduction in the transpirational bypass flow. *Plant, Cell & Environment*, v. 22 (5), p. 559-565, 1999.

YOSHIDA, S. **The physiology of silicon in rice**. Taipei: Food and Fertilization Technology Center, 1975. (FFTC. Technical Bulletin, 25).

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.; OHNISHI, Y.; KITAGISHI, K. Role of silicon in rice nutrition. **Soil Plant Food**, v. 5, 1959. p. 127-133.

YOSHIMURA, K.; YABUTA, Y.; ISHIKAWA, T. & SHIGEOKA, S. Expression of spinach ascorbate peroxidase isoenzymes in response to oxidative stresses. **Plant Physiology**, v. 123, p. 223-233, 2000.

ANEXOS

Tabela 22. Matéria seca da planta, cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em três épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Silício	Tensão de água no solo (kPa)				Média
	-10	-30	-50	-70	
	----- g/planta -----				
Curinga	Primeira coleta - 20 DADH*				
Calcário	4,4a	4,0a	3,7a	3,9a	4,0
Silício	3,7a	3,8a	4,1a	4,1a	3,9
IAC 202	Primeira coleta - 20 DADH*				
Calcário	3,8a	3,4a	3,9a	3,3a	3,6
Silício	3,9a	3,8a	3,8a	3,7a	3,8
Curinga	Segunda coleta - 40 DADH				
Calcário	26a	23a	24a	25a	24
Silício	29a	23a	24a	21a	24
IAC 202	Segunda coleta - 40 DADH				
Calcário	23a	27a	23a	22a	24
Silício	24a	25a	25a	22a	24
Curinga	Terceira coleta - 54 DADH				
Calcário	57a	35a	28a	26a	36
Silício	62a	40a	31a	31a	41
IAC 202	Terceira coleta - 54 DADH				
Calcário	45a	43a	31a	26a	36
Silício	47a	46a	36a	28a	39

* DADH – dias após a deficiência hídrica. Valores seguidos pela mesma letra nas colunas e em cada coleta, não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 23. Altura de planta, cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, na última fase de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Silício	Tensão de água no solo (kPa)				Média
	-10	-30	-50	-70	
----- cm ² /planta -----					
Curinga	Única coleta - 54 DADH*				
Calcário	85a	80a	55a	46b	66
Silício	90a	79a	57a	54a	70
IAC 202	Única coleta - 54 DADH*				
Calcário	81a	70a	53b	50b	63
Silício	85a	71a	62a	59a	69

* DADH – dias após a deficiência hídrica. Valores seguidos pela mesma letra nas colunas e em cada coleta, não diferem entre si pelo teste Tukey (p < 0,05).

Tabela 24. Teor de Si em folhas de arroz, cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em duas épocas de avaliação (emborrachamento e perfilhamento). Botucatu (SP), 2012.

Silício	Tensão de água no solo (kPa)				Média
	-10	-30	-50	-70	
----- mg/planta -----					
Curinga	Perfilhamento				
Calcário	6a	7b	7a	7a	7
Silício	8a	10a	9a	9a	9
IAC 202	Perfilhamento				
Calcário	6a	7b	7a	7a	7
Silício	8a	10a	9a	9a	9
Curinga	Florescimento				
Calcário	11b	13b	12b	13b	12
Silício	15a	17a	16a	17a	16
IAC 202	Florescimento				
Calcário	10b	13b	12b	13b	12
Silício	15a	17a	16a	17a	16

* DADH – dias após a deficiência hídrica. Valores seguidos pela mesma letra nas colunas e em cada coleta, não diferem entre si pelo teste Tukey (p < 0,05).

Tabela 25. Teor de Clorofila *a* em folhas de arroz, cultivares Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Silício	Tensão de água no solo (kPa)				Média
	-10	-30	-50	-70	
	----- μg cm ² -----				
Curinga			Primeira coleta		
Calcário	18a	20a	20a	21a	20
Silício	21a	21a	22a	20a	21
IAC 202			Primeira coleta		
Calcário	22a	21a	21a	23a	22
Silício	20a	21a	22a	22a	21
Curinga			Segunda coleta		
Calcário	10a	11a	11a	10a	11
Silício	11a	12a	12a	10a	11
IAC 202			Segunda coleta		
Calcário	12a	12a	12a	13a	12
Silício	11a	13a	10a	10a	11
Curinga			Terceira coleta		
Calcário	12a	11b	14a	15a	13
Silício	12a	15a	16a	16a	15
IAC 202			Terceira coleta		
Calcário	12a	12a	14a	14a	13
Silício	11a	13a	15a	14a	13
Curinga			Quarta coleta		
Calcário	9a	9a	14a	17a	12
Silício	9a	12a	14a	14a	12
IAC 202			Quarta coleta		
Calcário	6a	9a	10a	14a	10
Silício	5a	10a	11a	13a	10
Média					

* DADH – dias após a deficiência hídrica. Valores seguidos pela mesma letra nas colunas e em cada coleta, não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 26. Teor de Clorofila *b* em folhas de arroz, cultivares Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Silício	Tensão de água no solo (kPa)				Média
	-10	-30	-50	-70	
----- $\mu\text{g cm}^2$ -----					
Curinga	Primeira coleta				
Calcário	11a	11a	10a	9a	10
Silício	10a	10a	10a	12a	11
IAC 202	Primeira coleta				
Calcário	9a	10a	14a	11a	11
Silício	10a	14a	10a	12a	12
Curinga	Segunda coleta				
Calcário	4a	6a	6a	8a	6
Silício	5a	6a	7a	7a	6
IAC 202	Segunda coleta				
Calcário	5a	5a	6a	9a	6
Silício	5a	6a	6a	8a	6
Curinga	Terceira coleta				
Calcário	4a	4a	5a	6a	5
Silício	5a	6a	6a	6a	6
IAC 202	Terceira coleta				
Calcário	4a	4a	5a	5a	5
Silício	4a	4a	6a	6a	5
Curinga	Quarta coleta				
Calcário	3a	3a	5a	6a	4
Silício	4a	4a	5a	5a	5
IAC 202	Quarta coleta				
Calcário	3a	3a	4a	5a	4
Silício	2a	3a	4a	5a	4
Média					

* DADH – dias após a deficiência hídrica. Valores seguidos pela mesma letra nas colunas e em cada coleta, não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 27. Teor de carotenóides em folhas de arroz, cultivares Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Silício	Tensão de água no solo (kPa)				Média
	-10	-30	-50	-70	
----- $\mu\text{g cm}^2$ -----					
Curinga	Primeira coleta				
Calcário	4,1a	4,4a	4,3a	4,8a	4,4
Silício	4,6a	4,8a	5,3a	4,3a	4,8
IAC 202	Primeira coleta				
Calcário	4a	5a	4a	5a	4,5
Silício	5a	5a	5a	5a	5,0
Curinga	Segunda coleta				
Calcário	2,8a	2,7a	2,8a	2,2a	2,6
Silício	3,2a	3,3a	3,0a	2,5a	2,9
IAC 202	Segunda coleta				
Calcário	3a	3a	3a	3a	3,0
Silício	3a	3a	3a	2a	2,7
Curinga	Terceira coleta				
Calcário	3,0a	2,6a	3,1a	3,5a	3,1
Silício	3,1a	3,5a	3,6a	3,5a	3,4
IAC 202	Terceira coleta				
Calcário	3a	3a	3a	4a	3,2
Silício	3a	3a	4a	4a	3,5
Curinga	Quarta coleta				
Calcário	3,5a	2,3a	2,7a	4,0a	3,1
Silício	6,0a	3,0a	3,5a	3,3a	4,0
IAC 202	Quarta coleta				
Calcário	2a	2a	3a	3a	2,5
Silício	2a	2a	3a	3a	2,5
Média					

* DADH – dias após a deficiência hídrica. Valores seguidos pela mesma letra nas colunas e em cada coleta, não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 28. Atividade da SOD em folhas de arroz, cultivar IAC 202, em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Silício	Tensão de água no solo (kPa)				Média
	-10	-30	-50	-70	
-----UI $\mu\text{g prot}^{-1}$ -----					
Curinga	Primeira coleta - 0 DADH*				
Calcário	27a	23a	24a	25a	25
Silício	26a	23a	21a	24a	24
IAC 202	Primeira coleta - 0 DADH*				
Calcário	27a	26a	25a	20b	25
Silício	23a	24a	29a	27a	26
Curinga	Segunda coleta - 20 DADH				
Calcário	27a	16b	19a	22b	21
Silício	27a	30a	19a	27a	26
IAC 202	Segunda coleta - 20 DADH				
Calcário	25a	20a	16b	17b	20
Silício	25a	16b	22a	21a	21
Curinga	Terceira coleta - 40 DADH				
Calcário	51a	47a	33a	30b	40
Silício	37b	35b	33a	46a	38
IAC 202	Terceira coleta - 40 DADH				
Calcário	42b	37b	44a	34a	39
Silício	57a	61a	41a	34a	48
Curinga	Quarta coleta - 54 DADH				
Calcário	65a	28b	21b	20a	33
Silício	55b	52a	28a	22a	39
IAC 202	Quarta coleta - 54 DADH				
Calcário	42b	48a	27a	25a	36
Silício	56a	48a	30a	30a	41
Média					

* DADH – dias após a deficiência hídrica. Valores seguidos pela mesma letra nas colunas e em cada coleta, não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 29. Atividade da enzima catalase em folhas de arroz, cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Silício	Tensão de água no solo (kPa)				Média
	-10	-30	-50	-70	
----- μKat μg Prot ⁻¹ -----					
Curinga	Primeira coleta - 0 DADH*				
Calcário	0,4b	0,4b	0,4b	0,4b	0,4
Silício	0,6a	0,7a	0,7a	0,5a	0,6
IAC 202	Primeira coleta - 0 DADH*				
Calcário	0,5a	0,4a	0,5a	0,5a	0,5
Silício	0,5a	0,4a	0,5a	0,4a	0,5
Curinga	Segunda coleta - 20 DADH				
Calcário	0,6a	0,4b	0,5a	0,5b	0,5
Silício	0,5b	0,6a	0,5a	0,6a	0,6
IAC 202	Segunda coleta - 20 DADH				
Calcário	0,6a	0,5a	0,5a	0,5a	0,5
Silício	0,6a	0,4a	0,6a	0,5a	0,5
Curinga	Terceira coleta - 40 DADH				
Calcário	1,0a	0,8b	0,8a	0,7b	0,8
Silício	1,0a	0,9a	0,8a	1,1a	1,0
IAC 202	Terceira coleta - 40 DADH				
Calcário	1,1a	1,0a	0,9a	0,9a	1,0
Silício	1,4a	1,3a	1,0a	1,0a	1,2
Curinga	Quarta coleta - 54 DADH				
Calcário	0,9b	0,7b	0,4b	0,4b	0,6
Silício	1,0a	0,8a	0,6a	0,6a	0,8
IAC 202	Quarta coleta - 54 DADH				
Calcário	0,8a	1,2a	0,6a	0,5a	0,8
Silício	0,9a	1,0a	0,6a	0,7a	0,8
Média					

* DADH – dias após a deficiência hídrica. Valores seguidos pela mesma letra nas colunas e em cada coleta, não diferem entre si pelo teste Tukey (p < 0,05).

Tabela 30. Atividade da enzima peroxidase em folhas de arroz, cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Silício	Tensão de água no solo (kPa)				Média
	-10	-30	-50	-70	
----- $\mu\text{Kat } \mu\text{g prot}^{-1}$ -----					
Curinga	Primeira coleta - 0 DADH*				
Calcário	0,23a	0,23	0,31a	0,21a	0,2
Silício	0,20a	0,21a	0,25a	0,15a	0,2
IAC 202	Primeira coleta - 0 DADH*				
Calcário	0,17a	0,20a	0,20a	0,21a	0,20
Silício	0,18a	0,20a	0,16a	0,18a	0,18
Curinga	Segunda coleta - 20 DADH				
Calcário	0,13a	0,27a	0,26a	0,13a	0,2
Silício	0,14a	0,26a	0,24a	0,16a	0,2
IAC 202	Segunda coleta - 20 DADH				
Calcário	0,15a	0,13a	0,14a	0,20a	0,16
Silício	0,20a	0,14a	0,14a	0,16a	0,16
Curinga	Terceira coleta - 40 DADH				
Calcário	0,25a	0,30a	0,28a	0,31a	0,3
Silício	0,25a	0,32a	0,30a	0,32a	0,3
IAC 202	Terceira coleta - 40 DADH				
Calcário	0,24b	0,20b	0,42a	0,38a	0,31
Silício	0,31a	0,34a	0,23b	0,26b	0,29
Curinga	Quarta coleta - 54 DADH				
Calcário	0,22a	0,13b	0,21a	0,20a	0,19
Silício	0,23a	0,21a	0,15a	0,20a	0,19
IAC 202	Quarta coleta - 54 DADH				
Calcário	0,20a	0,24a	0,23a	0,20a	0,22
Silício	0,22a	0,22a	0,22a	0,26a	0,23
Média					

* DADH – dias após a deficiência hídrica. Valores seguidos pela mesma letra nas colunas e em cada coleta, não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 31. Atividade da enzima ascorbato peroxidase em folhas de arroz, cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Silício	Tensão de água no solo (kPa)				Média
	-10	-30	-50	-70	
----- μKat μg prot ⁻¹ -----					
Curinga	Primeira coleta - 0 DADH*				
Calcário	0,20a	0,20a	0,20a	0,22a	0,2
Silício	0,20a	0,21a	0,21a	0,23a	0,2
IAC 202	Primeira coleta - 0 DADH*				
Calcário	0,17a	0,20a	0,19a	0,18a	0,19
Silício	0,18a	0,20a	0,15a	0,19a	0,18
Curinga	Segunda coleta - 20 DADH				
Calcário	0,13a	0,11a	0,14a	0,11a	0,1
Silício	0,14a	0,12a	0,13a	0,11a	0,1
IAC 202	Segunda coleta - 20 DADH				
Calcário	0,13a	0,13a	0,11a	0,16a	0,13
Silício	0,15a	0,10a	0,17a	0,12a	0,14
Curinga	Terceira coleta - 40 DADH				
Calcário	0,20b	0,34a	0,24a	0,22a	0,25
Silício	0,31a	0,26b	0,21a	0,21a	0,24
IAC 202	Terceira coleta - 40 DADH				
Calcário	0,25a	0,28a	0,30a	0,23a	0,27
Silício	0,30a	0,31a	0,25a	0,20a	0,27
Curinga	Quarta coleta - 54 DADH				
Calcário	0,20a	0,41a	0,12a	0,12a	0,21
Silício	0,22a	0,23b	0,13a	0,12a	0,17
IAC 202	Quarta coleta - 54 DADH				
Calcário	0,22a	0,21a	0,15b	0,14a	0,18
Silício	0,28a	0,24a	0,22a	0,15a	0,22
Média					

* DADH – dias após a deficiência hídrica. Valores seguidos pela mesma letra nas colunas e em cada coleta, não diferem entre si pelo teste Tukey (p < 0,05).

Tabela 32. Atividade da enzima nitrato redutase em folhas de arroz, cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Silício	Tensão de água no solo (kPa)				Média
	-10	-30	-50	-70	
----- μmoles de NO ₂ ⁻ h ⁻¹ g mf ⁻¹ -----					
Curinga	Primeira coleta - 0 DADH*				
Calcário	6,5a	6,5a	7,3a	6,8a	6,8
Silício	7,0a	7,0a	6,8a	6,0a	6,7
IAC 202	Primeira coleta - 0 DADH*				
Calcário	6,3a	6,6a	6,9a	6,6a	6,6
Silício	7,3a	7,2a	7,2a	7,0a	7,2
Curinga	Segunda coleta - 20 DADH				
Calcário	1,3a	1,4a	1,3a	1,5a	1,4
Silício	1,0a	1,4a	1,8a	1,4a	1,4
IAC 202	Segunda coleta - 20 DADH				
Calcário	1,3a	1,4a	1,4a	1,5a	1,4
Silício	1,5a	1,5a	1,1a	1,0a	1,3
Curinga	Terceira coleta - 40 DADH				
Calcário	0,9a	1,0a	0,9a	0,6a	0,8
Silício	0,8a	0,9a	1,0a	0,8a	0,8
IAC 202	Terceira coleta - 40 DADH				
Calcário	0,6a	0,5a	0,7a	0,6a	0,6
Silício	0,8a	0,6a	0,7a	0,7a	0,7
Curinga	Quarta coleta - 54 DADH				
Calcário	0,7a	0,7a	0,5a	0,5a	0,6
Silício	0,6a	0,7a	0,5a	0,5a	0,6
IAC 202	Quarta coleta - 54 DADH				
Calcário	0,4a	0,4a	0,6a	0,3a	0,4
Silício	0,6a	0,6a	0,5a	0,4a	0,5
Média					

* DADH – dias após a deficiência hídrica. Valores seguidos pela mesma letra nas colunas e em cada coleta, não diferem entre si pelo teste Tukey (p < 0,05).

Tabela 33. Conteúdo relativo de água (CRA) em folhas de arroz, cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Silício	Tensão de água no solo (kPa)				Média
	-10	-30	-50	-70	
----- % -----					
Curinga	Primeira coleta - 0 DADH*				
Calcário	51b	55a	43b	61a	53
Silício	54a	50b	56a	48b	52
IAC 202	Primeira coleta - 0 DADH*				
Calcário	47a	54a	47a	47a	47
Silício	44a	46b	45b	49b	46
Curinga	Segunda coleta - 20 DADH				
Calcário	72a	66b	64b	62b	66
Silício	71a	78a	80a	68a	74
IAC 202	Segunda coleta - 20 DADH				
Calcário	70a	70a	67a	73a	70
Silício	69a	69a	68a	69a	69
Curinga	Terceira coleta - 40 DADH				
Calcário	71b	80b	62b	74a	72
Silício	79a	84a	68a	77a	77
IAC 202	Terceira coleta - 40 DADH				
Calcário	74a	76a	74a	66b	73
Silício	72a	74a	76a	77a	75
Curinga	Quarta coleta - 54 DADH				
Calcário	65a	65a	63a	63a	64
Silício	65a	65a	64a	62a	64
IAC 202	Quarta coleta - 54 DADH				
Calcário	70a	71a	62b	54b	64
Silício	73a	70a	68a	66a	68
Média					

* DADH – dias após a deficiência hídrica. Valores seguidos pela mesma letra nas colunas e em cada coleta, não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 34. Taxa de assimilação de CO₂ (A) em folhas de arroz, cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em três épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Silício	Tensão de água no solo (kPa)				Média
	-10	-30	-50	-70	
----- μmol CO ₂ m ⁻² S ⁻¹ -----					
Curinga	Primeira coleta - 0 DADH*				
Calcário	17a	16a	16a	14a	16
Silício	15a	15a	18a	16a	16
IAC 202	Primeira coleta - 0 DADH*				
Calcário	14b	16b	16b	15a	15
Silício	17a	18a	18a	12b	16
Curinga	Segunda coleta - 20 DADH				
Calcário	14a	14a	16a	9a	13
Silício	13a	12a	12a	7a	11
IAC 202	Segunda coleta - 20 DADH				
Calcário	14a	10b	12b	12a	12
Silício	14a	12a	18a	6b	13
Curinga	Terceira coleta - 40 DADH				
Calcário	14a	11a	9a	6a	10
Silício	12a	11a	10a	8a	10
IAC 202	Terceira coleta - 40 DADH				
Calcário	10b	8b	8b	7a	8
Silício	13a	12a	10a	8a	11

* DADH – dias após a deficiência hídrica. Valores seguidos pela mesma letra nas colunas e em cada coleta, não diferem entre si pelo teste Tukey (p < 0,05).

Tabela 35. Taxa de condutância estomática em folhas de arroz, cultivar IAC 202, em função do manejo de água e silício, em três épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Silício	Tensão de água no solo (kPa)				Média
	-10	-30	-50	-70	
	----- mmol m ⁻² s ⁻¹ -----				
Curinga	Primeira coleta - 0 DADH*				
Calcário	0,47a	0,42a	0,32a	0,25a	0,37
Silício	0,50a	0,45a	0,37a	0,27a	0,40
IAC 202	Primeira coleta - 0 DADH*				
Calcário	0,47a	0,50a	0,45b	0,42a	0,46
Silício	0,50a	0,57a	0,57a	0,47a	0,53
Curinga	Segunda coleta - 20 DADH				
Calcário	0,37a	0,42a	0,32a	0,15a	0,32
Silício	0,37a	0,45a	0,37a	0,17a	0,34
IAC 202	Segunda coleta - 20 DADH				
Calcário	0,22a	0,22b	0,32b	0,30b	0,27
Silício	0,27a	0,37a	0,52a	0,45a	0,40
Curinga	Terceira coleta - 40 DADH				
Calcário	0,27a	0,25a	0,25a	0,17a	0,24
Silício	0,22a	0,20a	0,22a	0,20a	0,21
IAC 202	Terceira coleta - 40 DADH				
Calcário	0,17a	0,15b	0,20a	0,17a	0,17
Silício	0,20a	0,32a	0,27a	0,22a	0,25

* DADH – dias após a deficiência hídrica. Valores seguidos pela mesma letra nas colunas e em cada coleta, não diferem entre si pelo teste Tukey (p < 0,05).

Tabela 36. Transpiração (*E*) em folhas de arroz, cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em três épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Silício	Tensão de água no solo (kPa)				Média
	-10	-30	-50	-70	
	----- mol m ⁻² s ⁻¹ -----				
Curinga	Primeira coleta - 0 DADH*				
Calcário	8,0a	8,9a	8,3a	8,5a	8,4
Silício	8,3a	8,5a	9,1a	9,0a	8,7
IAC 202	Primeira coleta - 0 DADH*				
Calcário	8,0a	8,4a	8,1a	8,0a	8,1
Silício	8,3a	8,5a	8,8a	8,0a	8,4
Curinga	Segunda coleta - 20 DADH				
Calcário	10a	9,3a	9,9a	7,5a	9,2
Silício	10a	10,2a	6,5b	4,7a	7,8
IAC 202	Segunda coleta - 20 DADH				
Calcário	7,5a	6,9a	11,2a	9,4a	8,0
Silício	8,3a	8,2a	8,5b	9,9a	9,4
Curinga	Terceira coleta - 40 DADH				
Calcário	6,8a	7,6a	6,6a	4,5a	6,1
Silício	6,9a	6,7a	5,6b	4,9a	6,3
IAC 202	Terceira coleta - 40 DADH				
Calcário	4,8a	5,1a	7,6a	5,2a	5,2
Silício	5,0a	5,7a	5,8b	6,6a	6,2

* DADH – dias após a deficiência hídrica. Valores seguidos pela mesma letra nas colunas e em cada coleta, não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 37. Produtividade de arroz cultivar Curinga e IAC 202, em função do manejo de água e silício, em quatro épocas de avaliação. Botucatu (SP), 2012.

Silício	Tensão de água no solo (kPa)				Média
	-10	-30	-50	-70	
	----- g/planta ⁻¹ -----				
Curinga	Única coleta - 54 DADH*				
Calcário	21b	22a	15b	12b	17
Silício	27a	24a	26a	24a	25
IAC 202	Única coleta - 54 DADH*				
Calcário	22a	18b	15b	12a	18
Silício	23a	34a	31a	13a	25

* DADH – dias após a deficiência hídrica. Valores seguidos pela mesma letra nas colunas e em cada coleta, não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).



Foto 1. Plantas de arroz cultivar Curinga submetidas a tensão de água no solo de -70 kPa com calcário e com silicato de cálcio na fase de pré-florescimento.



Foto 2. Plantas de arroz cultivar IAC 202 submetidas a tensão de água no solo de -70 kPa com calcário e com silicato de cálcio na fase de pré-florescimento.