

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS  
FACULDADE DE AGRONOMIA ELISEU MACIEL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE  
SEMENTES**



**Dissertação**

**APLICAÇÃO DE CINZA DA CASCA DE ARROZ, VIA SOLO, COMO FONTE DE  
SILÍCIO EM ARROZ IRRIGADO SOB ESTRESSE SALINO**

**Elisa Souza Lemes**

Pelotas, 2013

**Elisa Souza Lemes**

**APLICAÇÃO DE CINZA DA CASCA DE ARROZ, VIA SOLO, COMO FONTE DE  
SILÍCIO EM ARROZ IRRIGADO SOB ESTRESSE SALINO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Pelotas, sob orientação do Prof. Dr. Antonio Carlos Souza Albuquerque Barros, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, para obtenção do Título de Mestre em Ciências.

**Orientador:** Prof. Dr. Antonio Carlos Souza Albuquerque Barros (FAEM/UFPEL)  
**Coorientador:** Dr. Géri Eduardo Meneghello (FAEM/UFPEL)

Pelotas, 2013

Dados Internacionais de Publicação (CIP)

L551a Lemes, Elisa Souza

APLICAÇÃO DE CINZA DA CASCA DE ARROZ, VIA SOLO,  
COMO FONTE DE SILÍCIO EM ARROZ IRRIGADO SOB ESTRESSE  
SALINO / Elisa Souza Lemes; Antonio Carlos Souza  
Albuquerque Barros, orientador; Géri Eduardo  
Meneghello, co-orientador. - Pelotas, 2013.  
66 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de  
Sementes), Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel,  
Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2013.

1.Oryza sativa (L.). 2.produtividade. 3.silício.  
4.qualidade fisiológica. 5.salinidade. I. Barros,  
Antonio Carlos Souza Albuquerque , orient. II.  
Meneghello, Géri Eduardo , co-orient. III. Título.

CDD: 633.18

Catalogação na Fonte: Gabriela Machado Lopes CRB:10/1842  
Universidade Federal de Pelotas

**Banca examinadora:**

---

Profº Dr. Antonio Carlos Souza Albuquerque Barros  
(FAEM/UFPEL, Orientador)

---

Eng. Agr. Dr. Géri Eduardo Meneghello  
(FAEM/UFPEL, Coorientador)

---

Profª Drª Lilian Madruga Tunes  
(FAEM/UFPEL)

---

Eng. Agr. Dr. Demócrito Amorim Chiesa Freitas  
(FAEM/UFPEL)

*Dedico esta dissertação ao meu pai, Lori (in memorium), que foi um exemplo de caráter, dignidade e sabedoria. Ao meu esposo, pelo carinho, compreensão e por estar sempre ao meu lado me apoiando nos momentos difíceis. À minha mãe, por todos os conselhos e por muitas vezes ter se sacrificado para me dar tudo o que precisei.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por tornar tudo possível o que realizamos, pela saúde e perseverança;

Ao meu marido, Sandro;

À minha família;

Ao meu orientador Profº. Dr. Antonio Carlos Souza Albuquerque Barros pelo apoio, orientação e por todos os ensinamentos para realização deste trabalho;

Ao meu coorientador, Dr. Géri Eduardo Meneghelli pelo apoio, dedicação, paciência e esclarecimentos para realização deste trabalho;

À professora Lilian, pelo apoio e pela ajuda na realização deste trabalho;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão da bolsa de estudos;

À todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, pelos conhecimentos repassados ao longo do curso;

Aos meus colegas e amigos, André Mendonça, Sandro de Oliveira, Lizandro Tavares, André Brunes, Cassyo Rufino e Daniel Fonseca, por terem facilitado o trabalho em equipe;

Ao estudante de agronomia Igor Dias Leitzke, pela ajuda na execução do trabalho;

À funcionária Maria Alice da Silva de Castro, pela ajuda nas análises das isoenzimas;

Aos membros do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, pelo suporte e apoio demonstrado;

## **Resumo**

Lemes, Elisa Souza. **Aplicação de cinza da casca de arroz, via solo, como fonte de silício em arroz irrigado sob estresse salino**, 2013. 66f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

O arroz é um dos cereais mais cultivados no mundo e em certas regiões são comuns situações de prejuízos na produção de arroz irrigado, decorrentes da salinização da água dos mananciais. Os benefícios do silício para o arroz estão relacionados com o aumento no crescimento e na produtividade, interações positivas com fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos, além de estar envolvido em atividades metabólicas ou fisiológicas das plantas sob estresse salino e/ou hídrico. Nesse sentido, a utilização de silício pode acarretar em aumento da capacidade biológica da planta em resistir às condições adversas do meio ambiente. Assim o objetivo do trabalho foi avaliar o efeito do silício oriundo da cinza da casca de arroz carbonizada, via solo, no rendimento e na qualidade fisiológica de sementes de arroz irrigado produzidas sob estresse salino. Foram utilizadas sementes de arroz da cultivar IRGA 424. O delineamento utilizado foi em blocos casualizados, em esquema fatorial A x B (Fator A- Cinco doses de cinza da casca de arroz aplicado via solo: 0 kg ha<sup>-1</sup>, 500 kg ha<sup>-1</sup>, 1000 kg ha<sup>-1</sup>, 1500 kg ha<sup>-1</sup> e 2000 kg ha<sup>-1</sup>; Fator B- Três concentrações salinas: 0 mM, 4 mM e 8 mM), com quatro repetições. A aplicação de silício proporciona acréscimo no peso de sementes por planta. A qualidade fisiológica das sementes produzidas de arroz é influenciada positivamente pelo aumento das doses de silício, em todas as concentrações salinas. A salinidade apresenta efeito negativo sobre os componentes do rendimento e a qualidade fisiológica das sementes produzidas. O sistema isoenzimático glutamato oxaloacetato transaminase (GOT) é uma ferramenta complementar à avaliação do potencial fisiológico de sementes.

Palavras-chave: *Oryza sativa* (L.), silício, salinidade, produtividade, qualidade fisiológica.

## **Abstract**

Lemes, Elisa Souza. **Application of rice husk ash into the soil as a source of silicon in rice under salt stress**, 2013. 66f. Master of Seed and Science Technology– Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Rice is one of the most cultivated cereals in the world. In some regions, situations of losses in irrigated rice production are common. These losses have been occurred due to the water salinization. Si element for rice is related for increasing in plant growth and productivity. The benefits are positive interactions with nitrogen fertilizers, phosphate and potassium, as well as being involved in metabolic or physiological activities of plants under salt and / or water stress. Accordingly, the utilization of Si may result in increased plant's biological ability to withstand the environment's harsh conditions. Thus the aim of this study was evaluate the effect of silicon fertilization derived from rice hull's ashes, in yield and seed quality of rice cultivated under salt stress. The rice cultivar used was IRGA 424. The experimental design was a randomized block in factorial A x B (Factor A-Five doses of rice husk's ash applied to soil: 0 kg ha<sup>-1</sup>, 500 kg ha<sup>-1</sup>, 1000 kg ha<sup>-1</sup>, 1500 kg ha<sup>-1</sup> and 2000 kg ha<sup>-1</sup>, B-Factor Three salt concentrations: 0 mM, 4 mM and 8 mM), with four replications. Silicon fertilization provides an increase in the seed weight per plant. The physiological quality of rice seeds produced is positively influenced by increased levels of silicon in all salt concentrations. Salinity had a negative effect on yield components and physiological quality of seeds produced. The isoenzyme system glutamate oxaloacetate transaminase (GOT) is a complementary tool to assess the physiological seed.

Key - words: *Oryza sativa* (L.), silicon, salinity, productivity, physiological quality

## Lista de Figuras

- Figura 1 – Número médio de panículas por planta (A), número médio de sementes por panícula (B), número médio de sementes por planta (C) e peso de sementes por planta (D) de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.....35
- Figura 2 – Peso de 1000 sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.....37
- Figura 3 – Número médio de glumas estéreis por panícula (A) e número médio de glumas estéreis por planta (B) de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.....39
- Figura 4 – Porcentagem de plântulas normais obtidas no teste de primeira contagem de germinação (A) e germinação (B) de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.....42
- Figura 5 – Porcentagem de plântulas normais obtidas no teste de frio (A) e envelhecimento acelerado (B) de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.....43
- Figura 6 – Emergência em campo de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.....44
- Figura 7 – Comprimento médio da parte aérea (A) e de raiz (B), massa seca média da parte aérea (C) e de raiz (D) de plântulas de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.....47
- Figura 8 – Padrões eletroforéticos obtidos com o sistema isoenzimático Glutamato Oxaloacetato Transaminase de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas

em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.....	49
Figura 9 – Padrões eletroforéticos obtidos com o sistema isoenzimático Álcool Desidrogenase de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.....	50
Figura 10 – Padrões eletroforéticos obtidos com o sistema isoenzimático Glutamato Desidrogenase de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.....	51
Figura 11 – Padrões eletroforéticos obtidos com o sistema isoenzimático Sorbitol Desidrogenase de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.....	52

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1. Número médio de panículas por planta (NPANPL), número médio de sementes por panícula (NSPAN), número médio de sementes por planta (NSPL) e peso de sementes por planta (PSPL) de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.....	34
Tabela 2. Peso de mil sementes (P1000) de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.....	36
Tabela 3. Número médio glumas estéreis por panícula (NSVPAN), número médio de glumas estéreis por planta (NSVPL) de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.....	38
Tabela 4. Porcentagem de plântulas normais obtidas no teste de primeira contagem de germinação (PCG) e germinação (G) de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.....	41
Tabela 5. Porcentagem de plântulas normais obtidas no teste de frio (TF) e envelhecimento acelerado (EA) de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.....	43
Tabela 6. Emergência em campo (EC) de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.....	44
Tabela 7. Comprimento médio da parte aérea (CPA) e raiz (CR), massa seca média da parte aérea (MSPA) e raiz (MSR) de plântulas de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.....	45

## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	5
<b>ABSTRACT.....</b>	6
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	7
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	9
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	12
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	15
2.1. A cultura do arroz.....	15
2.2. Efeito da salinidade.....	16
2.3. Nutrientes.....	18
2.4. Aspectos gerais sobre o silício.....	19
2.4.1. Silício nas plantas.....	20
2.5. Qualidade de sementes.....	23
2.6. Expressão isoenzimática.....	25
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	27
3.1. Parâmetros avaliados.....	29
3.1.1. Componentes do rendimento.....	29
3.1.2. Qualidade fisiológica das sementes produzidas.....	30
3.1.3. Expressão isoenzimática.....	31
3.2. Procedimento estatístico.....	32
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	33

4.1. Componentes do rendimento.....	33
4.2. Qualidade fisiológica das sementes produzidas.....	40
4.3. Expressão isoenzimática.....	47
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>53</b>
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>55</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>56</b>

## **1. Introdução**

O arroz (*Oryza sativa* L.) é um dos cereais mais cultivados no mundo, especialmente na Ásia onde se concentra 90% da produção e consumo mundial. Aproximadamente 150 milhões de hectares são semeados anualmente, com uma produção cerca de 600 milhões de toneladas. Mais da metade dessa produção provém de lavouras com irrigação, as quais ocupam apenas 25% da área cultivada (AZAMBUJA et al. 2004). O Brasil está entre os dez principais produtores de arroz. Na safra 2012/2013 a produção alcançou 11,86 milhões de toneladas, 2,2% maior do que o volume da safra anterior (CONAB, 2013).

Na região litorânea do Rio Grande do Sul, abrangendo as lavouras de arroz da Planície Costeira, são comuns situações de prejuízos na produção de arroz irrigado, decorrentes da salinização da água dos mananciais. Esse fato deve-se, porque no verão, principalmente nos meses de janeiro e fevereiro, nessa região, que coincide com a fase reprodutiva do arroz, normalmente ocorre menor precipitação pluviométrica, baixando o nível dos rios e lagoas que abastecem as lavouras e, em consequência, tais mananciais passam a receber, direta ou indiretamente, água salgada do oceano Atlântico, o que, na prática, reflete-se em redução na produtividade do arroz (MACHADO et al., 1999).

O estresse salino, em plantas de arroz, pode ocorrer tanto pela presença de sais em excesso no solo, quanto por sua introdução ao sistema de cultivo, via água de irrigação. Em ambas as situações, a quantidade elevada de sais afeta o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade da cultura (FAGERIA et al., 1981; GRATTAN et al., 2002), devido ao aumento da pressão osmótica da solução do solo, na acumulação de íons em excesso no tecido vegetal, que podem ser tóxicos ou causar deficiência de outros nutrientes, ou ainda, na alteração da condição

nutricional da planta, quanto à exigências e habilidades de absorção de nutrientes (FAGERIA, 1985; BERNSTEIN, 1961; MAAS e HOFFMAN, 1977).

A intensidade com que o estresse salino influencia o cultivo do arroz irrigado é determinada por vários fatores, destacando-se a composição salina do meio, a intensidade e duração do estresse, as condições edafoclimáticas, a cultivar e o estádio fenológico da cultura (MAAS e HOFFMAN, 1977). Com relação a este último fator, de forma geral, as plantas de arroz são tolerantes durante a germinação e muito sensíveis na fase de plântula. Após essa etapa, o grau de tolerância aumenta progressivamente, até a diferenciação da panícula, voltando a decrescer na floração (YOSHIDA, 1981).

A adequada nutrição das plantas é um dos fatores responsáveis pela produção satisfatória das culturas, embora as quantidades requeridas em alguns casos seja pequena, a falta de um determinado nutriente pode acarretar em perda de produtividade. A importância dos nutrientes está diretamente relacionada com as funções que exercem no metabolismo das plantas, atuando principalmente como catalisadores de várias enzimas (LOPES, 1989). O silício (Si) é considerado um elemento benéfico para a produção de vários cultivos (KORNDÖRFER et al. 2002). Mesmo não sendo essencial para o crescimento das plantas, a sua absorção traz inúmeros benefícios para o desenvolvimento das plantas (EPSTEIN, 1994), principalmente para as poáceas, sendo esses, de maneira geral, na adaptação das plantas a condições de estresses abióticos e bióticos.

A importância do silício para a cultura do arroz já foi mostrada por vários estudos (PEREIRA et al., 2004; CARVALHO-PUPATTO et al., 2003). Os benefícios para a cultura estão relacionados com o aumento no crescimento e na produção, interações positivas com fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos, aumento na resistência a estresses bióticos (doenças e pragas) e abióticos (seca, salinidade, acamamento) e aumento na produtividade em solos com altos níveis de Al, Fe e Mn (SAVANT et al., 1997). O Si pode estar envolvido em atividades metabólicas ou fisiológicas das plantas sob estresse salino e/ou hídrico (GUNES et al., 2008).

Existem no Brasil vários produtos que possuem silício na sua composição. A cinza de casca de arroz carbonizada apresenta aproximadamente 92% de silício (FOLETTTO, 2005), podendo vir a ser utilizada como fonte de silício devido ao alto

teor do mesmo. O Rio Grande do Sul é o maior produtor de arroz do Brasil (CONAB, 2013), gerando a casca de arroz como um subproduto do processo de beneficiamento do arroz, tornando-a abundante no estado, em especial na região sul. De acordo com Chungsangunsit et al. (2004), a casca de arroz representa 20% do peso do arroz total. Após a queima completa da casca de arroz, para geração de energia, cerca de 20% é convertido cinza (POUEY, 2006).

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a aplicação de silício oriundo da cinza da casca de arroz carbonizada, via solo, no rendimento e na qualidade fisiológica final de sementes de arroz irrigado produzidas sob estresse salino.

## **2. Revisão Bibliográfica**

### **2.1. A cultura do arroz**

O arroz é o terceiro cereal mais produzido no mundo, perdendo apenas para o trigo e o milho (USDA, 2013), além disso é o principal alimento para mais da metade da população no planeta (VAN NGUYEN e FERRERO, 2006). Este cereal é uma das principais fontes de carboidratos e de substâncias orgânicas que fornecem 20% da energia e 15% da proteína per capita necessária ao homem, contribuindo para a restauração e o desenvolvimento dos tecidos (MAGALHÃES JÚNIOR et al., 2004). Além disso, é uma cultura extremamente versátil, que se adapta a diferentes condições de solo e clima, sendo considerada a espécie que apresenta maior potencial para o combate a fome (AGRINUAL, 1998). A grande expansão na produção do arroz deve-se pela crescente necessidade de alimento, acarretando num desafio de alcançar altos padrões de qualidade e de produtividade. (MIELEZRSKI et al., 2009).

O Brasil está entre os dez principais produtores de arroz, na safra 2012/2013 a produção alcançou 11,86 milhões de toneladas, 2,2% maior do que o volume da safra anterior. O Rio Grande do Sul é responsável pela produção de cerca de 7,9 milhões de toneladas, o que representa aproximadamente 67% da produção nacional, sendo o maior Estado produtor brasileiro (CONAB, 2013). Nesse Estado, as lavouras de arroz estão localizadas em seis regiões distintas quanto ao clima, solo e estrutura fundiária, sendo elas: Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Costeira Interna, Planície Costeira Externa e Sul.

O uso de sementes com qualidade genética, sanitária, física e fisiológica é um dos quesitos essenciais para a obtenção de boa produtividade. Assim sendo, o agricultor para ser mais competitivo no mercado necessita aumentar a produtividade,

adotando algumas práticas, e o uso de micronutrientes na produção de grãos é uma delas (FAVARIN et al., 2000). Vieira et al. (2011), citam a importância que a cultura representa no cenário nacional, onde há um crescente aumento do consumo havendo necessidade de novas tecnologias que possibilitem aumentar a produção de sementes de alta qualidade e que atendam a demanda dos agricultores por cultivares adaptadas, mais produtivas e que possam gerar retorno ao investimento realizado pelos produtores.

## 2.2. Efeito da salinidade

Alguns fatores ambientais, denominados estresses ou distúrbios ambientais, podem limitar a produtividade agrícola (ASHRAF e HARRIS, 2004). A salinidade é um dos mais importantes fatores de estresse abiótico, afetando diversos aspectos fisiológicos e bioquímicos das plantas reduzindo, significativamente, seus rendimentos.

A salinidade é caracterizada pela presença de concentrações de sais solúveis no solo. Os principais íons relacionados à salinidade são os cátions sódio ( $\text{Na}^+$ ), cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ) e os ânions cloreto ( $\text{Cl}^-$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) e nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ). Os sais mais nocivos às plantas são os cloretos e os sulfatos de sódio e de magnésio, pela maior solubilidade. Os solos afetados pela salinidade são encontrados em mais de 100 países, sendo que boa parte da salinização é induzida pelo manejo inadequado da irrigação. A área total afetada no mundo pode chegar a 932 milhões de hectares, sendo verificada em todos os continentes, inclusive na América do Sul (RENGASAMY, 2006). No Brasil, a área afetada pela salinidade é de cerca de 4 milhões de hectares e se concentra na região Nordeste do país (OLIVEIRA, 1997).

A irrigação de lavouras de arroz com água salina proveniente de rios litorâneos, como o Tramandaí e o Mampituba, e da Lagoa dos Patos, Mangueira e Mirim é um fator que contribui para a salinidade dos solos da região. No Rio Grande do Sul, o principal sistema de irrigação da cultura do arroz é por inundação, podendo conduzir à salinização dos solos com drenagem inadequada, especialmente as lavouras da região litorânea que utilizam a água da laguna dos patos, que está sujeita à salinização pela entrada de água do mar quando baixa o nível deste manancial, tornando-se uma das maiores limitações ambientais na produção de

arroz (LIMA, 2008). Segundo Machado e Terres (1995), cerca de 200.000 ha, nessas regiões, estão sujeitas a apresentar problemas de salinidade, em níveis variados.

Um dos critérios determinantes da qualidade da água de irrigação é a salinidade, sendo estabelecida pela presença de concentrações excessivas de sais solúveis (GOMES et al., 2004), que afetam o crescimento das plantas. Condições de elevada salinidade podem ser causadas por diversos fatores, como práticas inadequadas de irrigação e inundação do solo pela água do mar, em regiões costeiras (TESTER e DAVENPORT, 2003). A alta concentração de sódio ( $\text{Na}^+$ ) de um solo pode não apenas prejudicar diretamente as plantas, mas também degradar a estrutura do mesmo, diminuindo a porosidade e a permeabilidade à água (TAIZ e ZEIGER, 2004).

Em condições salinas, ocorre redução na disponibilidade de água, ou seja, com o acúmulo de sais no solo o potencial total da água do solo irá sofrer uma redução, ocasionado pela contribuição do potencial osmótico. Como a água tende a deslocar-se do ponto de maior para o de menor potencial, haverá um maior gasto de energia para a absorção de água, apesar do potencial osmótico não ser similar ao mátrico, já que as plantas adaptam-se diferentemente às condições de salinidade (LIMA, 1997). Embora algumas plantas possuam mecanismos de ajuste osmótico e consigam sobreviver, o fato da planta entrar mais rapidamente em condições de estresse, provoca o fechamento dos estômatos reduzindo a fotossíntese e diminuindo assim a translocação de nutrientes da raiz para a parte aérea, além de promover um gasto de energia para absorção de íons na forma ativa.

A tolerância de plantas à salinidade é variável em função do ciclo fenológico ou do seu estádio de desenvolvimento. Espécies como sorgo, milho, feijão e trigo são menos afetadas durante a fase inicial do seu ciclo (MAAS et al., 1986). A intensidade com que o estresse salino influencia o crescimento e a produtividade do arroz é determinada por vários fatores, destacando-se a composição salina do meio, a intensidade e duração do estresse, as condições edafoclimáticas, a cultivar e o estádio fenológico da cultura (MAAS e HOFFMAN, 1977). Com relação a este último fator, de forma geral, as plantas de arroz são tolerantes durante a germinação e muito sensíveis na fase de plântula. Após essa etapa, o grau de tolerância aumenta

progressivamente, até a diferenciação da panícula, voltando a decrescer na floração (YOSHIDA, 1981).

O estresse salino compromete o crescimento da planta por baixar o potencial osmótico da solução do solo, causando estresse hídrico e provocando efeitos tóxicos nas plantas que resultam em danos no metabolismo e desordens nutricionais (ALVES, 2009; DEBOUBA et al., 2006; MUNNS e TESTER, 2008).

O alto teor de sais, especialmente de cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ), influencia significativamente a resposta germinativa da semente em razão do efeito osmótico, com essa redução do potencial hídrico e os efeitos tóxicos dos sais, há uma menor absorção de água pelas sementes, aumentando a porcentagem de plântulas anormais (CAVALCANTE e PEREZ, 1995; FANTI e PEREZ, 1996; CAMPOS e ASSUNÇÃO, 1990).

O efeito da salinidade foi comprovado por Deuner et al. (2011), que verificaram que plântulas de feijão-miúdo submetidas ao estresse salino tem seu desenvolvimento afetado negativamente pelas concentrações salinas. Lima et al. (2005), trabalhando com sementes de arroz verificaram decréscimo na porcentagem de plântulas normais. Em trabalho realizado por Garcia et al. (2007) em sementes de milho oriundas de plantas submetidas ao estresse salino, concluíram que o aumento da salinidade diminui a porcentagem de germinação, o índice de velocidade de germinação e a matéria fresca e seca da parte aérea das plântulas. Segundo Galina (2004), o vigor das sementes e o crescimento das plântulas de arroz e feijão são prejudicados pelos níveis de salinidade.

### **2.3. Nutrientes**

Os nutrientes podem ser classificados em macro e micronutrientes essenciais. De acordo com Malavolta (2008), atualmente 19 elementos estão classificados como essenciais para as plantas, os quais atendem aos seguintes critérios de essencialidade, que são: o elemento faz parte de um composto ou de uma reação crucial do metabolismo, na ausência do elemento a planta morre antes de concluir o seu ciclo e o elemento não pode ser substituído por nenhum outro.

Os macronutrientes são os encontrados em grandes concentrações nos tecidos das plantas, sendo eles carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S). Já os

micronutrientes são os encontrados em pequenas concentrações, sendo eles cloro (Cl), manganês (Mn), boro (B), zinco (Zn), ferro (Fe), cobre (Cu), cobalto (Co), níquel (Ni), molibdênio (Mo) e selênio (Se) (MALAVOLTA, 2006; WARAICH et al., 2011). Há ainda os elementos benéficos, que são aqueles minerais que compensam ou eliminam os efeitos tóxicos de outros, substituem um elemento essencial em alguma de suas funções menos específicas e são exigidos por alguns grupos de plantas ou ainda por plantas em circunstâncias peculiares, como o sódio (Na) e silício (Si) (SANTOS, 2004).

O silício mesmo não sendo essencial, do ponto de vista fisiológico, para o crescimento e desenvolvimento das plantas a sua absorção traz inúmeros benefícios (EPSTEIN, 1994), principalmente para a cultura do arroz. A ação benéfica do Si tem sido associada a diversos efeitos indiretos, como aumento da eficiência da capacidade fotossintética, redução da transpiração, aumento da resistência mecânica das células (CAMARGO et al., 2007) e na adaptação das plantas a condições de estresses abióticos e bióticos (EPSTEIN, 1994).

#### **2.4. Aspectos gerais sobre o silício**

O silício é o segundo elemento mais abundante, em peso, da crosta terrestre, depois do oxigênio, e componente majoritário de minerais do grupo dos silicatos (RAIJ, 1991). O uso deste micronutriente possui relatos de mais de 2000 anos atrás. Os chineses já utilizavam cinzas de palha de arroz, ou cevada, misturadas com esterco, para fertilizar o solo. Virgílio (70 - 19 a.C.), na época do Império Romano, também sugeria o uso de cinza vegetal para aumentar a fertilidade dos solos já degradados. As cinzas vegetais podem ser consideradas como o primeiro fertilizante mineral complexo, e as cinzas de arroz e outros cereais, que acumulam quantidades significativas de silício, como o primeiro fertilizante silicatado utilizado pelo homem. A descoberta do silício foi atribuída a Jacob Berzelius, em 1824, preparando o silício amorfo, purificando-o com sucessivas lavagens para retirar os fluorsilicatos (impurezas), conseguindo isolar o elemento e dando-lhe o nome de silício (PEIXOTO, 2001).

O Si ocorre na natureza nas formas de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e silicatos, como exemplo: silicato de cálcio ( $\text{CaSiO}_3$ ) e silicato de magnésio ( $\text{MgSiO}_3$ ), não sendo encontrado puro. Dentre as fontes de silício para as plantas encontram-se: escórias

de siderurgia, wollastonita, subprodutos da produção de fósforo elementar, silicato de cálcio, de sódio, de alumínio, cimento, termofosfato, silicato de magnésio (serpentinito), silicato de potássio e sílica coloidal (KORNDÖRFER et al., 2002).

No Brasil, o Decreto do Ministério da Agricultura (nº. 4.954, 14/01/2004) aprova o Regulamento da Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes ou biofertilizantes destinados à agricultura, o que inclui o silício como elemento “benéfico” (BRASIL, 2004). O elemento é classificado como benéfico ou útil para as plantas, pois não é absolutamente necessário no sistema para que seja completado o ciclo vegetal. No entanto, estudos comprovam a eficiência do elemento, tanto na melhoria de aspectos relacionados à morfologia e estruturação, quanto ao longo do ciclo de desenvolvimento das plantas, principalmente àquelas acumuladoras de Si, como poáceas, onde estudos avaliando seu efeito vêm sendo mais intensamente realizados (MARSCHNER, 1995).

Várias pesquisas têm mostrado os efeitos benéficos da aplicação de Si, especialmente em culturas como arroz, cana-de-açúcar, cevada, milho, sorgo e trigo (MA et al., 2001a; GONG et al., 2005; HATTORI et al., 2005), que são consideradas acumuladoras desse elemento. Segundo Barbosa Filho et al. (2000), no Japão, aplica-se anualmente de 0,5 a 1,0 t ha<sup>-1</sup> de silicato de cálcio, em cerca de 25% da área cultivada com arroz.

#### **2.4.1. Silício nas plantas**

O silício é absorvido pela planta na forma de ácido monossilícico ( $H_4SiO_4$ ) juntamente com a água (fluxo de massa) e se acumula principalmente nas áreas de máxima transpiração (tricomas, espinhos, etc.), como ácido silícico polimerizado (sílica amorfa). Em geral, são consideradas plantas acumuladoras de silício, aquelas que possuem teor foliar acima de 1%, e não acumuladoras plantas com teor de silício inferior a 0,5% (MA et al., 2001b). O arroz apresenta-se como uma das espécies com maior capacidade de acumular Si.

O silício é o elemento mineral absorvido em maior quantidade pelo arroz, cerca de duas vezes mais que o potássio (SAVANT et al., 1997). De acordo com Takahashi (1995), o mecanismo de absorção do silício na cultura do arroz era considerado passivo, acompanhando a absorção de água. Entretanto, sabe-se, hoje,

que absorção de Si em arroz dá-se por um processo ativo (RAINS et al., 2006) e estudos realizados com plantas mutantes, que não apresentam capacidade de absorver Si, indicam a existência de proteínas transportadoras desse elemento nas raízes secundárias desta espécie (TAMAI e MA, 2003).

Os vasos do xilema são os responsáveis pelo transporte do elemento na planta, e sua distribuição é diretamente dependente das taxas de transpiração dos órgãos. Esta distribuição varia de acordo com a espécie, ocorrendo de maneira uniforme em plantas que acumulam pouco Si, e nas acumuladoras, como o arroz, 90% do elemento encontra-se na parte aérea (MENGEL e KIRKBY, 1987).

A maior parte do silício é incorporado na parede celular, principalmente nas células da epiderme, estômatos e tricomas, ou depositada juntamente com outros elementos, originando compostos amorfos chamados de fitólitos ou sílica biogênica. O depósito de silício absorvido é influenciado por vários fatores dentre eles pela idade da planta, do tipo e da localização dos tecidos envolvidos e da absorção através das raízes, além da transpiração (DATNOFF et al., 2001). Segundo Sangster et al. (2001), no arroz a deposição de Si ocorre na parede das células epidérmicas ou em localizações extracelulares, tais como tecidos vasculares e de armazenagem, espaços intercelulares e camadas cuticulares.

Segundo Guével et al. (2007), esse nutriente proporciona efetivo controle de doenças em plantas e tem sido relacionado à redução de efeitos prejudiciais decorrentes de agentes químicos (salinidade, toxidez causada por metal pesado e desbalanço de nutrientes) e físicos (acamamento, seca, radiação, altas e baixas temperaturas). A adubação silicatada pode reduzir ou até mesmo eliminar as aplicações de fungicidas durante o ciclo do arroz. Isto pode acorrer porque o silício é depositado em maior parte abaixo da cutícula e forma uma camada de sílica, fortalecendo assim a planta e dificultando a penetração das hifas dos fungos (MA e TAKAHASHI, 2002; KORNDÖRFER et al., 2002).

De acordo com Epstein (1999), plantas cultivadas em ambiente com silício apresentam diferenças em relação àquelas mantidas em locais com ausência desse elemento, principalmente quanto à composição química, resistência mecânica das células, características de superfície foliar, tolerância ao estresse abiótico e a ocorrência de pragas e doenças.

O aumento da disponibilidade de Si tem resultado em incrementos no crescimento e na produtividade, uma vez que o elemento pode atuar de forma indireta sobre alguns aspectos fotossintéticos e bioquímicos, e especialmente quando estas plantas estão submetidas a algum tipo de estresse, seja de natureza biótica ou abiótica (MA e YAMAJI, 2006; ABDALLA, 2011). Estresses causados por temperaturas extremas, veranicos, metais pesados ou tóxicos, por exemplo, podem ter seus efeitos reduzidos com o uso do silício aplicado no sulco ou via foliar (FILHO, 2010). O efeito benéfico do silício pode ser desencadeado pelo fato do silício agir como uma barreira física (KIM et al., 2002), ou ainda que o silício solúvel atua como ativador de resistência (FAWE et al., 2001; CÔTÉ-BEAULIEU et al., 2009).

Entre os fatores responsáveis pela redução da produtividade em arroz, destacam-se a alta suscetibilidade à brusone (*Pyricularia grisea* Sacc.) e à mancha nos grãos (*Drechslera oryzae*, *Phoma sorghina*, *Alternaria padwickii*). Acredita-se que o uso de silício reduz a severidade das doenças, devido a formação de uma barreira física aos patógenos pela deposição do Si na superfície da folha, o qual previne a penetração das hifas do fungo nos tecidos da planta (MENZIES et al., 1992). Segundo Zanão Júnior et al. (2009), ao utilizar o ácido monossilícico, verificaram que o Si absorvido pelas raízes reduziu a severidade da mancha-parda.

Existem poucos estudos acerca dos benefícios fisiológicos do silício, porém alguns autores relatam que plantas adubadas com esse elemento apresentam maior atividade fotossintética e resistência ao ataque de fitopatógenos e pragas, pois o silício induz uma série de reações metabólicas nas plantas resultando na formação de compostos como fitoalexinas e ligninas (SOUZA, 2007). A ausência de Si pode acarretar em diminuição da capacidade biológica da planta em resistir às condições adversas do meio ambiente (RAFI et al., 1997).

Em casos de estresses salinos, o silício também pode ser benéfico. A concentração de sódio na parte aérea da planta diminui sensivelmente quando se adiciona silício em substratos com carência neste elemento (FARIA, 2000). O emprego do Si na redução da toxidez causada pelo excesso de NaCl foi proposto por Ahmad (1992), que conseguiu resultados positivos na produção de matéria seca em trigo b tratado com esse elemento e submetido à salinidade.

Há outros relatos, que o Si aumenta a resistência ao acamamento, ameniza a toxicidade do cloreto e melhora o desequilíbrio de nutrientes em várias espécies

(MA e YAMAJI, 2008). Liang (1998) relatou que o Si estimula o crescimento de cevada em meio salino, aumentando o conteúdo de clorofila e consequentemente a atividade fotossintética. O Si está envolvido no alívio do estresse causado por salinidade, limitando a absorção indesejável de íons de sódio (Na) e cloro (Cl), quando o tomate é exposto ao estresse salino (STAMATAKIS et al., 2003). Esse elemento químico, diminuiu também a peroxidação lipídica de plantas de pepino cultivadas sob estresse salino por aumentar a atividade de enzimas antioxidantes e antioxidantes não enzimáticos (ZHU et al., 2004).

De acordo com Korndörfer e Datnoff (1995), solos com intensa utilização, altamente intemperizados ou lixiviados e também orgânicos, podem apresentar baixos teores de silício disponível às plantas. Nessas condições, podem-se esperar respostas para aplicação de Si via tratamento de sementes, aplicações no solo ou ainda em aplicações foliares, principalmente, quando aplicado em plantas acumuladoras de Si, como é o caso da maioria das poáceas, pois na literatura já se tem relatos de ganhos de produtividade com estas espécies.

Diversos trabalhos como os de Carvalho (2000), Mauad et al. (2003) e Marchezan et al. (2004) mostram aumento de produtividade do arroz em função da adubação com silício, medida através da produção de massa seca de grãos ou número de grãos por panícula. Em oposição, Lima (2010) estudando aplicação de argila silicatada em sulco e foliar, não observou interferência na qualidade fisiológica e produtividade de sementes de arroz. Segundo Harter e Barros (2011), plantas de soja tratadas via foliar com cálcio e silício produziram sementes com maior qualidade fisiológica. Fonseca (2012), a aplicação de silicato de alumínio via recobrimento de sementes aumentou o desempenho de sementes de trigo sob condições adversas, avaliado pelo teste de envelhecimento acelerado. Em trabalho realizado por Oliveira (2013) a aplicação de doses de silício oriundo da cinza da casca de arroz carbonizada via solo aumentou a produtividade e a qualidade fisiológica de sementes de soja cultivar BMX Turbo RR.

## 2.5. Qualidade de sementes

A qualidade fisiológica da semente é avaliada por duas características fundamentais, a viabilidade e o vigor (POPINIGIS, 1977), sendo características relacionadas com uma série de fatores, tais como condições climáticas durante a

maturação, condições de armazenamento, dano mecânico, nutrição das plantas genitoras e tratamento químico das sementes, entre outros (CARVALHO e NAKAGAWA, 2000). A qualidade fisiológica das sementes é determinada pelo teste de germinação, que procura avaliar a máxima germinação, enquanto que o vigor compreende um conjunto de características que determinam o potencial fisiológico das sementes, sendo influenciado pelas condições de ambiente e manejo durante as etapas de pré e pós-colheita (VIEIRA e CARVALHO, 1994).

De acordo com Peske et al. (2012) a qualidade das sementes pode ser atribuída aos seguintes atributos: genéticos (que envolve além da pureza varietal, outros aspectos genéticos com influência do ambiente como potencial de produtividade, resistência a pragas e moléstias, precocidade, qualidade do grão e resistência a condições adversas de solo e clima, entre outros); físicos (pureza física, umidade, danos mecânicos, peso de 1000 sementes, aparência e peso volumétrico); fisiológicos (expresso principalmente pelo vigor e germinação, além de dormência em algumas espécies) e sanitários (além da infecção e infestações das sementes por microrganismos patogênicos que podem afetar a germinação e vigor, a semente infectada pode se tornar o principal veículo de introdução de patógenos em algumas áreas). Assim, a qualidade das sementes é influenciada pelos quatro atributos juntos, sendo afetada negativamente se um dos atributos não for atendido.

A utilização de sementes com alta qualidade é de suma importância para o estabelecimento da população de plantas e desempenho destas no campo, visto que este insumo é o ponto de partida para obter emergência e estande de plantas uniforme, requisitos básicos de uma lavoura com elevado potencial de produtividade. Para se obter plântulas com alto potencial de crescimento são necessárias sementes com alto potencial fisiológico, que garantam alta porcentagem e uniformidade de germinação e emergência (BAUDET e PERES, 2004). No entanto, somente isto não é suficiente para garantir seu desempenho, pois, após a semeadura, muitas vezes às sementes ficam expostas às adversidades climáticas, ao ataque de pragas e de microrganismos o que pode resultar em um baixo e desuniforme estande de plantas. Existem alguns fatores externos que podem afetar, severamente, a expressão do vigor e o processo germinativo, como: água, temperatura, oxigênio e salinidade.

Um fator de grande destaque e importância no cultivo do arroz é o manejo correto da adubação, podendo muitas vezes ser considerado junto com o melhoramento vegetal, o responsável pelos ganhos em produtividades até o momento alcançadas no Brasil. Neste sentido, o uso da nutrição mineral tem sido um dos fatores que tem proporcionado respostas satisfatórias. A adubação equilibrada com macro e micronutrientes e a prática de calagem podem propiciar um melhor desenvolvimento das plantas, tornando-as menos susceptíveis ao ataque de pragas e doenças, além de contribuir para a resistência a fatores bióticos e abióticos (SOARES et al., 2004).

## 2.6. Expressão isoenzimática

As plantas sofrem alterações no seu metabolismo quando mantidas sob condições ambientais adversas. As isoenzimas são produtos da expressão gênica e consequentemente, altamente influenciadas pelo ambiente, e pelo manejo, pois os genes que controlam a sua expressão manifestam-se em determinados estádios do desenvolvimento e em órgãos e tecidos específicos, ou ainda sob um determinado estímulo (RAMÍREZ et al., 1991). De maneira geral, as isoenzimas podem ser consideradas variações de uma dada enzima dentro de um organismo, que apresentam uma mesma especificidade de substrato.

Padrões enzimáticos de diversas enzimas importantes podem variar em resposta a fatores estressantes como seca, salinidade e alta intensidade luminosa (DUBEY e SHARMA, 1990). De acordo com Malone et al. (2006), a intensidade das bandas e o perfil isoenzimático são específicos para uma determinada parte da planta, tecido e estádio de desenvolvimento.

Dentre as enzimas relacionadas à qualidade fisiológica das sementes mais pesquisadas estão aquelas que atuam no processo respiratório, como a malato desidrogenase (MDH), aquelas envolvidas no metabolismo de ligação nitrogênio-carbono, como a glutamato desidrogenase (GTDH), enzimas que possuem funções específicas no metabolismo dos lipídios, a exemplo das esterases (EST), ou, ainda, enzimas removedoras de peróxidos, como as catalases (CAT), superóxido dismutase (SOD) e enzimas relacionadas à desestruturação do sistema de membranas, como a esterase (EST) e fosfatase ácida (FAC) e fosfatase alcalina (CARVALHO et al., 2000). Além da álcool desidrogenase (ADH) que está

relacionada a respiração anaeróbica, promovendo redução do acetaldeído a etanol (BUCHANAN et al., 2005).

A glutamato oxaloacetato transaminase (GOT) tem sua atividade relacionada com a qualidade das sementes, e sua expressão é inversamente proporcional a qualidade das sementes, sendo responsável pela oxidação de aminoácidos, fornecendo energia para o Ciclo de Krebs ou redução do  $\alpha$ -cetoglutarato para a síntese de novos aminoácidos, como fonte de energia ao embrião em desenvolvimento (VIEIRA et al., 2009). De acordo com Brandão-Junior et al. (1999), essa enzima participa no processo de degradação e síntese de aminoácidos apresentando importante papel na germinação de sementes.

A álcool desidrogenase (ADH) é uma enzima que atua no processo respiratório, reduzindo substâncias tóxicas, como acetaldeído a etanol, que são produzidos quando as células passam a respirar anaerobicamente (FARIA et al., 2003). No metabolismo anaeróbico, na fermentação alcoólica, o piruvato, primariamente produzido na glicólise, é convertido à acetaldeído pela ação da enzima piruvato descarboxilase, sendo o acetaldeído reduzido a etanol pela álcool desidrogenase.

A glutamato desidrogenase (GTDH) atua na oxidação de proteínas de reserva fornecendo energia para as células e/ou na redução de  $\alpha$ -cetoglutarato para a síntese de aminoácidos (BRANDÃO-JÚNIOR et al., 1999).

A sorbitol desidrogenase (SDH) é uma enzima oxiredutora que catalisa a reação de remoção de hidrogênio do monossacarídeo sorbitol, possibilitando a degradação deste com posterior obtenção de energia para célula. Segundo Basavarajappa et al. (1991), a perda de atividade de desidrogenase em sementes envelhecidas pode estar associada com baixos níveis de produção da ATP e uma taxa reduzida de ATP e GTP dependente da síntese de proteína.

O silício atua na diminuição do estresse salino por diminuir a permeabilidade da membrana plasmática e lipídica e também por atuar na manutenção da integridade e funcionalidade das mesmas (ZHU et al., 2004). Nesse contexto, a aplicação de silício pode resultar em melhor atividade de enzimas associadas à degradação, respiração, germinação e metabolismo dos lipídios.

### **3. Material e Métodos**

O experimento foi desenvolvido na safra 2011/2012, em casa de vegetação e no Laboratório Didático de Análise de Sementes (LDAS) Flávio Farias Rocha, ambos pertencentes ao Programa de Pós-Graduação Ciência e Tecnologia de Semente, do Departamento de Fitotecnia da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel (FAEM) da Universidade Federal de Pelotas (UFPel).

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, em esquema fatorial A x B (**Fator A**- Cinco doses da cinza da casca de arroz aplicada via solo: 0 kg ha<sup>-1</sup>, 500 kg ha<sup>-1</sup>, 1000 kg ha<sup>-1</sup>, 1500 kg ha<sup>-1</sup> e 2000 kg ha<sup>-1</sup>; **Fator B**- Três concentrações salinas: 0 mM, 4 mM e 8 mM), com quatro repetições. Foram utilizadas sementes de arroz da cultivar IRGA 424 e como fonte de silício, foi utilizado cinza da casca de arroz carbonizada, a qual foi previamente moída em moinho de bolas, para uniformizar a granulometria. A cultivar IRGA 424 tem como características porte baixo, folhas pilosas, é tolerante à toxidez por ferro, resistente à brusone e moderadamente tolerante a salinidade.

Previamente à semeadura, as sementes foram tratadas com fungicida MAXIM XL®, inseticida CRUISER 350 FS® e polímero Color Seed®, utilizando-se 150, 150 e 300 mL 100 kg de sementes<sup>-1</sup>, respectivamente, com um volume de calda de 1200 mL 100 kg de sementes<sup>-1</sup>, o qual foi completado com água. O recobrimento foi realizado conforme metodologia descrita por Nunes (2005), que consiste num método manual em sacos plásticos (3 L). Os produtos foram aplicados diretamente no fundo do saco plástico e espalhados até uma altura de aproximadamente 15 centímetros, sendo colocado 0,2 kg de sementes no interior do saco plástico, agitando-as por 3 minutos. Posteriormente ao tratamento, os sacos plásticos foram abertos para que as sementes secassem a temperatura ambiente, por um período de 24 horas.

A semeadura foi realizada em vasos, preenchidos com 7 litros de solo peneirado, coletado do horizonte A1 de um PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico solódico (STRECK et al., 2008), pertencente à unidade de mapeamento Pelotas. A adubação foi realizada de acordo com os resultados da análise de solo e recomendações da Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC (2004), sendo utilizado como adubação de base ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio como fonte de nitrogênio, fósforo e potássio, respectivamente, com aplicação 14 dias antes da semeadura. A calagem foi realizada trinta dias antes da semeadura. A aplicação das doses de silício foi realizada no momento da semeadura, a qual foi incorporada ao solo até uma profundidade de 0,1 metro. Foi utilizado como tratamento o equivalente a 0, 500, 1000, 1500 e 2000 kg de silício hectare<sup>-1</sup>. Para tanto, considera-se o volume da camada arável do solo em um hectare em torno de 2 milhões de litros, estas quantidades foram transformadas para o volume dos vasos. Considerando que a cinza de casca de arroz carbonizada tem aproximadamente 92% de silício foi utilizado o equivalente a 0; 1,90; 3,80; 5,71; 7,61 g de cinza de casca de arroz carbonizada, respectivamente, para cada dose, em cada vaso.

No momento da semeadura, as sementes apresentavam 93% de germinação, sendo semeadas 10 sementes por unidade experimental, onde após a emergência (10 dias) foi realizado um desbaste deixando apenas 2 plantas por vaso, as quais permaneceram até a colheita das sementes. Durante o crescimento e desenvolvimento das plantas foi realizado aplicações do fungicida Nativo® (trifloxistrobina + tebuconazole) na dose recomendada de 750 mL ha<sup>-1</sup> e do inseticida Engeo Pleno® (Thiametoxam + Lambda Cialotrina) na dose recomendada de 200 mL ha<sup>-1</sup>, de maneira preventiva, sendo realizada uma aplicação no início do florescimento e uma no enchimento de grãos.

Os vasos plásticos ficaram espaçados 0,2 metro um do outro e, após a semeadura a irrigação foi realizada diariamente no período da manhã com as concentrações de cloreto de sódio (NaCl), mantendo-se o solo próximo à capacidade de campo até o estabelecimento definitivo da lâmina de água, realizado aos 30 dias após a emergência, conduzindo desta forma o experimento até a fase de maturação de campo.

A colheita foi realizada quando as plantas estavam nos estádios R8 e R9, caracterizando a maturidade fisiológica das sementes. Após foram determinados os componentes do rendimento. Na sequência foram realizadas avaliações da qualidade fisiológica das sementes produzidas, através da germinação e vigor (primeira contagem, envelhecimento acelerado, teste frio, comprimento de plântula, massa seca de plântula e emergência em campo). Além destes, foi realizado avaliações da expressão isoenzimática nas sementes. Detalhadamente as metodologias destes testes serão descritas a seguir.

### **3.1. Parâmetros avaliados**

#### **3.1.1. Componentes do rendimento**

Para essa determinação foram colhidas as panículas das duas plantas de cada unidade experimental, as quais foram levadas para o laboratório didático de análise de sementes para ser realizado as avaliações. As panículas de cada planta foram trilhadas manualmente, sendo determinado:

**Número de panículas por planta (NPANPL):** determinado pela contagem do número de panículas por planta.

**Número de sementes por panícula (NSPAN):** determinado através da contagem manual das sementes por panicula de cada unidade experimental e expressos em número de sementes panícula<sup>-1</sup>.

**Número de sementes por planta (NSPL):** determinado através da contagem manual das sementes por planta.

**Número de glumas estéreis por panícula (NGEPAN):** quantificado através da contagem manual das sementes por panicula de cada unidade experimental e expressos em número de sementes vazias panícula<sup>-1</sup>.

**Número de glumas estéreis por planta (NGEPL):** quantificado através da contagem manual das sementes por unidade experimental e expressos em número de sementes vazias planta<sup>-1</sup>.

**Peso de sementes por planta (PSPL):** obtido pela pesagem das sementes colhidas, sendo a umidade corrigida para 13% e os resultados expressos em grama planta<sup>-1</sup>.

**Peso de 1000 sementes:** para a determinação, foram tomadas oito repetições contendo cada uma 100 sementes pesadas em balança analítica. Para estas pesagens calculou-se a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação, e multiplicou-se a média por 10, obtendo assim o peso de mil sementes (BRASIL, 2009).

### **3.1.2. Qualidade fisiológica das sementes produzidas**

**Teste de germinação (G):** realizado segundo as Regras para Análise de Sementes - RAS (BRASIL, 2009), por meio da semeadura de 200 sementes por unidade experimental, divididas em quatro repetições de 50 sementes, em rolo de papel *germitest* umedecido, previamente, com água destilada na proporção de 2,5 vezes o peso do papel seco. Os rolos foram colocados em germinador à temperatura de 25°C, a contagem foi realizada aos 14 dias após a semeadura. Os resultados foram expressos em porcentagem de plântulas normais.

**Primeira contagem da germinação (PCG):** realizado conjuntamente ao teste de germinação, sendo a contagem das plântulas normais executada aos 7 dias após o início do teste. Os resultados foram expressos em porcentagem de plântulas normais.

**Teste de frio (TF):** conduzido com quatro subamostras de 50 sementes para cada unidade experimental, distribuídas uniformemente em rolo de papel tipo *germitest* umedecido, previamente, com água destilada na proporção de 2,5 vezes o peso do papel seco. Em seguida os rolos de papel foram colocados em sacos plásticos, os quais foram vedados e mantidos em câmara de BOD, regulada à temperatura de 10 °C ± 1 °C durante sete dias (CÍCERO e VIEIRA, 1994). Após esse período, os rolos foram transferidos para um germinador e mantidas nas mesmas condições do teste de germinação, sendo avaliada a porcentagem de plântulas normais após 7 dias.

**Envelhecimento acelerado (EA):** realizado utilizando-se o método de gerbox, onde as sementes foram espalhadas em camada única sobre uma tela metálica suspensa dentro de caixas de gerbox, contendo 40 mL de água destilada ao fundo. Posteriormente as caixas foram tampadas e acomodadas em câmara BOD, a 42°C por 96h (DELOUCHE e BASKIN, 1973). Após este período as sementes foram colocadas para germinar conforme metodologia descrita para o

teste de germinação e avaliados no sétimo dia. Os resultados foram expressos em porcentagem de plântulas normais.

**Comprimento da parte aérea (CPA) e de raiz (CR):** realizado com quatro subamostras de 20 sementes para cada unidade experimental, sendo as sementes distribuídas desencontradas em duas linhas longitudinais e paralelas no terço superior do papel de germinação tipo *germitest*, umedecido a 2,5 vezes o seu peso seco. Os rolos de papel foram acondicionados em germinador a 25°C. A leitura foi realizada aos sete dias após a semeadura, com auxílio de régua graduada em milímetros, sendo medido o comprimento total e o comprimento da parte aérea de 10 plântulas normais escolhidas aleatoriamente. O comprimento de raiz foi determinado pela subtração do comprimento total pelo comprimento da parte aérea. Os comprimentos médios da parte aérea e da raiz foram determinados somando-se as medidas de cada repetição e dividindo pelo número de plântulas avaliado, conforme metodologia descrita por NAKAGAWA (1999).

**Matéria seca de plântula (MSP):** realizada juntamente com o teste de comprimento de plântulas, sendo a parte aérea e raiz separadas com auxílio de bisturi, colocados em sacos de papel e levados para secar em estufa com circulação a 60 °C, durante 72 horas. Após esse período, as amostras foram colocadas para resfriar em dessecador e pesadas em balança analítica, sendo os resultados expressos em mg plântula<sup>-1</sup> (NAKAGAWA, 1999).

**Emergência em campo (EC):** esta determinação foi realizada em canteiros contendo solo, onde foram semeadas 200 sementes por unidade experimental, distribuídas em quatro repetições de 50 sementes. A avaliação foi realizada em contagem única das plântulas normais aos 21 dias após a semeadura, sendo os resultados expressos em percentagem de plântulas normais (NAKAGAWA, 1999).

### 3.1.3. Expressão isoenzimática

**Isoenzimas:** foram feitas avaliações de eletroforese, para a verificação de algumas isoenzimas, tais como tal como esterase, GOT (Glutamato oxaloacetato transaminase), fosfatase ácida, ADH (Álcool desidrogenase), GTDH (Glutamato desidrogenase) e SBTDH (Sorbitol desidrogenase). Foram utilizadas dez sementes produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes

concentrações salinas, maceradas em gral de porcelana, para cada unidade experimental. A avaliação consiste na utilização de 200 mg do extrato vegetal colocados em tubos eppendorf, acrescidos de solução extratora (tampão do gel + 0,15 % de 2-mercaptoetanol), na proporção 1:2 (p/v). A eletroforese foi realizada em géis de poliacrilamida 7%, colocando-se 20 $\mu$ L de cada amostra, em orifícios feitos com o auxílio de um pente de acrílico. Três aplicações (repetições) para cada uma das amostras foram realizadas. Os padrões enzimáticos foram analisados pelo sistema de tampões, descrito por Scandalios (1969). Os géis foram colocados em cubas eletroforéticas verticais, mantidas em câmara fria, com temperatura entre 4 e 6 °C. As migrações eletroforéticas foram realizadas com uma diferença de potencial de 10 V cm<sup>-1</sup>, até que a linha frontal, formada pelo azul de bromofenol, atinja 9 cm do ponto de aplicação. Os géis foram revelados conforme Scandalios (1969) e Alfenas (1998). Os géis de eletroforese foram fixados em solução 5-5-1, de água destilada: metanol: ácido acético.

### **3.2. Procedimento estatístico**

Os dados do experimento foram submetidos à análise de variância e havendo significância, realizou-se comparação de médias através do teste de Tukey para o fator concentração salina e regressão polinomial para o fator dose de silício, todos a 5% de probabilidade. Dados em percentagem oriundos da qualidade fisiológica foram submetidos à transformação arc.sen (raiz x/100). Para a análise estatística foi utilizado o Sistema de Análise Estatística Winstat versão 1.0 (MACHADO e CONCEIÇÃO, 2003).

Para a análise da expressão de isoenzimas, a interpretação dos resultados foi baseada na análise visual dos géis de eletroforese, levando em consideração a presença/ausência, bem como a intensidade de cada uma das bandas eletroforéticas.

## **4. Resultados e Discussão**

### **4.1. Componentes do rendimento**

Na tabela 1, estão apresentados os dados referentes aos componentes do rendimento de sementes de arroz da cultivar IRGA 424 produzidas em função da aplicação de doses de silício e diferentes concentrações salinas. Não foi constatada interação entre o fator dose de silício e o fator concentração salina para as variáveis número médio de panículas por planta (NPANPL) e número médio de sementes por panícula (NSPAN), sendo realizado a comparação apenas do efeito principal que apresentaram probabilidade de erro  $p \leq 0,05$ . Observou-se que a concentração salina de 0 mM foi superior às demais independente da dose de silício. De modo diferente, houve interação entre o fator concentração salina e dose de silício para as variáveis número médio de sementes por planta (NSPL) e peso de sementes por planta (PSPL). Para o NSPL e PSPL a concentração salina 0 mM foi superior às concentrações salinas de 4 e 8 mM, em todas as doses de silício.

Segundo Rhoades et al. (2000), a salinidade afeta não apenas o desenvolvimento das plantas, mas também a produção das culturas, efeito que se manifesta principalmente na redução da população e do desenvolvimento dos frutos, com sintomas similares ao do estresse hídrico; em geral, a salinidade do solo, causada pela irrigação com água salina, como pela combinação de fatores água, solo e manejo das culturas, pode resultar em aumento nos dias para colheita, redução no número de frutos, no peso dos frutos e sementes, influenciando, diretamente a produção. Dantas et al. (2003) avaliando a tolerância à salinidade de variedades de feijão-caupi verificaram redução no peso de sementes por planta com o aumento do nível de salinidade.

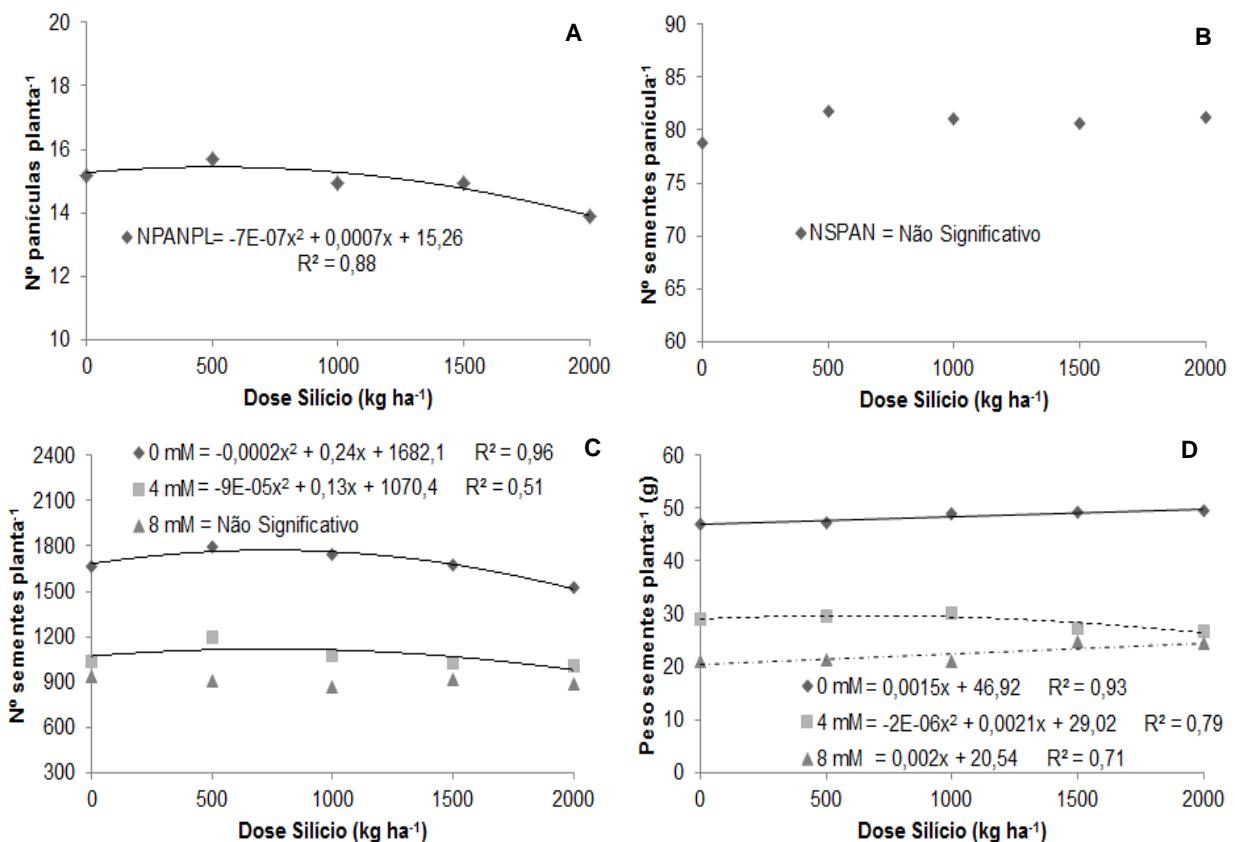
**Tabela 1.** Número médio de panículas por planta (NPANPL), número médio de sementes por panícula (NSPAN), número médio de sementes por planta (NSPL) e peso de sementes por planta (PSPL) de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.

Dose Silício (kg ha <sup>-1</sup> )	NPANPL				NSPAN			
	0 mM	4 mM	8 mM	Média	0 mM	4 mM	8 mM	Média
0	19	13	13	15	86	79	72	79
500	21	14	13	16	87	86	72	82
1000	20	13	12	15	87	83	73	81
1500	20	13	13	15	85	81	75	81
2000	18	12	12	14	86	84	74	81
Média	19 a	13 b	12 b	-	86 a	83 b	73 c	-
C.V (%)	5,5				3,8			
Dose Silício (kg ha <sup>-1</sup> )	NSPL				PSPL			
	0 mM	4 mM	8 mM	Média	0 mM	4 mM	8 mM	Média
0	1669 a	1034 b	932 b	1212	46,88 a	28,91 b	21,08 c	32,29
500	1795 a	1196 b	909 c	1300	47,34 a	29,60 b	21,42 c	32,78
1000	1742 a	1080 b	865 c	1229	48,88 a	30,20 b	21,02 c	33,36
1500	1672 a	1027 b	919 b	1206	49,32 a	27,33 b	24,73 c	33,79
2000	1521 a	1005 b	883 b	1136	49,61 a	26,80 b	24,39 b	33,60
Média	1680	1068	901	-	48,40	28,57	22,53	-
C.V (%)	6,5				4,3			

\*Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha, para cada variável, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O número médio de panículas por planta (NPANPL) apresentou comportamento quadrático positivo (Figura 1 A), com um incremento até a dose equivalente de 500 kg de silício ha<sup>-1</sup>. Já o número médio de sementes por panícula (NSPAN) não foi significativo em nenhum dos modelos testados (Figura 1 B). O comportamento das concentrações salinas 0 e 4 mM na variável número médio de sementes por planta (NSPL) (Figura 1 C) enquadrou-se num modelo quadrático positivo, onde na concentração salina 0 mM observou-se um incremento de 4,28 pontos percentuais (72 sementes por planta) até a dose de 600 kg de silício ha<sup>-1</sup>, e na concentração de 4 mM, apesar da baixa significância do R<sup>2</sup>, o ponto de máxima eficiência foi na dose de 722 kg de silício ha<sup>-1</sup>, o que resultou num incremento de 4,39 pontos percentuais (47 sementes por planta) em relação a testemunha. Porém, esse incremento no número médio de sementes por planta não foi observado para a concentração de 8 mM, o qual não respondeu de forma significativa ao aumento das

doses de silício (Figura 1 C). Estudando doses e épocas de aplicação de silício em duas colheitas consecutivas de sementes de arroz Singh et al. (2005), observaram que a adubação silicatada promoveu aumento na altura, produção de matéria seca, número de panículas por metro quadrado e produtividade.



**Figura 1.** Número médio de panículas por planta (média das três concentrações salinas) (A), número médio de sementes por panícula (B), número médio de sementes por planta (C), peso de sementes por planta (D) de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.

Em relação ao peso de sementes por planta (Figura 1 D), na concentração salina 0 e 8 mM os resultados enquadram-se em um modelo linear crescente, onde na maior dose de silício aplicada via solo (2000 kg ha<sup>-1</sup>) observou-se um incremento de 3 e 4 g planta<sup>-1</sup>, respectivamente. Já a concentração salina de 4 mM, os dados se enquadram em um modelo quadrático, com ponto de máxima na dose de 525 kg de silício ha<sup>-1</sup> (29,57 g planta<sup>-1</sup>). Tahir et al. (2006) constataram que a aplicação de silicato de cálcio aumentou, significativamente, a matéria seca e o rendimento de sementes de dois genótipos de trigo, tanto em condições normais

como em condições salinas, indicando sua importância na nutrição mineral do trigo. Resultados encontrados por Balastra et al. (1989), Deren et al. (1994) e Mauad et al. (2003), mostraram que o silício elevou o peso de sementes de arroz, corroborando com os resultados deste trabalho. Por outro lado, este resultado contrasta com o encontrado por Marchezan et al. (2004), que não verificaram resposta para o parâmetro rendimento de grãos de arroz com a aplicação de silicato de cálcio.

O peso de mil sementes (Tabela 2) foi verificado interação significativa entre os fatores estudados, onde a concentração de 0 mM mostrou-se superior, em todas as doses de silício, às demais concentrações salinas. Segundo Carvalho e Nakagawa (2000), o peso de mil sementes varia de acordo com o genótipo, mas também é influenciado pelas condições ambientais e práticas de manejo, como a nutrição das plantas, e ainda que o peso de mil sementes pode estar relacionado ao vigor das sementes. Isso pode ser observado no presente trabalho, pois as condições de estresse por salinidade interferiram no peso de mil sementes. Estudos têm mostrado redução na massa das sementes em função da salinidade para diversas espécies, como mamona (SILVA et al., 2008) e amendoim (CORREIA et al., 2009). Discordando de Jácome et al. (2003), que não observaram efeito significativo da salinidade sobre o peso de 100 sementes de genótipos de algodão.

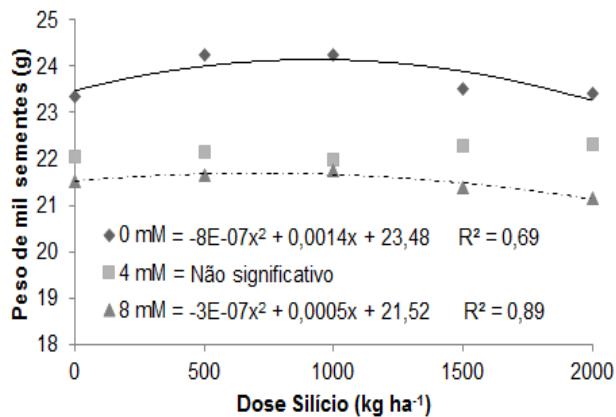
**Tabela 2.** Peso de mil sementes (P1000) de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.

Dose Silício (kg ha <sup>-1</sup> )	P1000			
	0 mM	4 mM	8 mM	Média
0	23,34 a	22,06 b	21,53 c	22,31
500	24,23 a	22,16 b	21,53 c	22,64
1000	24,24 a	22,25 b	21,19 b	22,56
1500	23,52 a	22,28 b	21,33 c	22,38
2000	23,42 a	22,33 b	20,95 c	22,24
Média	23,75	22,22	21,30	-
C.V (%)	1,1			

\*Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha, para cada variável, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para o peso de mil sementes (Figura 2), as concentrações salinas de 0 e 8 mM apresentaram comportamento semelhante, enquanto que a concentração de 4 mM não apresentou diferença entre as doses de silício aplicado. Na concentração

de 0 mM observa-se um incremento no peso de mil sementes até a dose de 875 kg de silício ha<sup>-1</sup>. Para a concentração salina de 8 mM, o ponto de máxima foi na dose de 833 kg de silício ha<sup>-1</sup>. De maneira semelhante, Oliveira (2013) obteve incrementos no peso de mil sementes de soja das cultivares BMX Turbo RR e NA 5909 RR, produzidas em função da aplicação de silício via solo. Do mesmo modo, Lima Filho e Tsai (2007) observaram benefícios do silício em massa de sementes de aveia branca e trigo. No entanto, Juliatti et al. (2004) observaram que as doses de silicato de cálcio em pó e granulado aplicados, não promoveu diferença significativa no peso de mil sementes e no rendimento de sementes. O peso de mil sementes é um importante indicador de qualidade que pode resultar em aumento de produtividade, pois sementes mais pesadas resultam em maior rendimento.



**Figura 2.** Peso de 1000 sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.

Na tabela 3, estão apresentados os resultados referentes ao número médio de glumas estéreis por panícula (NGEPAN) e por planta (NGEPL). Para o número médio de glumas estéreis por panícula houve interação entre as doses de silício e as concentrações salinas, sendo que a concentração de 8 mM foi superior as demais, não diferindo da concentração de 4 mM na dose de 1500 kg de silício ha<sup>-1</sup> e 2000 kg de silício ha<sup>-1</sup>. No entanto, para o número médio de glumas estéreis por planta não foi constatada essa interação, sendo então realizado比较ção de médias para o fator concentração salina e regressão polinomial para o fator dose de silício (Figura 3 B). Na comparação de médias, a concentração de 8 mM foi superior a 0 mM em 21 glumas estéreis por planta, não diferindo da concentração de 4 mM, independente

da dose de silício aplicada. As perdas de produtividade em função da salinidade podem ocorrer de uma série de causas, como redução da capacidade fotossintética (SULTANA et al., 1999), menor acúmulo de fotoassimilados nos grãos (ASCH et al., 2000), além do decréscimo no enchimento dos grãos, pelo aporte deficitário de carboidratos às panículas (KHATUN e FLOWERS, 1995).

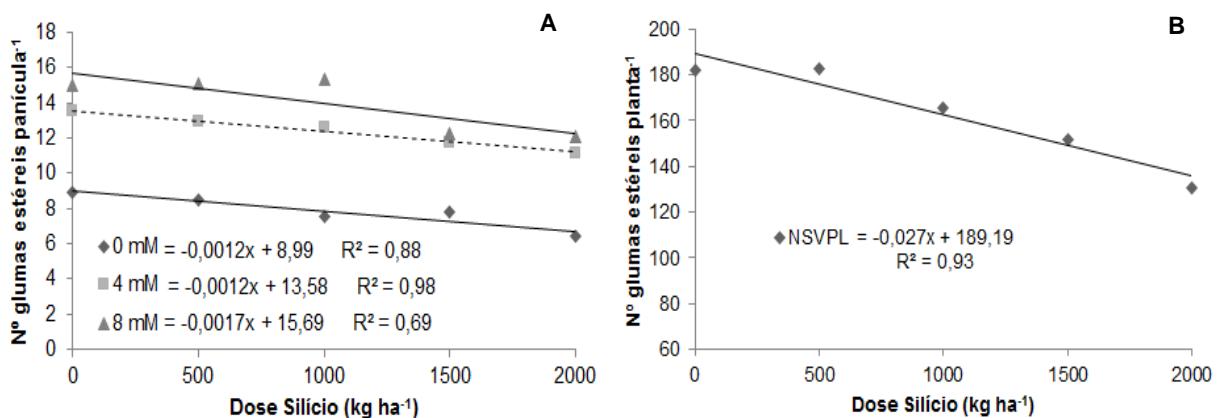
**Tabela 3.** Número médio de glumas estéreis por panícula (NGEPAN), número médio de glumas estéreis por planta (NGEPL) de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.

Dose Silício (kg ha <sup>-1</sup> )	NGEPAN				NGEPL			
	0 mM	4 mM	8 mM	Média	0 mM	4 mM	8 mM	Média
0	9 c	14 b	15 a	12	174	178	195	182
500	8 c	13 b	15 a	12	175	180	192	182
1000	8 c	13 b	16 a	12	150	164	191	168
1500	8 b	12 a	12 a	11	152	149	153	151
2000	6 b	11 a	12 a	10	113	134	145	131
Média	8	12	14	-	153 b	161 ab	175 a	-
C.V (%)	6,1				10,1			

\*Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha, para cada variável, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

No que se refere ao número médio de glumas estéreis por panícula (Figura 3 A), as concentrações 0, 4 e 8 mM tiveram comportamento similar com decréscimo na ordem de 0,0012; 0,0012 e 0,0017 glumas estéreis panícula<sup>-1</sup> para cada unidade de aumento da dose de silício, respectivamente, sendo que na dose mais elevada (2000 kg de silício ha<sup>-1</sup>) essa redução representou um decréscimo de 26,69; 17,67 e 21,67 pontos percentuais em relação à dose zero, respectivamente. Da mesma forma, o número médio de glumas estéreis por planta (Figura 3 B) apresentou redução de 0,027 glumas estéreis planta<sup>-1</sup> para cada unidade de aumento da dose de silício, sendo que na dose mais elevada (2000 kg ha<sup>-1</sup>) esse decréscimo foi de 28,54 pontos percentuais (54 glumas estéreis por planta) em relação à dose zero. De acordo com Pershin et al. (1995), a adubação com silício além de promover o aumento no rendimento de grãos e na massa de mil grãos, diminui a esterilidade de espiguetas. Contrastando com esse resultado, Marchezan et al. (2004) não constataram efeito da aplicação de silicato de cálcio na esterilidade das espiguetas.

Com o aumento das doses de silício observou-se redução no número médio de glumas estéreis, o que pode ter contribuído para o aumento do número de sementes por planta e consequentemente o peso de sementes por planta (Figura 1 C e 1 D). Da mesma forma, Oliveira (2013) obteve incrementos no peso de sementes de soja com a aplicação de silício via solo.



**Figura 3.** Número médio de glumas estéreis por panícula (A) e número de glumas estéreis por planta (média das três concentrações salinas) (B) de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.

Mesmo não sendo essencial, do ponto de vista fisiológico, para o crescimento e desenvolvimento das plantas a absorção de silício traz inúmeros benefícios (EPSTEIN, 1994), principalmente para a cultura do arroz. Isto mostra a “essencialidade agronômica” deste elemento para um aumento e/ou produção sustentável desta cultura. O estresse salino compromete o crescimento da planta por baixar o potencial osmótico da solução do solo, causando estresse hídrico e provocando efeitos tóxicos nas plantas que resultam em danos no metabolismo e desordens nutricionais (ALVES, 2009; DEBOUBA et al., 2006; MUNNS e TESTER, 2008). Apesar da necessidade de maior número de estudos relacionando silício com estresse salino em plantas, existem alguns trabalhos que mostram que o silício pode aumentar a tolerância à salinidade em plantas, melhorando a capacidade de absorção de água (ROMERO et al., 2006), aumento da atividade fotossintética e da estrutura das folhas (SHU e LIU, 2001), estímulo do sistema antioxidante (ZHU et al., 2004) e aumento da concentração de substâncias solúveis no xilema, o que resulta

na redução da absorção de sódio pelas plantas (LIANG et al., 1996; MATICHENKOV et al., 2001).

Portanto, pode-se atribuir aos resultados encontrados para os componentes do rendimento na condição sem sal e com sal, que a aplicação de silício via solo apresenta resposta positiva na cultura do arroz. Destacando também o benefício que a aplicação de silício oriundo da cinza da casca de arroz carbonizada apresentou, reduzindo o número médio de glumas estéreis por panícula (NGEPAN) e por planta (NGEPL), mostrando que a sua aplicação diminui a esterilidade das espiguetas mesmo sob estresse salino. De acordo com Agarie et al. (1998), o silício atua sobre a deterioração estrutural e funcional das membranas celulares, quando as plantas de arroz são expostas a algum estresse ambiental e que o silício pode também estar envolvido na estabilidade térmica das membranas.

#### **4.2. Qualidade Fisiológica das Sementes Produzidas**

Na tabela 4, encontram-se os resultados obtidos na comparação de médias entre as concentrações salinas, dentro de cada nível da dose de silício, para as variáveis primeira contagem de germinação (PCG) e germinação (G) de sementes de arroz da cultivar IRGA 424. No que se refere ao teste de primeira contagem de germinação foi constatado interação entre o fator dose de silício e concentração salina. Observa-se que, em geral, a concentração 0 mM foi superior as demais concentrações, não diferindo na dose de 500 kg de silício ha<sup>-1</sup> da concentração 4mM e na dose de 2000 kg de silício ha<sup>-1</sup> da concentração de 4 e 8 mM. A germinação não apresentou interação entre os fatores, no entanto, a média de germinação obtida na concentração de 0 mM foi superior às demais concentrações salinas. Lima et al. (2005), verificaram decréscimo na porcentagem de germinação de sementes de arroz, em função do aumento da concentração salina, sugerindo que a salinidade afeta o desenvolvimento de plântulas normais e diminui a viabilidade e o vigor das sementes. Da mesma forma, Deuner et al. (2011) trabalhando com sementes de genótipos de feijão-miúdo, constataram que o aumento da concentração de sal causou efeito negativo à primeira contagem de germinação e germinação.

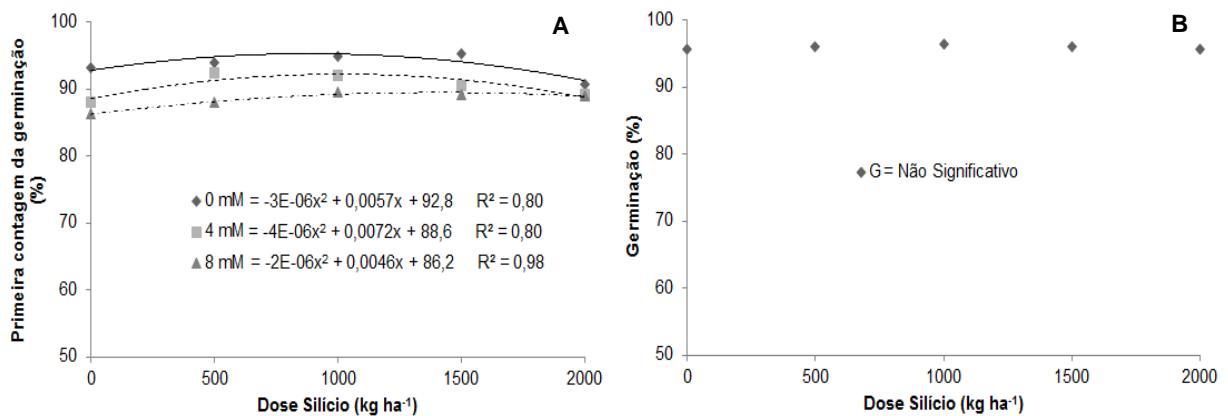
**Tabela 4.** Porcentagem de plântulas normais obtidas no teste de primeira contagem de germinação (PCG) e germinação (G) de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.

Dose Silício (kg ha <sup>-1</sup> )	PCG				G			
	0 mM	4 mM	8 mM	Média	0 mM	4 mM	8 mM	Média
0	93 a	88 b	86 b	89	97	96	95	96
500	94 a	93 a	88 b	92	97	96	95	96
1000	95 a	92 b	90 c	92	98	96	96	96
1500	95 a	91 b	89 b	92	97	96	95	96
2000	91 a	89 a	89 a	90	97	95	95	96
Média	94	90	88	-	97 a	96 b	95 c	-
C.V (%)	1,6				1,2			

\*Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha, para cada variável, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na figura 4 A, observa-se que para a concentração salina de 0 mM e 4 mM apresentaram um incremento na porcentagem de plântulas normais até a dose de silício de 950 e 900 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, sendo que a partir dessas doses até a dose mais elevada verificou-se um decréscimo. Já a concentração salina de 8 mM teve seu ponto de máxima germinação na dose de 1150 kg de silício ha<sup>-1</sup>, sendo que em doses mais elevadas ocorreu redução no incremento nessa variável, entretanto, ainda superior à dose zero, na dose mais elevada. Comparando as três concentrações salinas, verifica-se que na maior concentração salina são necessárias doses maiores de silício para se obter o ponto de máxima eficiência.

Em relação a variável germinação (Figura 4 B) não foi observado diferença significativa entre as doses de silício aplicadas via solo. Semelhantemente, Toledo et al. (2011) em sementes de aveia branca e Santos et al. (2010) com sementes de Brachiaria não encontraram diferença significativa para a germinação das sementes com o aumento das doses de silício. Corroborando com Lima (2010) que também verificou que sementes de arroz produzidas a partir de plantas submetidas à adubação com argila silicatada, não apresentaram alteração em sua qualidade fisiológica. No entanto, Matichenkov et al. (2005) em condições de estresse salino, constatou que a aplicação de silício aumentou a porcentagem de germinação de sementes de trigo.



**Figura 4.** Porcentagem de plântulas normais obtidas no teste de primeira contagem de germinação (A) e germinação (B) de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.

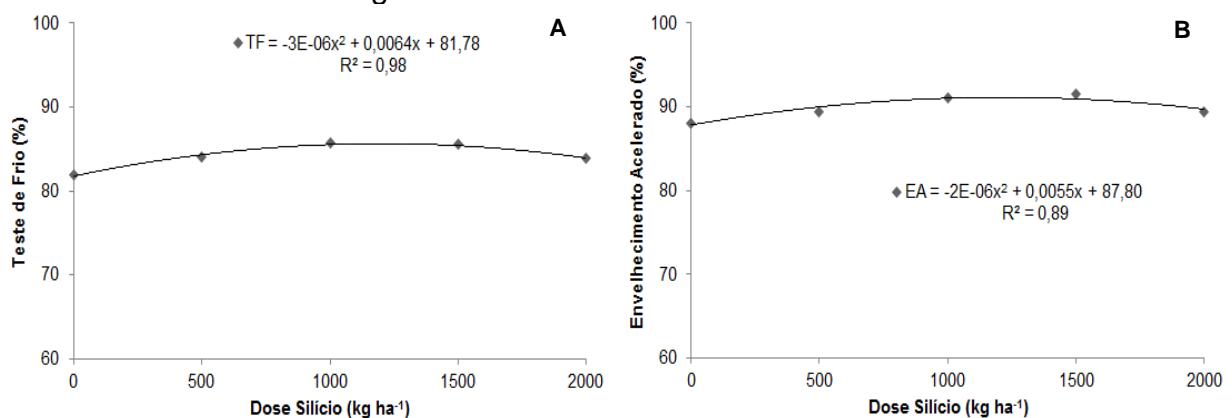
Na tabela 5, estão apresentados os resultados dos testes de frio (TF) e envelhecimento acelerado (EA) de sementes de arroz produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Não foi constatada interação entre o fator dose e o fator concentração salina nas variáveis, em virtude disso realizou-se apenas a comparação entre médias para as concentrações salinas (Tabela 5) e regressão polinomial para o fator doses de silício (Figura 5 A e 5 B). Para estas variáveis a concentração salina de 0 mM foi superior as demais concentrações salinas. Segundo Tekrony et al. (1984), Vieira et al. (1994) e Aguero et al. (1997), a qualidade fisiológica das sementes é mais influenciada pelas condições ambientais prevalecentes durante a fase de maturação e colheita do que pelas características da própria cultivar.

**Tabela 5.** Porcentagem de plântulas normais obtidas no teste de frio (TF) e envelhecimento acelerado (EA) sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.

Dose Silício (kg ha <sup>-1</sup> )	TF (%)				EA (%)			
	0 mM	4 mM	8 mM	Média	0 mM	4 mM	8 mM	Média
0	86	83	78	82	93	88	84	88
500	88	84	80	84	95	89	85	89
1000	90	85	82	86	96	90	87	91
1500	91	84	82	86	97	91	87	92
2000	88	83	81	84	96	88	85	89
Média	88 a	84 b	80 c	-	95 a	89 b	85 c	-
C.V (%)	2,9				2,1			

\*Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha, para cada variável, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Observa-se que o teste de frio (Figura 5 A) e envelhecimento acelerado (Figura 5 B) responderam de maneira similar ao aumento das doses de silício, ambos apresentaram comportamento quadrático positivo. Para o teste de frio, o ponto de máxima porcentagem de plântulas normais foi obtido na dose de 1067 kg de silício ha<sup>-1</sup>, resultando numa germinação de 85 %. Na variável envelhecimento acelerado, observa-se um incremento até a dose de 1375 kg de silício ha<sup>-1</sup> (92%). Segundo Rafi et al. (1997) a presença do silício pode resultar em aumento da capacidade biológica das sementes e plântulas em resistir às condições adversas do meio ambiente. Neste caso, as sementes de arroz mesmo sendo produzidas sob condições de estresse salino apresentaram bom desempenho fisiológico ao serem submetidas a testes de vigor como o teste de frio e envelhecimento acelerado.



**Figura 5.** Porcentagem de plântulas normais obtidas no teste de frio (média das três concentrações salinas) (A) e envelhecimento acelerado (média das três concentrações salinas) (B) de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.

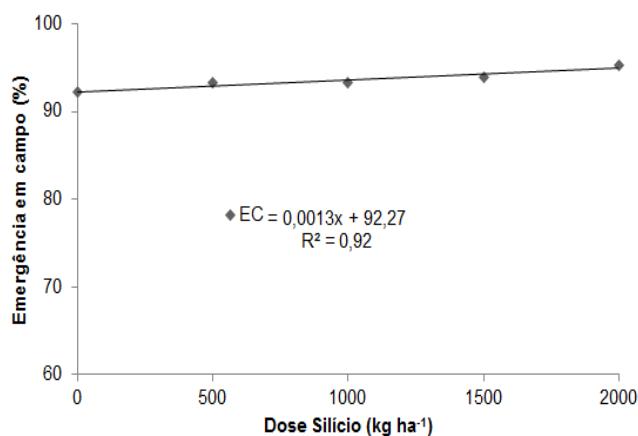
Em relação a emergência em campo, não foi constatada interação entre os fatores, em virtude disso realizou-se apenas a comparação entre médias para as concentrações salinas (Tabela 6) e regressão polinomial para o fator doses de silício (Figura 6). A concentração salina de 0 mM foi superior às concentrações salinas 4 e 8 mM.

**Tabela 6.** Emergência em campo (EC) de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.

Dose Silício (kg ha <sup>-1</sup> )	EC (%)			Média
	0 mM	4 mM	8 mM	
0	95	92	90	92
500	95	93	92	93
1000	97	93	90	93
1500	95	94	93	94
2000	97	95	94	95
Média	96 a	94 b	92 c	-
C.V (%)	2,9			

\*Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha, para cada variável, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

No tocante, a emergência em campo (Figura 6) na maior dose de silício via solo (2000 kg ha<sup>-1</sup>) observou-se um incremento de 2,6 %, em relação à dose zero.



**Figura 6.** Emergência em campo (média das três concentrações salinas) (B) de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.

Nos resultados referentes às variáveis comprimento da parte aérea e de raiz, massa seca da parte aérea e de raiz (Tabela 7), foi verificado interação entre o fator dose de silício e o fator concentração salina somente para a variável comprimento da parte aérea, onde a concentração salina de 0 mM foi superior as demais concentrações salinas em cada nível da dose de silício, não diferindo da concentração salina de 4 mM na dose mais elevada (2000 kg de silício ha<sup>-1</sup>). Nas demais variáveis (comprimento de raiz, massa seca da parte aérea e massa seca de raiz), a concentração de 0 mM foi superior independente da dose de silício aplicada. Em arroz, Lima et al. (2005) observaram que a presença de cloreto de sódio não interferiu na massa das plântulas nos estágios iniciais de desenvolvimento, sendo que, normalmente, em plantas sensíveis à salinidade ocorre diminuição da taxa de emergência e redução nas matérias seca e fresca da parte aérea e do sistema radicular.

**Tabela 7.** Comprimento médio da parte aérea (CPA) e raiz (CR), massa seca média da parte aérea (MSPA) e raiz (MSR) de plântulas de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.

Dose Silício (kg ha <sup>-1</sup> )	CPA (m)				CR (m)			
	0 mM	4 mM	8 mM	Média	0 mM	4 mM	8 mM	Média
0	0,089 a	0,060 b	0,059 b	0,069	0,060	0,052	0,048	0,053
500	0,140 a	0,117 b	0,117 b	0,125	0,062	0,054	0,049	0,055
1000	0,137 a	0,128 b	0,128 b	0,131	0,064	0,057	0,049	0,057
1500	0,139 a	0,129 b	0,123 b	0,130	0,064	0,058	0,048	0,057
2000	0,136 a	0,130 ab	0,128 b	0,131	0,060	0,056	0,046	0,054
Média	0,128	0,113	0,111	-	0,061 a	0,055 b	0,048 c	-
C.V	3,3				5,9			
Dose Silício (kg ha <sup>-1</sup> )	MSPA (mg)				MSR (mg)			
	0 mM	4 mM	8 mM	Média	0 mM	4 mM	8 mM	Média
0	33,4	27,3	25,7	28,8	22,0	19,7	18,6	20,1
500	33,3	26,0	25,6	28,3	21,5	17,7	17,7	19,0
1000	31,7	25,9	25,3	27,6	21,4	17,5	17,0	18,6
1500	30,4	25,8	24,6	26,9	21,3	17,1	16,2	18,2
2000	28,9	25,6	23,8	26,1	20,0	17,1	16,2	17,8
Média	31,5 a	26,1 b	25,0 c	-	21,2 a	17,9 b	17,1 c	-
C.V (%)	4,6				4,3			

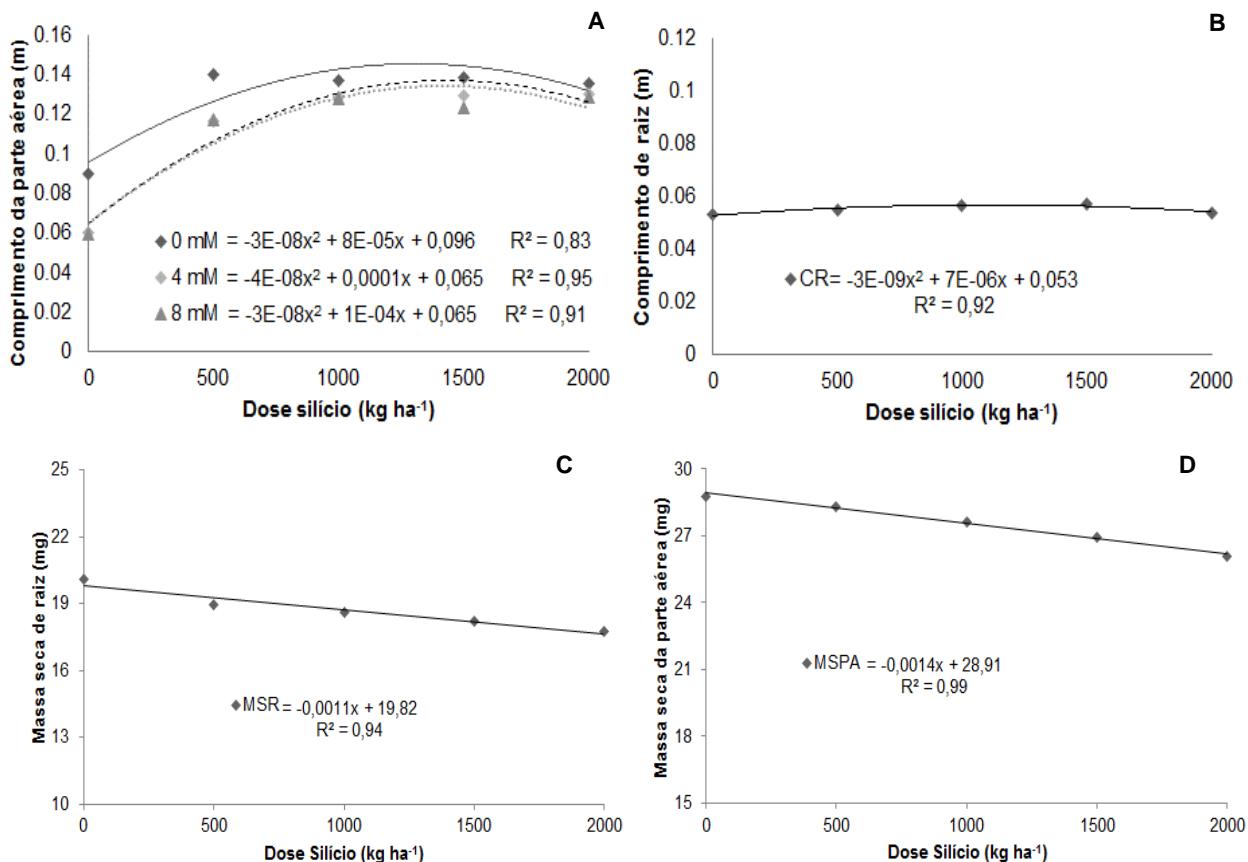
\*Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha, para cada variável, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A figura 7 refere-se ao comprimento da parte aérea, comprimento de raiz, massa da parte aérea e massa seca de raiz de plântulas de arroz produzidas com a aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pode ser observado que para o comprimento da parte aérea, os resultados apresentaram incremento com a aplicação de silício (Figura 7 A). Na concentração salina de 0 mM o ponto de máxima eficiência foi obtido na dose de 1333 kg de silício ha<sup>-1</sup>, resultando num acréscimo de 0,053 m. Para a concentração salina de 4 mM, foi obtido um incremento até a dose de 1250 kg de silício ha<sup>-1</sup>, o que representa um acréscimo de 0,063 m. Já a concentração salina de 8 mM apresentou um incremento de 0,083 m na dose de 1667 kg de silício ha<sup>-1</sup>. Em estudo com aplicação de silicato de alumínio Fonseca (2012), não observou diferença significativa para o comprimento da parte aérea em trigo. Plântulas com maior crescimento inicial podem gerar plantas mais produtivas, uma vez que a maior área foliar inicial pode proporcionar maior taxa fotossintética, pois de acordo com Gustafson et al. (2004), plantas portadoras de elevada velocidade de emergência e de crescimento inicial, possuem prioridade na utilização dos recursos do meio e, por isso, geralmente levam vantagem na utilização desses.

No que se refere ao comprimento de raiz (Figura 7 B) é possível observar pequeno acréscimo até a dose de 1167 kg de silício ha<sup>-1</sup>, resultando em uma média de 0,057 m.

Na matéria seca tanto da parte aérea quanto de raiz, observou-se que ambas apresentaram decréscimo na ordem de 0,0011 e 0,0014 mg para cada unidade de aumento da dose de silício, respectivamente (Figura 7 C e 7 D). Esses resultados estão de acordo com os encontrados por Lima et al. (2011), que verificaram que a salinidade do cloreto de sódio inibiu significativamente a produção de massa seca de raízes (MSR) e folhas (MSF) das plantas de feijão e milho, independentemente do modo de aplicação de silício (foliar ou na solução nutritiva). Em condições de estresse salino, Matichenkov et al. (2005) constataram que a aplicação de silício aumentou a biomassa de trigo. Contrariando os resultados encontrados por Guo et al. (2005), que observaram que a adição de silício em solução nutritiva aumentou a matéria seca da parte aérea de plântulas de arroz, mas não das raízes. Segundo Ma et al. (2001a), o silício é o único elemento que não

causa danos às plantas quando acumulado em excesso, devido às suas propriedades de não dissociação em pH fisiológico e à polimerização.



**Figura 7.** Comprimento médio da parte aérea (A) e de raiz (B), massa seca média da parte aérea (C) e de raiz (D) de plântulas de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.

Cabe ainda salientar que foram encontradas poucas informações na literatura sobre a qualidade fisiológica de sementes oriundas de plantas submetidas a aplicação de silício via solo e cultivadas sob estresse salino. Entretanto, os resultados encontrados mostram que as sementes de arroz mesmo sendo produzidas sob condições de estresse salino apresentaram bom desempenho fisiológico, o que pode ser atribuído a aplicação de silício via solo.

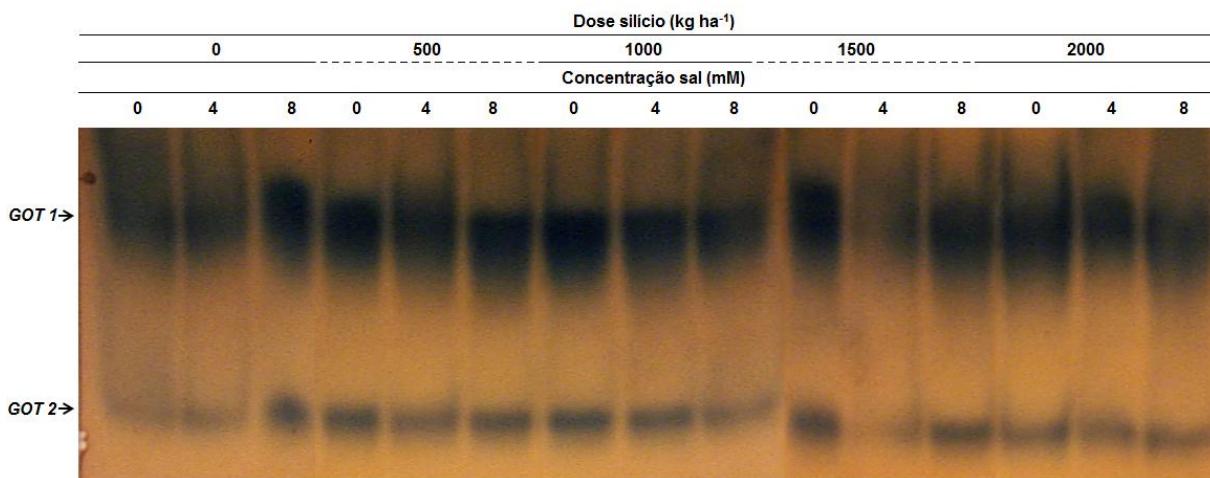
#### 4.1. Expressão isoenzimática

Dos sete sistemas isoenzimáticos analisados, apenas os sistemas enzimáticos Glutamato Oxaloacetato Transaminase (GOT), Álcool Desidrogenase

(ADH), Glutamato Desidrogenase (GTDH), Sorbitol Desidrogenase (SBTDH) proporcionaram resultados diferenciados. Na análise dos padrões eletroforéticos, foi possível visualizar que houve variação na intensidade das bandas, em função dessa variação, cada sistema foi abordado e analisado individualmente.

A figura 8, refere-se ao sistema eletroforético GOT, no qual constatou-se a expressão de 2 alelos (GOT 1 e GOT 2). Na dose zero de silício, observa-se que há um aumento na expressão da enzima com o aumento das concentrações salinas. O aumento na expressão desta enzima é inversamente proporcional a qualidade das sementes, sendo responsável pela oxidação de aminoácidos, fornecendo energia para o Ciclo de Krebs ou redução do  $\alpha$ -cetoglutarato para a síntese de novos aminoácidos, como fonte de energia ao embrião em desenvolvimento (VIEIRA et al., 2009). Confirmando os resultados obtidos nos testes de qualidade fisiológica das sementes produzidas sem aplicação do elemento químico.

Na dose de 500 e 2000 kg de silício  $ha^{-1}$ , não foi observado diferença expressiva nas bandas desta enzima (Figura 8). O estresse salino tem sido um grande obstáculo para o sucesso do uso de solos afetados por sais para a produção agrícola de arroz irrigado. Segundo Zhu et al. (2004) o silício atua na diminuição desse tipo de estresse por diminuir a permeabilidade da membrana plasmática e lipídica e também por atuar na manutenção da integridade e funcionalidade das mesmas. Observa-se que, com a aplicação de silício nas doses de 1000 e 1500 kg  $ha^{-1}$ , a expressão da enzima diminui nas concentrações de 8 e 4 mM, respectivamente, corroborando com os resultados obtidos nos testes de vigor, onde a aplicação de silício resultou em incrementos. Trabalhos realizados por Chauhan et al. (1985) e Tunes (2009), observaram incremento de bandas para a enzima GOT com a deterioração das sementes. De acordo com os autores, essas mudanças no número de bandas são devidas a um aumento na atividade metabólica com o processo deteriorativo.

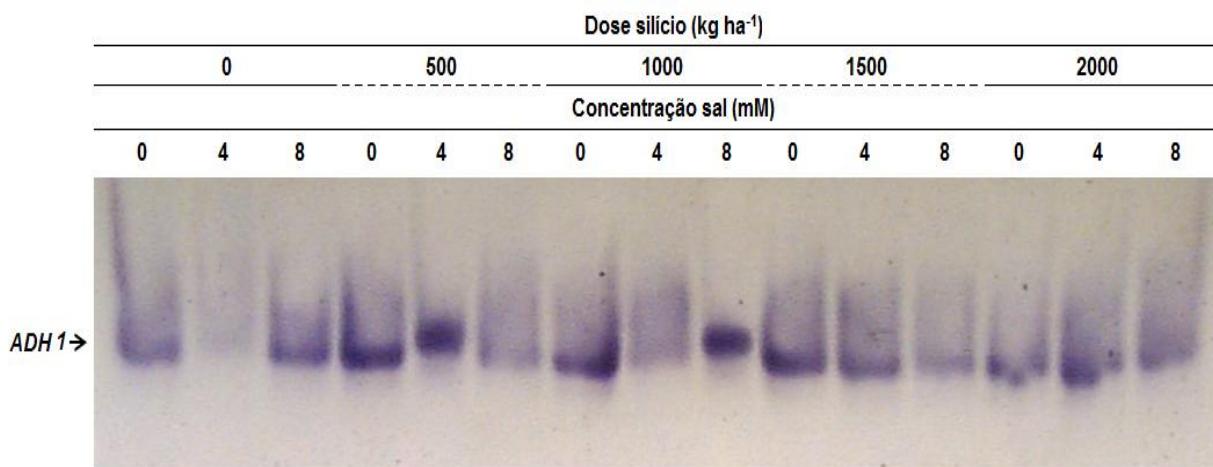


**Figura 8.** Padrões eletroforéticos obtidos com o sistema isoenzimático Glutamato Oxaloacetato Transaminase de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.

A álcool desidrogenase (ADH) é uma enzima que atua no processo respiratório, reduzindo substâncias tóxicas às sementes, como acetaldeído a etanol, que são produzidos, quando as células passam a respirar anaerobicamente (FARIA et al., 2003). O processo de acúmulo de etanol envolve a oxidação de NADH e resulta na produção de pequenas quantidades de ATP, fundamental para a sobrevivência de várias espécies sob condições de anoxia (KENNEDY et al., 1992). Para a álcool desidrogenase foi constatado a presença de um alelo (ADH 1) e pela análise visual de sua expressão, verificou-se que na dose 0 kg de silício  $\text{ha}^{-1}$ , a concentração salina de 8 mM apresentou expressão bastante pronunciada em relação as demais concentrações (Figura 9).

Para a dose de 500 e 1500 kg de silício  $\text{ha}^{-1}$ , a expressão da enzima é maior na concentração salina de 0 e 4 mM. Na dose de 1000 kg de silício  $\text{ha}^{-1}$ , observa-se maior intensidade da banda nas concentrações salinas de 0 e 8 mM. No entanto, para 2000 kg de silício  $\text{ha}^{-1}$ , não foi observada diferença expressiva da enzima álcool desidrogenase. Segundo Zhang et al. (1994), o acetaldeído acelera a deterioração das sementes, portanto, com o aumento da atividade da ADH, as sementes ficam mais protegidas contra a ação deletéria deste composto. Os produtos finais do metabolismo fermentativo são tóxicos para as células, mas o etanol parece ser o produto do metabolismo fermentativo menos deletério comparado ao acetaldeído (ZHANG et al., 1994). Dessa forma, a ADH pode ser considerada um marcador de qualidade fisiológica, por sua baixa atividade representar um risco para a semente.

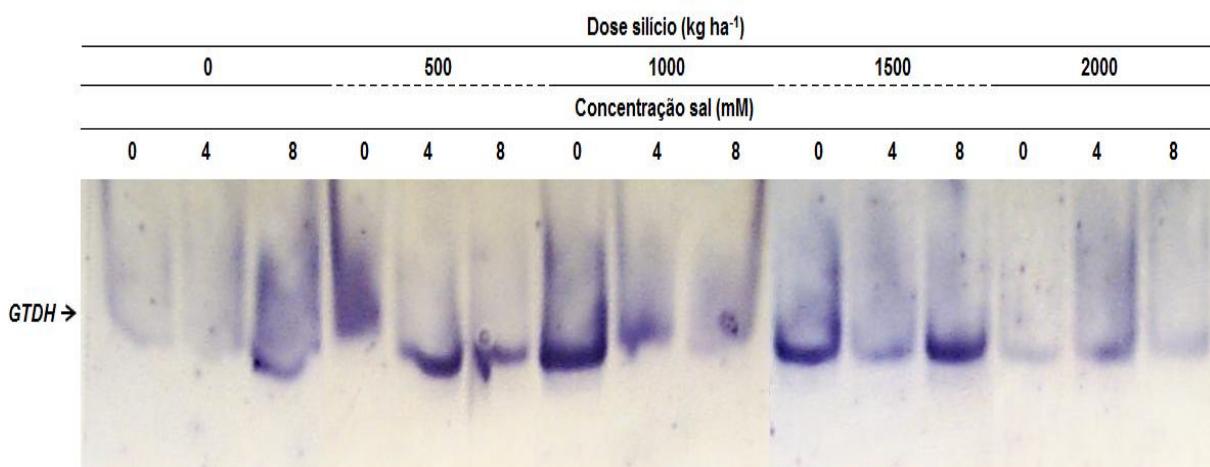
De acordo com Tunes (2009), a expressão desta enzima é exclusiva nas sementes, não sendo mais necessária à medida que o processo de germinação avança e o processo aeróbico de geração de energia começa a ser predominante.



**Figura 9.** Padrões eletroforéticos obtidos com o sistema isoenzimático Álcool Desidrogenase de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.

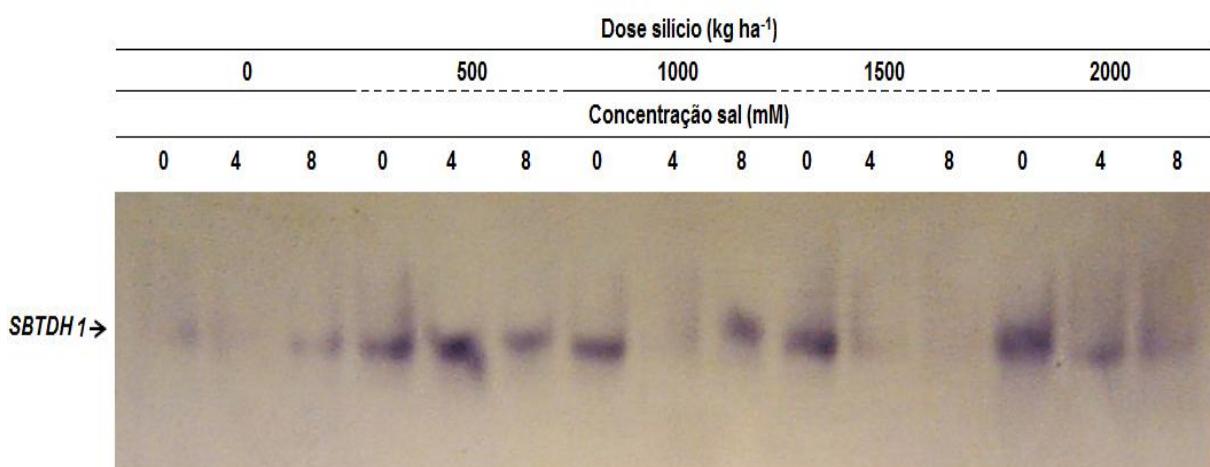
A expressão da enzima glutamato desidrogenase (GTDH) pode ser observada na figura 10, onde foram detectados um alelo (GTDH 1) no sistema isoenzimático. Na dose 0 e 500  $\text{kg de silício ha}^{-1}$ , foi constatado maior expressão desta enzima com o aumento progressivo das concentrações salinas. Embora se tenha observado maior expressão da GTDH, pode-se inferir que a enzima apresentou pouca ou nenhuma atividade, pois de acordo com Brandão-Júnior et al. (1999), esta enzima apresenta alta correlação entre redução da atividade e a redução de qualidade fisiológica das sementes de milho, fato que foi detectado pelos testes de viabilidade e vigor no presente trabalho. Concordando com o autor, na dose de 1000  $\text{kg de silício ha}^{-1}$ , a enzima se comportou inversamente, com decréscimo em sua expressão à medida que aumentou as concentrações salinas.

Para a dose de 1500  $\text{kg de silício ha}^{-1}$ , a concentração salina 4 mM apresentou menor expressão. Já na dose 2000  $\text{kg de silício ha}^{-1}$ , as concentrações salinas de 0 e 8 mM, apresentaram menor expressão. Segundo Malone et al. (2007), esta enzima está diretamente envolvida na ligação Nitrogênio – Carbono, sendo possível que variações ocorram à medida que acontece a síntese e degradação de aminoácidos durante o processo de germinação.



**Figura 10.** Padrões eletroforéticos obtidos com o sistema isoenzimático Glutamato Desidrogenase de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.

Outra desidrogenase estudada foi a sorbitol (SBTDH), uma enzima oxireductora que catalisa a reação de remoção de hidrogênio do monossacarídeo sorbitol, possibilitando a degradação deste com posterior obtenção de energia para a célula (Figura 11). Na dose de 0  $\text{kg de silício ha}^{-1}$ , com o aumento da concentração salina de 0 até 8 mM, constatou-se aumento na expressão da banda da enzima. Na dose de 500  $\text{kg de silício ha}^{-1}$ , não foi observado diferença entre as concentrações salinas. Na dose de 1000  $\text{kg de silício ha}^{-1}$ , as concentrações salinas de 0 e 8 mM apresentaram maior expressão. Já a as doses de 1500 e 2000  $\text{kg de silício ha}^{-1}$ , a ausência de sal, resultou em maior expressão da banda. Contrastando com Basavarajappa et al. (1991), que verificaram um decréscimo gradual na expressão dessa enzima nas sementes de milho com o aumento da concentração salina. Os autores afirmam que a perda de atividade de desidrogenase em sementes submetidas a um estresse, pode estar associada a baixos níveis de produção da ATP e reduzidas taxas de ATP e GTP dependente da síntese de proteína. No entanto, Tunes et al. (2010) não verificaram decréscimo na expressão da mesma enzima com o aumento da concentração salina em sementes de cevada.



**Figura 11.** Padrões eletroforéticos obtidos com o sistema isoenzimático Sorbitol Desidrogenase de sementes de arroz da cultivar IRGA 424, produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e diferentes concentrações salinas. Pelotas-RS, Brasil, 2013.

Os marcadores bioquímicos, segundo Basu (1995), vem sendo empregados em estudos de viabilidade, pois são eficientes para se conhecerem eventos importantes do tempo de vida, das mudanças deteriorativas e da morte das sementes. De acordo com Tunes et al. (2009), o uso de alterações em enzimas é uma ferramenta de grande valor para o controle de qualidade de sementes, permitindo diagnosticar o estado fisiológico das mesmas e, em determinados casos, inferir sobre causas da perda de viabilidade e vigor.

Os quatro sistemas eletroforéticos analisados, revelaram que, ocorrem variações no padrão de expressão das isoenzimas nas sementes produzidas em função da aplicação de doses de silício via solo e submetidas a estresse salino. Segundo Tunes et al. (2010), a avaliação conjunta de vários sistemas isoenzimáticos é recomendável por verificar modificações que ocorrem no interior das sementes.

## **5. Considerações finais**

A aplicação de silício via solo proporcionou incremento no peso de sementes por planta. Na concentração de 0 mM e 8 mM a dose mais elevada de silício (2000 kg ha<sup>-1</sup>) resultou num aumento de 3 e 4 g por planta, respectivamente. Já a concentração salina de 4 mM apresentou incremento até o ponto de máxima eficiência na dose de 525 kg silício ha<sup>-1</sup>, resultando num aumento de 0,55 g por planta.

Os componentes do rendimento (NPANPL, NSPAN, NSPL, PSPL, NSVPAN e NSVPL) apresentaram redução com o aumento da salinidade.

A aplicação de silício na dose 2000 kg de silício ha<sup>-1</sup> resultou num decréscimo de 54 glumas estéreis por planta em relação a dose zero.

De maneira geral, a qualidade fisiológica das sementes produzidas na condição normal (concentração 0mM) foi superior àquelas que foram produzidas em condições de estresse salino.

O vigor das sementes quando avaliado pelo teste de comprimento da parte aérea, mostrou que a aplicação de silício resultou para a concentração de 0 mM, 4 mM e 8 mM acréscimo de 0,053; 0,063 e 0,083 m, nas dose de máxima eficiência de 1333; 1250 e 1667 kg de silício ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Os resultados obtidos com os quatro sistemas eletroforéticos analisados (GOT, ADH, GTDH e SBTDH) permitem verificar modificações que ocorrem fisiologicamente e metabolicamente nas sementes produzidas, quando as plantas são submetidas a algum tipo de estresse durante seu crescimento e desenvolvimento.

O sistema isoenzimático glutamato oxaloacetato transaminase (GOT), revelou-se uma promissora ferramenta complementar à avaliação do potencial fisiológico das sementes produzidas em função da aplicação de doses de silício via

solo e diferentes concentrações salinas, devido a relação da expressão das bandas com o resultado obtido na qualidade fisiológica.

## **6. Conclusões**

A salinidade apresenta efeito negativo sobre os componentes do rendimento e a qualidade fisiológica das sementes produzidas.

A aplicação de silício proporciona acréscimo no peso de sementes por planta.

A qualidade fisiológica das sementes produzidas de arroz é influenciada positivamente, pelo aumento das doses de silício, em todas as concentrações salinas testadas.

O sistema isoenzimático glutamato oxaloacetato transaminase (GOT) é uma ferramenta complementar à avaliação do potencial fisiológico de sementes.

## 7. Referências

- ABDALLA, M.M. Beneficial effects of diatomite on growth, the biochemical contents and polymorphic DNA in *Lupinus albus* plants grown under water stress. **Agriculture and Biology Journal of North America**, Milford, v.2, p.207-220, 2011.
- AGARIE, S.; HANAOKA, N.; UENO, O.; MIYAZAKI, A.; KUBOTA, F.; AGATA, W.; KAUFMAN, P. B. Effects of silicon on tolerance to water deficit and heat stress in rice plants (*Oryza sativa* L.), monitored by electrolyte leakage. **Plant Production Science**, Japão, v.1, n.2, p.96-103, 1998.
- AGRIANUAL 98. **Anuário Estatístico da Agricultura Brasileira**. São Paulo: FNP, 1998.p. 121-130.
- AGUERO, J. A. P.; VIEIRA, R. D.; BITTENCOURT, S. R. M. Avaliação da qualidade fisiológica de sementes de cultivares de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 19, n. 2, p.254-259, 1997.
- AHMAD, R.; ZAHEER, S.; ISMAIL, S. Role of silicon in salt tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.). **Plant Science**, Clare, v. 85, n. 01, p. 43–50, 1992.
- ALFENAS, A. C. **Eletroforese de isoenzimas e proteínas afins**. Viçosa: UFV, 1998, 574p.
- ALVES, F. A. L.; SILVA, S. L. F.; SILVEIRA, J. A. G.; PEREIRA, L. A. Mecanismos fisiológicos envolvidos com a diminuição de K<sup>+</sup> em raízes de cajueiro causada por NaCl. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 40, n. 04, p. 588-595, 2009.
- ASCH, F.; DINGKUHN, M.; DÖRFFLING, K.; MIEZAN, K. Leaf K//Na ratio predicts salinity induced yield loss in irrigated rice. **Euphytica**, Amsterdam, v.113, p.109-118, 2000.
- ASHRAF, M.; HARRIS, P.J.C. Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants. **Plant Science**, Clare, v.166, n.1, p.3-16, 2004.
- AZAMBUJA, I.H.V.; VERNETTI JR., F.J.; MAGALHÃES JUNIOR, A.M. Aspectos socioeconômicos da produção do arroz. In: GOMES, A.S.; MAGALHÃES Jr., A.M. Arroz irrigado no Sul do Brasil. Brasília, DF. **Embrapa Informação Tecnológica**, p.23-44, 2004.
- BALASTRA, M.L.F; PEREZ, C.M.; JULIANO, B.O.; VILLREAL, P. Effects of sílica level on some properties of *Oryza sativa* straw and hult. **Canadian Journal Botanic**, v. 67, p.2356-63, 1989.
- BARBOSA FILHO, M. P.; SNYDER, G. H.; PRABHU, A. S.; DATNOFF, L. E.; KORNDÖRFER, G. H. Importância do silício para a cultura do arroz (uma revisão de literatura). **Informações Agronômicas**. Piracicaba, n.89, p.1-8, 2000. Encarte técnico.

- BASAVARAJAPPA, B.S.; SHETTY, H.S.; PRAKASH, H.S. Membrane deterioration and other biochemical changes, associated with accelerated ageing of maize seeds. **Seed Science and Technology**, Zürich, v.19, n.2, p. 279-286, 1991.
- BASU, R. N. **Seed viability**. In: BASRA, A. S. Seed quality: basic mechanisms and agricultural implications. New York: Haworth, 1995, 1-42p.
- BAUDET, L.; PERES, W. B. Recobrimento de sementes. In: **Seed News**, Pelotas, v.4, n. 1, p. 20-23, 2004.
- BERNSTEIN, L. Tolerance of plants to salinity. **Proceedings of American Society of Civil Engineering**, Baltimore, v. 87, p. 1-12, 1961.
- BEWLEY, J.D.; BLACK, M. **Seeds – Physiology of Development and Germination**. 2ed. New York. Plenum Press. 1994. 445p.
- BRANDÃO-JUNIOR, D.S.; CARVALHO, M.L.M.; VIEIRA, M.G.G.C. Variações eletroforéticas de proteínas e isoenzimas relativas à deterioração de sementes de milho envelhecidas artificialmente. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v.21, p. 114-121, 1999.
- BRASIL DECRETO N° 4954. Aprova o regulamento da lei nº 6.894 de 16 de janeiro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes ou biofertilizantes destinados à agricultura, e dá outras providências. **Normas jurídicas DEC 004954**, 14 jan., 2004, pp. 27.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília, DF: Mapa/ACS, 2009. 395p.
- BUCHANAN, B.B.; GRUISSEM, W.; JONES, R.L. **Biochemistry & Molecular Biology of plants**. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 2005, 1367p.
- CAMARGO, M. S. KORNDÖRFER GH; PEREIRA HS. Solubilidade do silício em solos: influência do calcário e ácido salicílico aplicados. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p.637-647, 2007.
- CAMPOS, I.S.; ASSUNÇÃO, M.V. Efeito do cloreto de sódio na germinação e vigor de plântulas de arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 25, n. 6, p. 837-843, 1990.
- CARVALHO, J. C. **Análise de crescimento e produção de grãos da cultura do arroz irrigado por aspersão em função da aplicação de escórias de siderurgia como fonte de silício**. 2000. 119 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.
- CARVALHO, M.L.M.; VIEIRA, M.G.G.C.; PINHO, E.R.V. Técnicas moleculares em sementes. **Biotecnologia, Ciência & Desenvolvimento**, Brasília, v.3, n.17, p.44-47, 2000.
- CARVALHO, N.M.; NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 4ed. Jaboticabal, Funep, 2000. 588p.
- CARVALHO-PUPATTO, J. G.; BULL, L. T. CRUSCIOL, C. A. C.; MAUAD, M.; SILVA, R. H. Efeito de escória de alto forno no crescimento radicular e na produtividade de arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 11, p. 1323-1328, nov. 2003.

- CAVALCANTE, A.M.B.; PEREZ, S.C.J.G. de A. Efeitos dos estresses hídrico e salino sobre a germinação de sementes de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Witt. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.30, n. 2, p. 281-289, 1995.
- CHAUHAN, K. P. S.; GOPINATHAN, M. C.; BABU, C. R. Electrophoretic variations of proteins and enzymes in relation to seed quality. **Seed Science and Technology**, Zurich, v. 13, p. 629-41, 1985.
- CHUNGSANGUNSIT, T.; GHEEWALA, S. H.; PATUMSAWAD, S. **Environmental Profile of Power Generation from Rice Husk in Thailand**. 2004. Disponível em: <<http://www.thaiscience.info/Article%20for%20ThaiScience/Article/3/Ts-3%20environmental%20profile%20of%20power%20generation%20from%20rice%20husk%20in%20thailand.pdf>> Acesso em: 22 Abril. 2013.
- CÍCERO, S. M.; VIEIRA, R. D. Teste de frio. In: VIEIRA, R.D.; CARVALHO, N.M. (Ed.) **Testes de vigor em sementes**. Jaboticabal: FUNEP, 1994. p.151-164.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFS RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. 400p.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira: Sexto levantamento grãos safra 2012/2013 - março 2013**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=>>> Acesso em: 30 de maio 2013.
- CORREIA, K. G.; FERNANDES, P. D.; GHEYI, H. R.; NOBRE, R. G.; SANTOS, T. S. Crescimento, produção e características de fluorescência da clorofila a em amendoim sob condições de salinidade. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 40, n. 04, p. 514-521, 2009.
- CÔTÉ-BEAULIEU, C.; CHAIN, F.; MENZIES, J.G.; KINRADE, S.D.; BÉLANGER,.R. Absorption of aqueous inorganic and organic silicon compounds by wheat and their effect on growth and powdery mildew control. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 65, p. 155–161, 2009.
- DANTAS, J. P.; FERREIRA, M. M. M.; MARINHO, F. J. L.; NUNES, M. S. A.; QUEIROZ, M. F.; SANTOS, P. T. A. Efeito do estresse salino sobre a germinação e produção de sementes de caupi. **Agropecuária Técnica**, Areia, v. 24, n. 2, p. 119-130, 2003.
- DATNOFF, L.E.; SEEBOLD, K.W.; CORREA-V, F.J. The use of silicon for integrated disease management: reducing fungicide applications and enhancing host plant resistance. In: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.; KORNDÖRFER, G.H. (Ed.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam, Elsevier, 2001.
- DEBOUBA, M.; GOUIA, H.; SUZUKI, A.; GHORBEL, M. H. NaCl stress effects on enzymes involved in nitrogen assimilation pathway in tomato *Lycopersicon esculentum* seedlings. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 163, n. 12, p. 1247-1258, 2006.
- DELOUCHE, J. C.; BASKIN, C. C. Accelerated aging techniques for predicting the relative storability of seed lots. **Seed Science and Technology**, Zürich, v. 1, n. 3, p. 427-452, 1973.
- 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, C.; MAIA, M. S.; DEUNER, S.; ALMEIDA, A. S.; MENEGHELLO, G. E. Viabilidade e atividade antioxidante de sementes de genótipos de feijão-miúdo submetidos ao estresse salino. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 33, n.4, p. 711-720, 2011.
- DUBEY, R.S.; SHARMA, K.N. Behavior of phosphatases en germinating rice in relation to salt tolerance. Plant. **Physiology & Biochemistry**, Paris, 28: 17-26, 1990.
- EPSTEIN, E. Silicon Annual. Plant physiology. **Plant Molecular Biology**. Washington, v.50, p.641-664, 1999.
- EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceeding of the National Academic Science**, Washington, v. 91, n.1, p. 11-17, 1994.
- FAGERIA, N. K. Salt tolerance of rice cultivars. **Plant and Soil**, The Hague, v. 88, p. 237-243, 1985.
- FAGERIA, N. K.; BARBOSA FILHO, M P.; GHEYI, H. R. Avaliação de cultivares de arroz para tolerância à salinidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 16, n. 5, p. 677-681, 1981.
- FANTI, S.C.; PEREZ, S.C.J.G. A. Efeitos de estresse hídrico e salino na germinação de *Bauhinia forficata* Link. **Revista Ceres**, Viçosa, v.43, n. 249, p. 654-662, 1996.
- FARIA, L. C.; COSTA, J. G. C.; RAVA, C. A.; PELOSO, M. J. D.; MELO, L. C.; CARNEIRO, G. E.S.; SOARES, D. M.; DIAZ, J. L.C; ABREU, A. F. B.; FARIA, J. C.; SARTORATO, A.; SILVA, H. T.; BASSINELLO, P. Z.; ZIMMERMANN, F. J. P. **BRS Requinte: nova cultivar de feijoeiro comum de tipo de grão carioca com retardamento do escurecimento do grão**. Santo Antônio de Goiás, GO. Embrapa Arroz e Feijão, 2003. (Comunicado Técnico, 65).
- FARIA, R. **Efeito da acumulação de silício e a tolerância das plantas de arroz do sequeiro ao déficit hídrico do solo**. 2000. 125F. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Solos, Universidade Federal de Lavras, Viçosa, 2000.
- FAVARIN, J.L; MARINI, J.P. Importância dos micronutrientes para produção de grãos. **Sociedade Nacional de Agricultura**, 2000.
- FAWE, A.; MENZIES, J.G.; CHERIF, M.; BELANGER, R.R. Silicon and disease resistance in dicotyledons. In: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.; KORNDÖRFER, G.H. editors. **Silicon in agriculture**. The Netherlands: Elsevier Science; p. 159–69, 2001.
- FILHO, O. F. L. **Silício e a resistência das plantas ao ataque de fungos patogênicos**. Dourados: EMBRAPA – AGROPECUÁRIA OESTE, 2010. (EMBRAPA – Circular Técnico, 1/6).
- FOLETO, E. L.; HOFFMANN, R.; HOFFMANN, R. S.; PORTUGAL JR., U. L.; JAHN, S. L. Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. **Química Nova**, Santa Maria, v. 28, n. 6, p. 1055-1060, 2005.
- FONSECA, D. A. R. **Desempenho de sementes de trigo recobertas com silicato de alumínio**. 2012. 58p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Sementes) - Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Pelotas, 2012.
- GALINA, S. **Efeito da salinidade na qualidade fisiológica de sementes de arroz e feijão submetidas a estresse salino**, 2004. 19f. Dissertação (Mestrado em Ciências- Fisiologia vegetal), Departamento de Botânica, Pelotas, 2004.

- GARCIA, G. O.; FERREIRA, P. A.; MARTINS-FILHO, S.; SANTOS, C. E. M; Qualidade nutricional e fisiológica de sementes de milho oriundas de plantas submetidas ao estresse salino. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 15, n. 3, p. 281-289, 2007.
- GOMES, A. DA S.; PAULETTO, E.A; FRANZ, A.F.H. Uso e manejo da água em arroz irrigado. In: GOMES, A. da S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A.M. de. (Ed.). **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica; Embrapa Clima Temperado, 2004, p.417-455.
- GONG, H.; ZHU, X.; CHEN, K.; WANG, S. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, Clare, v.169, n.2, p.313-321, 2005.
- GRATTAN, S. R.; ZENG, L.; SHANNON, M. C.; ROBERTS, S. R. Rice is more sensitive to salinity than previously thought. **California Agriculture**, Berkeley, v. 56, p. 189-195, 2002.
- GUÉVEL, M.H.; MENZIES, J.G. & BÉLANGER R.R. Effect of root and foliar applications of soluble silicon on powdery mildew control and growth of wheat plants. **European Journal of Plant Pathology**, Dordrecht, v.119, n.4, p.429-436, 2007.
- GUNES, A.; PILBEAM, D. J.; INAL, A.; COBAN, S. Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress, in growth, antioxidant mechanisms, and lipid peroxidation. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 39, n.13-14, p. 1885-1903, 2008.
- GUO, W.; HOU, Y. L.; WANG, S. G.; ZHU, Y. G. Effect of silicate on the growth and arsenate uptake by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings in solution culture. **Plant and Soil**, The Hague, v.272, n.1/2, p.173-181, 2005.
- GUSTAFSON, D. J.; GIBSON, D. J.; NICKRENT, D. L. Competitive relationships of *Andropogon gerardii* (Big Bluestem) from remnant and restored native populations and select cultivated varieties. **Functional Ecology**. London, v. 18, n. 3, p. 451-457, 2004.
- HARTER, F. S.; BARROS, A. C. S. A. Cálcio e silício na produção e qualidade de sementes de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 33, n. 1, p. 054-060, 2011.
- HATTORI, T.; INANAGA, S.; ARAKI, H.; AN, P.; MORITA, S.; LUXOVÁ, M. Application of silicon enhanced drought tolerance in Sorghum bicolor. **Physiologia Plantarum**, Kobenhavn, v.123, n.4, p.459-466, 2005.
- JÁCOME, A. G.; OLIVEIRA, R. H.; FERNANDES, P. D.; GONÇALVES, A. C. A. Comportamento produtivo de genótipos de algodão sob condições salinas. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 25, n. 1, p. 187-194, 2003.
- JULIATTI, F. C.; PEDROSA, M. G.; LANNA, R. M. Q.; BRITO, S. H.; MELO, B. Influência do silício na redução de podridão de sementes por *Fusarium semitectum* na cultura da soja. **Bioscience Journal**. Uberlândia, v. 20, n. 2, p. 57-63, 2004.
- KENNEDY, R.A.; RUMPHO, M.E.; FOX, T.C. Anaerobic metabolism in plants. **Plant Physiology**, Rockville, v.100, p.1-6, 1992.
- KHATUN, S.; FLOWERS, T. J. The estimation of pollen viability in rice. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.46, p.151-154, 1995.
- KIM, Y.Y.; YANG, Y.Y.; LEE, Y. Pb and Cd uptake in rice roots. **Physiologia Plantarum**, Kobenhavn, v. 116, n. 3, p. 368–372, 2002.

- KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. E. Adubação com silício: uma alternativa no controle de doenças de cana-de-açúcar e do arroz. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 70, p. 1-5, jun. 1995.
- KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. Silicatos de Cálcio e Magnésio na Agricultura. 2.ed. Uberlândia, GPSi/ICIAG/UFU, 2002. 24 p. (**Boletim Técnico, 1**).
- LEITE, R. F. C.; SCHUCH, L. O. B; AMARAL, A. S.; TAVARES, L. C. Rendimento e qualidade de sementes de arroz irrigado em função da adubação com boro. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 33, n.4, p.785-791, 2011.
- LIANG, Y. C., SHEN, Q. R. MA, T. S. Effects of silicon on salinity tolerance of two barley cultivars. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v.19, n.1, p.173-183, 1996.
- LIANG, Y.C. Effects of Si on leaf ultrastructure, chlorophyll content and photosynthetic activity in barley under salt stress. **Pedosphere**, Beijing, v.8, p.289–296, 1998.
- LIMA FILHO, O. F.; TSAI, S. M. **Crescimento e produção do trigo e da aveia branca suplementados com silício**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento Embrapa Agropecuária Oeste. 2007. 34 pp.
- LIMA, B. A. D. **Uso da argila silicatada como fonte de silício na produção de sementes de cereais**. 2010. 40f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Semente) - Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Pelotas, 2010.
- LIMA, L. A. Efeitos de sais no solo e na planta. In: GHEYI, H. R.; QUEIROZ, J. E.; MEDEIROS, J. M. (Ed.) **Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada**. Campina Grande: UFPB, SBEA, 1997, p.113-136.
- LIMA, M. A.; CASTRO, V. F.; VIDAL, J. B.; FILHO-ENÉAS, J. Aplicação de silício em milho e feijão-de-corda sob estresse salino. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.42, n.2, p. 398-403, 2011.
- LIMA, M. G. S. **Detecção de genes e expressão enzimática em cultivares de arroz (*Oryza sativa L.*) crescidas sob estresse salino**. 2008. 93f. Tese (Doutorado em Ciências) - Fisiologia vegetal, Departamento de Botânica, Pelotas, 2008.
- LIMA, M. G. S.; LOPES, N. F.; MORAES, D. M.; ABREU, C. M. Qualidade fisiológica de sementes de arroz submetidas a estresse salino. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 27, n. 1, p. 54-61, 2005.
- LOPES, A. S. **Manual de fertilidade do solo**. Traduzido por Alfredo Scheid Lopes. São Paulo: ANDA/Potafós, 1989.
- MA, J. F.; GOTO, S.; TAMAI, K.; ICHII, M. Role of root hairs and lateral roots in silicon uptake by rice. **Plant Physiology**, Washington, v. 127, n. 4, p. 1773–1780, 2001a.
- MA, J.F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plants, In: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H. & KORNDÖRFER, G.H. (Eds). **Silicon in Agriculture**. The Netherland, Elsevier Science, 2001b, p.17-39.
- MA, J.F.; TAKAHASHI, E. Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. **Elsevier Science**, Amsterdam, 2002.
- MA, J.F.; YAMAJI, N. Functions and transport of silicon in plants. **Cellular and Molecular Life Sciences**, Basel, v.65, p.3049-3057, 2008.

- MA, J.F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, London, v.11, p.342-397, 2006.
- MAAS, E.V.; HOFFMAN, G.J. Crop salt tolerance - current assessment. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 103, p. 115-134, 1977
- MAAS, E.V.; POSS, J.A.; HOFFMAN, G.J. Salinity sensitivity of sorghum at three growth stages. **Irrigation Science**, Berlin, v.7, n.1, p.1-11, 1986.
- MACHADO, A. A.; CONCEIÇÃO, A. R. **Sistema de análise estatística para Windows. Winstat. Versão 1.0.** UFPel, 2003.
- MACHADO, M.O.; TERRES, A.L. Tolerância de genótipos à salinidade do solo - safra 1994/1995. Reunião da Cultura do Arroz Irrigado, 21, 1995, Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre: IRGA, 1995. p. 48-50.
- MACHADO, M.O.; TERRES, A.L.; FAGUNDES, P.R.R. Melhoramento genético do arroz irrigado na Embrapa Clima Temperado: 8. Tolerância de genótipos à salinidade da água de irrigação, do início da diferenciação da panícula à maturidade-safras 1997/98 e 1998/99. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 1, Pelotas, 1999. **Anais...** Pelotas, Embrapa Clima Temperado, 1999. p. 103-106.
- MAGALHÃES JÚNIOR, A. M.; GOMES, A. S.; SANTOS, A. B. **Sistema de cultivo de arroz irrigado no Brasil.** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2004, 270p.
- MALAVOLTA, E. **Manual de Nutrição Mineral de Plantas.** 1ed. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006. 638 p.
- MALAVOLTA, E. O Futuro da Nutrição de Plantas Tendo em Vista Aspectos Agronômicos, Econômicos e Ambientais. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 121, 2008.
- MALONE, G.; ZIMMER, P. D.; CASTRO, M. A. S.; CARVALHO, I.; MENEGHELLO, G. E.; PESKE, S. T. Identificação do estádio adequado para realização de análises isoenzimáticas na caracterização de cultivares de arroz. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 28, n. 2, p. 193-200, 2006.
- MALONE, G.; ZIMMER, P. D; ENEGHELLO, G. E.; CASTRO, M. A. S.; PESKE, S. T. Expressão Diferencial de Isoenzimas durante o processo de Germinação de Sementes de Arroz em grandes Profundidades de Semeadura. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 29, n. 1, p. 61-67, 2007.
- MARCHEZAN, E.; VILLA, S. C. C.; MARZARI, V.; KORNDÖFER, G. H.; SANTOS, F. M.de. Aplicação de silício irrigado em arroz: efeito nos componentes da produção. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 20, n. 3, p. 125-131, 2004.
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants.2.ed. London: **Academic**, 1995. 889 p.
- MATICHENKOV, V. V.; BOCHARNIKOVA, E. A.; AMMOSOVA, J. M. The influence of silicone fertilizers on the plants and soils. **Agrokhimiya**, Moscow, v. 12, p.30-37, 2001.
- MATICHENKOV, V. V.; KOSOBRUKHOV, A. A.; SHABNOVA, N. I.; BOCHARNIKOVA, E. A. Plant response to silicon fertilizers under salt stress. **Agrokhimiya**, Moscow, v.10, p. 59-63, 2005.
- MAUAD, M.; GRASSI FILHO, H.; CRUSCIOL, C. A. C.; CORRÊA, J. C. 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**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 867-873, 2003.

MENGEL K.; KIRKBY, EA. Principles of Plant Nutrition. Worblaufen-Bern, Switzerland: **International Potash Institute**, 1987.

MENZIES, J.; BOWEN, P.; EHRET, D.; GLASS, A.D.M. Foliar applications of potassium silicate reduce severity of powdery mildew on cucumber, muskmelon, and zucchini squash. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v.117, p.902-905, 1992.

MIELEZRSKI, F. SCHUCH, L.O.B.; PESKE, S.T.; PANZZO, L.E.; CARVALHO, R.R.; ZUCHI, J. Desempenho em campo de plantas isoladas de arroz híbrido em função da qualidade fisiológica das sementes. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 31, n.3, p.87-95, 2009.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of Salinity Tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, New York, v. 59, n.01, p. 651-681, 2008.

NAKAGAWA, J. Testes de vigor baseados no desempenho das plântulas. In: KRZYZANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA-NETO, J. B. Vigor de sementes: conceitos e testes. Londrina: **ABRATES**, Cap. 2, p. 9-13. 1999.

NUNES, J. C. Tratamento de semente - qualidade e fatores que podem afetar a sua performance em laboratório. **Syngenta Proteção de Cultivos Ltda**. 2005. 16p.

OLIVEIRA, M. **Gênese, classificação e extensão de solos afetados por sais**. In: GHEYI, H.R.; QUEIROZ, J.E.; MEDEIROS, J.F. de (Ed.). Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada. Campina Grande: UFPB; SBEA, 1997. p.1-35.

OLIVEIRA, S. **Silício oriundo da cinza de casca de arroz carbonizada como promotor do rendimento e da qualidade fisiológica de sementes de soja**, 2013. 69f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Sementes) - Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Pelotas, 2013.

PEIXOTO, E. M. A. **Química nova na escola- Silício**, v.14, USP-SP, 2001.

PEREIRA, H. S.; KONDÖRFER, G. H.; VIDAL, A. A.; CAMARGO, M. S. Fontes de silício para a cultura do arroz. **Scientia Agricola**, Piracicaba v. 16, n. 5, p. 522-528, 2004.

PERSHIN, B. M.; PERSHIMA, A. N.; EGORINA, L. M. Silicon and rice production in the Primorskii region. **Agrikhimiya**, Moskow, v.10, p. 68-74, 1995.

PESKE, S. T.; BARROS, A. C. S. A.; SCHUCH, L. O. B. Produção de sementes. IN.: PESKE, S.T.; VILLELA, F.A.; MENEGHELLO, G.E. (Orgs.) **Sementes: Fundamentos Científicos e Tecnológicos**. 3. ed. Pelotas: Editora Universitária/UFPel, 2012. p. 13-104.

POPINIGIS, F. **Fisiologia da semente**. Brasília: AGIPLAN, 1977. 289p.

POUEY, M.T.F. **Beneficiamentos da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. 320p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

RAFI, M. M.; EPSTEIN, E.; FALK. R. H. Silicon deprivation causes physical abnormalities in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 151, n. 4, p.497-501, 1997.

- RAIJ, B. VAN. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres, POTAFO'S, 1991. 343 p.
- RAINS, D. W.; EPSTEIN, E.; ZASOSKI, R. J.; ASLAM, M. Active silicon uptake by wheat. **Plant and Soil**, The Hague, v. 280, n. 1, p.223-228, 2006.
- RAMIREZ, H.; CALDERON, A.; ROCCA, W. Técnicas moleculares para evaluar y mejorar el germoplasma vegetal. In: ROCCA, W.; MROGINSKI, L. (Ed). **Cultivo de Tejidos en la Agricultura: Fundamentos y aplicaciones**. Cali: CIAT, 1991, p. 825-856.
- RENGASAMY, P. World salinization with emphasis on Australia. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.57, p.1017-1023, 2006.
- RHOADES, J.D.; KANDIAH, A.; MASHALI, A.M. **Uso de águas salinas para produção agrícola**. Campina Grande: UFPB, 2000. 117p.
- ROMERO-ARANDA, M. R.; JURADO, O.; CUARTERO, J. Silicon alleviates the deleterious salt effects on tomato plant growth by improving plant water status. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v.163, n.8, p.847-855, 2006.
- SANGSTER, A.G.; HODSON, M.J.; TUBB, H.J. Silicon deposition in higher plants. In: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.; KORNDÖRFER, G.H. editors. **Silicon in agriculture**, The Netherlands, Elsevier Science, 2001. p. 85–113.
- SANTOS, D. M. M. **Nutrição Mineral**. Apostila de Fisiologia Vegetal. UNESP. Jaboticabal, 13p. 2004.
- SANTOS, F. C.; OLIVEIRA, J. A.; VON PINHO, E. V. R.; GUIMARÃES, R. M.; VIEIRA, A. R. Tratamento químico, revestimento e armazenamento de sementes de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 32, n.3, p. 69-78, 2010.
- 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, 1997.
- SCANDALIOS, J. G. Genetic control of multiple molecular forms of enzymes in plants: a review. **Biochemical Genetics**, New York, v.3, p. 37-39, 1969.
- SHU, L. Z.; LIU, Y. H. Effects of silicon on growth of maize seedlings under salt stress. **Journal of Agro-Environment Science**, China, v.20, p.38–40. 2001.
- SILVA, S. M. S.; ALVES, A. N.; GHEYI, H. R.; BELTRAO, N. E. M.; SEVERINO, L. S.; SOARES, F. A. L. Desenvolvimento e produção de duas cultivares de mamoneira sob estresse salino. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.12, n.4, p. 335-342, 2008.
- SINGH, A. K.; SINGH, R.; SINGH, K. Growth, yield and economics of rice (*Oryza sativa*) as influenced by level and time of silicon application. **Indian Journal of Agronomy**, New Delhi, v. 50, n. 3, p. 190-193, 2005.
- SOARES, P.C.; SOARES, A.A.; MORAIS, O.P. de; CASTRO, E. da M.; RANGEL, P.H.N.; CORNÉLIO, V.M. de O.; SOUZA, M.A. de. Cultivares de arroz de terras altas e de várzeas recomendadas para Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.25, p.25-34, 2004.
- SOUSA, V. B. F. de. Aplicação foliar de silicato de potássio na soja: absorção de Si, severidade da ferrugem asiática e produtividade. In: Simpósio Brasileiro sobre Silício na Agricultura, 4, 2007, Botucatu. **Resumos...** Botucatu: FEPAF, 2007. p.102-105.

- STAMATAKIS, A.; SAVVAS, D.; PAPADANTONAKIS, N.; LYDAKIS-SIMANTIRIS N.; KEFALAS, P. Effects of silicon and salinity on fruit yield and quality of tomato grown hydroponically. **Acta Horticulturae**, Holanda, v.609, p.141–149, 2003.
- STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E., NASCIMENTO, P.C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E. PINTO, L.F.S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2.ed. Porto Alegre, EMATER/RSASCAR, p. 222. 2008.
- SULTANA, N.; IKEDA, T.; ITOH, R. Effect of NaCl salinity on photosynthesis and dry matter accumulation in developing rice grains. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v.42, p.211-220, 1999.
- TAHIR, M. A.; RAHMATULLAH; AZIZ, T.; ASHRAF, M.; KANWAL, S.; MAQSOOS, M. A. Beneficial effects of silicon in wheat (*Triticum aestivum* L.) under salinity stress. **Pakistan Journal of Botany**, Pakistan, v. 5, n.38, p. 1715-1722, 2006.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**, 3<sup>a</sup>. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p
- TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of sílica. In: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHI, R. Science of the rice plant: physiology. Tokyo: **Food and Agriculture Policy Research Center**, p. 420-433, 1995.
- TAMAI, K.; MA, J. F. Characterization of silicon uptake by rice roots. **New Phytologist**, Sheffield, v. 158, p. 431-436, 2003.
- TEKRONY, D. M.; EGLI, D. B.; BALLES, J.; TOMES, L. J.; STUCKEY, R. E. Effect of date of harvest maturity on soybean seed quality and *Phomopsis* sp. seed infection. **Crop Science**, Madison. v. 24, n. 1, p. 189-93. 1984.
- TESTER, M.; DAVENPORT, R. Na<sup>+</sup> tolerance and Na<sup>+</sup> transport in higher plants. **Annals of Botany**, Oxford, v.91, n.5, p.503- 527, 2003.
- TOLEDO, M. Z.; GARCIA, R. A.; MERLINA, A; FERNANDES, D. M. Seed germination and seedling development of white oat affected by silicon and phosphorus fertilization. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 68, n. 1, p. 18-23, 2011.
- TUNES, L. M. **Atributos fisiológicos de qualidade de sementes de cevada sobre diferentes épocas de colheita e durante o armazenamento**. 2009. 102p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Sementes) - Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Pelotas, 2009.
- TUNES, L. M.; BADINELLI, P. G.; BARROS, A. C. S. A.; CASTRO, M. A. S. Alterações fisiológicas e enzimáticas em sementes de cevada sob diferentes condições de armazenamento. **Magistra**, Cruz das Almas, v. 21, n. 3, p. 154-164, 2009.
- TUNES, L. M; PEDROSO, D. C.; MENEGHELLO, G. E.; CASTRO, M. A. S.; BARROS, A. C. S. A.; BADINELLI, P. G.; MUNIZ, M. F. B. Perfil enzimático em sementes de cevada em resposta a diferentes concentrações salinas. **Interciênciac**, Venezuela, v. 35, n.5, p.369-373, 2010.
- USDA - **UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE**. Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/psdonline/psdQuery.aspx>>. Acesso em: 27 mar 2013.
- VAN NGUYEN, N.; FERRERO, A. Meeting the challenges of global rice production. **Paddy and Water Environment**, Japão, v.4, p.1-9, 2006.
- VIEIRA, A. R.; OLIVEIRA, J. A.; GUIMARÃES, R. M.; CARVALHO, M. L. M.; PEREIRA, E. M.; CARVALHO, B. O. Qualidade de sementes de arroz irrigado

- produzidas com diferentes doses de silício. **Revista Brasileira de sementes**, Londrina, v.33, n.3, p. 490-500, 2011.
- VIEIRA, E. S. N.; VON PINHO, E. V. R.; CARVALHO, M. G. G.; SILVA, P. A. Caracterização de cultivares de soja por descritores morfológicos e marcadores bioquímicos de proteínas e isoenzimas. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 31, p. 86-94, 2009.
- VIEIRA, R.D.; CARVALHO, N.M. **Testes de vigor em sementes**. Jaboticabal: FUNEP, 1994. 164p.
- WARAICH, E. A; AMAD, R.; ASHRAF, M.Y; SAIFULLAH; AHMAD, M. Improving agricultural water use efficiency by nutrient management. **Acta Agriculturae Scandinavica – Soil & Plant Science**, v.61, n.4, p. 291-304, 2011.
- YOSHIDA, S. **Fundamentals of rice crop science**. Los Baños, IRRI, 1981. 269p.
- ZANÃO JÚNIOR, L.A.; RODRIGUES, F.A.; FONTES, R.L.F.; KORNDÖRFER, G.H.; NEVES, J.C.L. Rice resistance to brown spot mediated by silicon and its interaction with manganese. **Journal of Phytopathology**, St. Paul, v.157, p.73-78, 2009.
- ZHANG, M.; MAEDA, Y.; FUTIHATA, Y.; NORAMURA, Y.I; ESASHI, Y. Mechanism of seed deterioration to volatile compounds evoked by dry seeds themselves. **Seed Science Research**, Cambridge, v.4. n.1, p.49-56, 1994.
- ZHU, Z. J.; WEI, G. Q.; LI, J.; QIAN, Q. Q.; YU, J. Q. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). **Plant Science**, Clare, v.167, p.527-533, 2004.