

SÓDIO E SILÍCIO NA PRODUÇÃO DE MUDAS DO ABACAXIZEIRO

**JÉSSICA TAYNARA DA SILVA MARTINS**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO -  
UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
FEVEREIRO – 2024

# SÓDIO E SILÍCIO NA PRODUÇÃO DE MUDAS DO ABACAXIZEIRO

**JÉSSICA TAYNARA DA SILVA MARTINS**

Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutora em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Almy Junior Cordeiro de Carvalho

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ  
FEVEREIRO - 2024

### FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

M386

Martins, Jéssica Taynara da Silva.

SÓDIO E SILÍCIO NA PRODUÇÃO DE MUDAS DO ABACAXIZEIRO / Jéssica Taynara da Silva Martins. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2024.

110 f. : il.

Inclui bibliografia.

Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2024.

Orientador: Almy Junior Cordeiro de Carvalho.

1. *Ananas comosus* (L.). 2. 'Perola' . 3. 'BRS Imperial'. 4. salinidade. 5. suplementação com Si. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 630

# SÓDIO E SILÍCIO NA PRODUÇÃO DE MUDAS DO ABACAXIZEIRO

**JÉSSICA TAYNARA DA SILVA MARTINS**

Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutora em Produção Vegetal.

Aprovada em: 27 de fevereiro de 2024

Comissão examinadora:

---

Prof. Dr. Cândido Ferreira de Oliveira Neto (D. Sc., Ciências Agrárias) - UFRA

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Marta Simone Mendonça Freitas (D. Sc., Produção Vegetal) - UENF

---

Dr. Rômulo André Beltrame (D. Sc., Produção Vegetal) - UENF

---

Prof. Dr. Almy Junior Cordeiro de Carvalho (D. Sc., Produção Vegetal) - UENF  
(Orientador)

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais Domingos Martins e Joelma da Silva, por terem me concedido a vida e todo amor, educação, apoio e carinho; e aos meus irmãos Jhonatan Martins e Jefté Martins pelo companheirismo, admiração e por acreditarem na minha capacidade.

## AGRADECIMENTOS

Acima de tudo e de todos, agradeço, primeiramente, a Deus por meio de Jesus Cristo, por sua eterna benevolência, misericórdia, graça, amor e amparo, sempre me ajudando, dando força e sabedoria para vencer todos os obstáculos;

À toda minha família, em especial aos meus pais, Joelma e Domingos, que são meus alicerces, aos meus irmãos Jhonatan e Jefté, agradeço toda a força, paciência, amor e carinho demonstrado ao longo de suas vidas por mim, acima de tudo pelo apoio incondicional ao longo da minha graduação e, mesmo de longe, na pós-graduação. Agradeço aos meus avós, tias, tios, primos e primas que sempre torceram pelo meu sucesso;

Ao meu companheiro, colega de profissão, amigo e namorado, Hércules dos Santos, que tive o enorme prazer de conhecer durante meu doutorado, muito obrigada meu amor, por todo auxílio emocional, companheirismo, força e motivação para alcançar meus objetivos, além da sua grande contribuição nas atividades dos experimentos e auxílio nas análises estatísticas;

Agradeço imensamente às minhas amigas, irmãs de coração, colegas de profissão, e minha segunda família durante meu mestrado e doutorado, Thays Costa e Liliane Machado por todo suporte emocional e intelectual, e pela ajuda braçal durante todos os experimentos. Foram seis anos dividindo república e compartilhando a vida. Sem vocês eu não teria conseguido chegar até aqui!

Agradeço ao meu amigo Elton Ferreira que também me ajudou com atividades dos experimentos e foi um grande parceiro durante esses anos de doutorado;

Aos colegas do Laboratório LFIT que me ajudaram durante a execução dos experimentos (Alex, Julia, Mariana, Joseph, Davi, Chiara, Henrique);

Ao técnico do Laboratório LFIT, sala 116, setor de horticultura Detony, que sempre esteve à disposição para me auxiliar nas atividades do projeto de pesquisa;

À técnica do Laboratório de Microbiologia do Solo – LSOL, Andréia, pelo auxílio e suporte nas análises de sódio;

Ao produtor e proprietário da Fazenda Taquarussu Heraldo, na qual, foram coletadas as mudas para realização desse projeto;

Aos colegas que, juntos, fundamos o Núcleo de Estudos em Produção Vegetal, uma grande contribuição para o programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal e, também, uma grande contribuição para minha formação como profissional;

A todos os colegas que fiz na Pós-graduação e em Campos dos Goytacazes, em especial à: Rebeca e sua família, aos colegas: Debora, Assistony, Joameson, Raymyson, Rakiely, Rosenilda.

Ao meu orientador e professor Dr. Almy Junior Cordeiro de Carvalho, pelas orientações, ensinamentos e conselhos durante o curso de Pós-Graduação e, também, por toda paciência, compreensão e flexibilidade.

À professora Dra. Marta Simone Freitas, pela disponibilização do Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas da UENF para realização das análises de tecido vegetal, além de suas orientações e auxílio durante as análises.

Ao meu grande amigo, ex orientador e maior incentivador acadêmico, Dr. Cândido Ferreira de Oliveira Neto, pela disponibilização do Laboratório de Fisiologia Vegetal da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) para realização das análises bioquímicas;

Aos membros da minha banca de projeto, qualificação e defesa de tese, muito obrigada pelas contribuições que enriqueceram meu trabalho;

À nossa coordenadora da Pós-graduação em Produção Vegetal da UENF Profa. Dra. Daniela de Oliveira, que sempre buscou melhorar o programa, ajudar e apoiar os alunos.

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) e ao programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal pela oportunidade de realizar uma qualificação profissional a nível de doutor;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - FAPERJ, pela concessão das bolsas de estudos e de recursos de projetos aprovados;

E à todas as pessoas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho, deixo o meu sincero reconhecimento e agradecimento.

## SÚMARIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>VIII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>4</b>
2.1 A CULTURA DO ABACAXIZEIRO.....	4
2.1.1 Origem, características e condições edafoclimáticas .....	4
2.1.2 Ciclo, propagação e produção de mudas .....	5
2.1.3 Cultivares.....	7
2.1.4 Produção e importância econômica.....	9
2.2 SALINIDADE .....	11
2.2.1 Definição e causas da salinização.....	11
2.2.2 Efeito da salinidade nas plantas.....	12
2.2.3 Silício e seu efeito como atenuador do estresse salino.....	15
<b>3 TRABALHOS.....</b>	<b>19</b>
3.1 RESPOSTAS BIOMÉTRICAS E BIOQUÍMICAS DE MUDAS DE ABACAXIZEIRO CULTIVADAS EM CONDIÇÕES SALINAS .....	19
3.2 BIOMETRIA, ATIVIDADE BIOQUÍMICA E COMPOSIÇÃO NUTRICIONAL EM ABACAXIZEIRO 'BRS IMPERIAL' CULTIVADO EM CONDIÇÕES SALINAS COM SILÍCIO .....	45
<b>4 CONCLUSÕES .....</b>	<b>78</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>80</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>94</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>97</b>

## RESUMO

MARTINS, Jéssica Taynara da Silva; D.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; fevereiro de 2024; Sódio e silício na produção de mudas do abacaxizeiro; Orientador: D.Sc. Almy Junior Cordeiro de Carvalho.

O abacaxi *Ananas comosus* (L.) Merrill, é a terceira fruta de maior produção no Brasil, ficando atrás apenas do cultivo de citros e banana. Apresenta grande aceitação no mercado nacional e internacional devido às suas características sensoriais. A salinidade pode acarretar estresse osmótico pela absorção dos íons, tais como, Na<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup>. Além disso, pode promover alterações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas nas plantas. Para isso, a planta responde às condições salinas por meio de várias estratégias. A adaptação osmótica é um mecanismo importante para sustentar o turgor celular que, em particular, mantém o crescimento, a produtividade e o rendimento. A planta sintetiza vários osmólitos, como: prolina, glicina, betaína e açúcares solúveis. Diante deste cenário, muitos estudos vêm apontando o silício (Si) como um elemento capaz de modular o metabolismo vegetal, funcionando como elemento não essencial, conferindo claramente benefícios às plantas, principalmente, quando expostas às condições adversas, como ambientes salinos. O abacaxizeiro é uma cultura alternativa, principalmente em regiões áridas e semiáridas, estando sujeito ao cultivo em locais propícios à ocorrência de acúmulo de sais. Porém, existem poucos estudos com a cultura que englobem avaliação do crescimento e metabolismo em condições salinas e, principalmente, atrelados ao uso do Si. Nesse sentido, foram conduzidos dois experimentos em casa de vegetação em Campos dos Goytacazes (latitude = 21°19'23" S, longitude = 41°10'40" W). O primeiro experimento teve como objetivo avaliar o efeito da salinidade nas respostas biométricas e bioquímicas em mudas de abacaxizeiro (Pérola e BRS Imperial). Foi adotado o delineamento de blocos ao acaso, no esquema fatorial 2x5, sendo duas cultivares (Pérola e BRS Imperial) e cinco concentrações de NaCl (0, 40, 80, 120 e 160 mM) adicionadas na solução nutritiva. Após 40 dias de tratamento, avaliou-se o comprimento da parte aérea e raiz, e de suas massas fresca e seca; diâmetro do caule; número de folhas; área foliar; volume total; área superficial e diâmetro médio radicular; e substâncias bioquímicas. As avaliações biométricas indicaram que o NaCl influenciou as médias

do comprimento radicular para a 'BRS Imperial', com elevação dos valores até a dose estimada em 59,31 mM. Nas outras características, verificaram-se apenas diferenças entre cultivares, no qual a 'Pérola' apresentou maior comprimento e massa fresca da parte aérea, área foliar, diâmetro do caule e diâmetro médio radicular. A 'BRS Imperial' apresentou médias superiores em massa seca da parte aérea, número de folhas, massa fresca e seca radicular, área superficial e volume total radicular. A 'BRS Imperial' demonstrou adaptações promissoras frente à salinidade, por meio de alterações morfológicas no sistema radicular, enquanto a 'Pérola' respondeu com maior produção de substâncias osmorreguladoras, como glicina e prolina. O segundo experimento objetivou avaliar a biometria, atividade bioquímica e composição nutricional em mudas de abacaxizeiro 'BRS Imperial' cultivado em condições salinas com silício. Foi adotado o delineamento de blocos ao acaso, no esquema fatorial 3x2, com três concentrações de NaCl (0, 1,5 e 3,5 mS.cm<sup>-1</sup>) e duas concentrações de silício (0 e 1,5 mM) adicionadas na solução nutritiva. Após 126 dias de tratamento, avaliou-se o comprimento da parte aérea e raiz, e suas massas fresca e seca; diâmetro do caule; número de folhas; área foliar; volume total; área superficial e diâmetro médio radicular; substâncias bioquímicas e teor de N, Si, Na, e Cl. Os resultados revelaram que as variáveis biométricas relacionadas à parte aérea, como comprimento, massa fresca e seca, e área foliar, foram significativamente reduzidas em plantas expostas à salinidade, enquanto a adição de Si não teve um efeito significativo. Em contrapartida, a aplicação de Si promoveu um aumento no comprimento radicular, área superficial e volume total das raízes em algumas condições. As análises bioquímicas mostraram que o Si contribuiu para o aumento dos carboidratos solúveis totais e glicina na parte aérea. No entanto, a adição de Si não incrementou o teor de N, nem reduziu consistentemente os níveis de Na nas plantas expostas à salinidade. Para o teor Cl, o Si promoveu efeitos variáveis, com redução nas raízes na condição de 5,5 mS.cm<sup>-1</sup>. Conseqüentemente, os efeitos adversos da salinidade causada pelo NaCl nas mudas de abacaxizeiro 'BRS Imperial' foram, principalmente, atribuídos ao excesso de sódio.

## ABSTRACT

MARTINS, Jéssica Taynara da Silva; D.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; February 2024; Sodium and silicon in the production of pineapple seedlings; Advisor: D.Sc. Almy Junior Cordeiro de Carvalho.

The pineapple *Ananas comosus* (L.) Merrill, is the third most produced fruit in Brazil, trailing only citrus and banana cultivation. It enjoys significant acceptance in both the national and international markets due to its sensory characteristics. Salinity can cause osmotic stress due to the absorption of ions such as Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup>. Additionally, it can induce morphological, physiological, and biochemical alterations in plants. In response to saline conditions, plants employ various strategies. Osmotic adaptation is an important mechanism to sustain cellular turgor, which particularly supports growth, productivity, and yield. The plant synthesizes various osmolytes, such as proline, glycine betaine, and soluble sugars. In this context, many studies have been pointing to silicon (Si) as an element capable of modulating plant metabolism, functioning as a non-essential nutrient and an element that clearly confers benefits to plants, especially when exposed to adverse conditions, such as saline environments. The pineapple plant is an alternative crop, especially in arid and semi-arid regions, being subject to cultivation in locations prone to salt accumulation. However, there are few studies on the crop that encompass the evaluation of growth and metabolism under saline conditions, primarily linked to the use of Si. In this sense, two greenhouse experiments were conducted in Campos dos Goytacazes (latitude = 21°19'23" S, longitude = 41°10'40" W). The first experiment aimed to evaluate the effect of salinity on the biometric and biochemical responses in pineapple seedlings (Pérola and BRS Imperial). A randomized complete block design was adopted in a 2x5 factorial scheme, with two cultivars (Pérola and BRS Imperial) and five concentrations of NaCl (0, 40, 80, 120, and 160 mM) added to the nutrient solution. After 40 days of treatment, were evaluated shoot and root length and their fresh and dry matter; stem diameter; number of leaves; leaf área; total root volume and surface área; average root diameter as well as biochemical substances. The biometric evaluations indicated that NaCl influenced root length means for 'BRS Imperial', with values increasing up to the estimated dose of 59.31 mM. In other characteristics, differences were observed only between

cultivars, with 'Pérola' exhibiting greater shoot length and fresh matter, leaf area, stem diameter, and average root diameter. The 'BRS Imperial' exhibited higher means in shoot dry matter, number of leaves, fresh and dry root matter, surface area, and total root volume. The 'BRS Imperial' demonstrated promising adaptations to salinity through morphological changes in the root system, while the 'Pérola' responded with higher production of osmoregulatory substances, such as glycine and proline. The second experiment aimed to evaluate the biometry, biochemical activity, and nutritional composition in seedlings of 'BRS Imperial' pineapple cultivated under saline conditions with silicon. The randomized block design was adopted, following a 3x2 factorial scheme, with three concentrations of NaCl (0, 1.5, and 3.5 mS.cm<sup>-1</sup>) and two concentrations of silicon (0 and 1.5 mM) added to the nutrient solution. After 126 days of treatment, were evaluated shoot and root length and their fresh and dry matter; stem diameter; number of leaves; leaf área; total root volume and surface área; average root diameter, biochemical substances, and N, Si, Na, and Cl content. The results revealed that biometric variables related to the shoot, such as length, fresh and dry matter, and leaf area, were significantly reduced in plants exposed to salinity, while Si addition did not have a significant effect. Conversely, Si application promoted an increase in root length, surface area, and total volume of roots under some conditions. Biochemical analyses showed that Si contributed to the increase in total soluble carbohydrates and glycine in the shoot. However, Si addition did not increase N content, nor consistently reduce Na levels in plants exposed to salinity, for the Cl content, Si promoted variable effects, with a reduction in the roots in the 5.5 mS.cm<sup>-1</sup> condition. Consequently, the adverse effects of salinity caused by NaCl on 'BRS Imperial' pineapple seedlings were mainly attributed to excess sodium.

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca globalmente na fruticultura, sendo um dos maiores produtores mundiais de frutas tropicais. No âmbito deste cenário, o abacaxi *Ananas comosus* (L.) Merrill emerge como a terceira fruta de maior produção no país, ficando somente atrás dos cultivos de citros e banana. A relevância do abacaxi na agricultura brasileira é notável, exercendo um impacto significativo na fonte de renda de pequenos e médios produtores em diversas regiões. Além de sua importância econômica, o abacaxi é amplamente cultivado em território brasileiro, apresentando um considerável potencial de crescimento socioeconômico, tanto em termos de expansão territorial, quanto de desenvolvimento da cadeia produtiva. Sua aceitação expressiva nos mercados nacional e internacional é respaldada por suas características sensoriais distintas (Da Mata, 2023).

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) referentes a 2022, o Brasil ocupa a quarta posição mundial na produção de abacaxi, com uma produção total de 2,3 milhões de toneladas. Esse expressivo rendimento é obtido em uma área de, aproximadamente, 64 mil hectares, resultando em uma produtividade média de cerca de 24 mil frutos por hectare.

Os maiores produtores brasileiros de abacaxi são os estados do Pará e Paraíba. O estado do Rio de Janeiro se destaca como o quarto produtor brasileiro e segundo maior produtor da Região Sudeste (IBGE, 2022). No ano de 2018, o estado do Rio de Janeiro representou 8% da produção nacional, com produção de 142 milhões de frutos, em uma área de, aproximadamente, 4.550 hectares, onde a produção de abacaxi se concentra na Região Norte Fluminense, sendo que, nos municípios de Campos dos Goytacazes, São Francisco do Itabapoana e São João da Barra, a cultura apresenta grande importância econômica e social (IBGE, 2019).

A crescente demanda por suprimentos alimentares ao longo do tempo exerce um papel marcante na expansão da atividade agrícola, notadamente em áreas caracterizadas pela degradação do solo, especialmente decorrente da salinidade. A salinização do solo é influenciada por diversos fatores, como as mudanças climáticas e atividades antropogênicas desenfreadas, impulsionadas pelo aumento constante da população humana, além de fatores como chuvas escassas, elevada evapotranspiração, temperaturas elevadas e gestão inadequada da água,

contribuindo para o aumento da salinidade do solo em regiões áridas e semiáridas globais. Diante deste cenário, torna-se imperativo avaliar o impacto do estresse salino no desenvolvimento das culturas e elucidar os mecanismos de resposta das plantas à salinidade (Pedrotti et al., 2015; Kouadio et al., 2018; Denaxa et al., 2022).

A salinidade pode causar deficiência hídrica por diminuir o potencial da água no solo e pela absorção excessiva de íons, como sódio ( $\text{Na}^+$ ) e cloro ( $\text{Cl}^-$ ), induzindo uma série de respostas fisiológicas e bioquímicas adversas em plantas, incluindo estresse osmótico, toxicidade iônica, perturbação da turgescência, desequilíbrio metabólico, desorganização da estrutura da membrana e a geração exacerbada de espécies reativas de oxigênio (ERO) (El Ghazali, 2020). Esses eventos impactam negativamente a integridade das membranas biológicas, causam danos oxidativos aos componentes celulares e interferem nos processos metabólicos celulares, resultando na redução do crescimento e rendimento das culturas (Chen et al., 2017; Kumar et al., 2017; Islam et al., 2021).

Diante de condições adversas de estresse abiótico, as plantas elaboraram um mecanismo distintivo, englobando modificações morfofisiológicas, celulares e anatômicas, com a finalidade de atenuar os efeitos do estresse salino (Saud et al., 2014; Khan et al., 2019). O acúmulo de muitos solutos compatíveis (prolina livre, glicina betaína, sacarose etc.) sob salinidade nas plantas é uma resposta adaptativa para aumentar sua tolerância ao estresse. Essas substâncias se acumulam para ajustar a quantidade de água na célula, evitando perdas excessivas pelo controle do potencial osmótico (Per et al., 2017; Arif et al., 2020).

O silício (Si) tem sido apontado como elemento não essencial, mas confere claros benefícios às plantas, melhorando o crescimento, o rendimento e a qualidade das culturas, a fotossíntese e a fixação de nitrogênio, particularmente em resposta aos estresses abióticos e bióticos (Coskun et al., 2016;). O Si está bem documentado como um elemento para fortalecer as paredes celulares e, em condições salinas, alivia os efeitos tóxicos induzidos por excesso de  $\text{Na}^+$  nos compartimentos celulares e pode aumentar a capacidade do sistema antioxidante (indução enzimática) em diversas espécies de plantas (Zhu e Gongo 2014; Pirasteh -Anosheh et al., 2017; Conceição et al., 2019).

Nesse contexto, o abacaxi é uma cultura alternativa de cultivo nos tabuleiros costeiros do Nordeste e Sudeste do Brasil, principalmente, em regiões áridas e semiáridas (Brito et al., 2020), pois tem potencial de manter sua produtividade em

climas mais quentes e secos (Borland et al., 2014), devido ao seu metabolismo ácido crassuláceo (CAM) (Zhang et al., 2014; Couto et al., 2016). As plantas CAM economizam água fechando seus estômatos durante o dia e abrindo-os durante a noite com fixação de CO<sub>2</sub>, resultando em melhor eficiência no uso da água em condições secas (Carr, 2012). Porém, esse mecanismo complexo necessita de estudos com o abacaxizeiro, para avaliar seu crescimento e metabolismo em condições adversas, visto que, existe uma necessidade de pesquisas voltadas para essa espécie vegetal.

Por todas as modificações celulares que ocorrem nas plantas sob condições salinas pelo excesso de Na<sup>+</sup>, é de grande importância o estudo do metabolismo vegetal, de modo a entender quais as suas consequências, uma vez que, cada espécie pode responder de forma distinta, além de avaliar os benefícios do Si para as plantas em condição de estresse. Nesse sentido, um estudo integrado envolvendo análises no crescimento, composição nutricional e bioquímica foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o efeito da salinidade pelo excesso de Na<sup>+</sup> e do Si em mudas de abacaxizeiro, uma vez que, esta condição vem se tornando cada vez mais comum em regiões produtoras desta frutífera tropical com grande potencial no mercado brasileiro e mundial, visando elucidar mecanismos adaptativos que, uma vez acionados em plantas jovens, levariam a um maior controle do seu desenvolvimento vegetativo, possibilitando assim, uma colheita mais produtiva.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 A CULTURA DO ABACAXIZEIRO

#### 2.1.1 Origem, características e condições edafoclimáticas

O abacaxizeiro (*Ananas comosus* L., Merrill) é uma espécie pertencente à família Bromeliaceae e gênero *Ananas*, fazendo parte tanto de espécies cultivadas, como de espécies silvestres (Cunha e Cabral, 1999). É considerada uma planta herbácea, monocotiledônea, perene, visto que, após a produção do fruto, o seu desenvolvimento continua por meio de uma gema axilar que se desenvolve, produzindo, no ano seguinte, um novo fruto.

É uma espécie bem adaptada aos climas tropicais tendo como centro de origem, os países da América do Sul, incluindo o Brasil, considerado como um dos principais centros de diversidade genética de abacaxi (Bartholomew et al., 2002). A maioria das cultivares de abacaxizeiro pertence à espécie *Ananas comosus* (L.) Merrill, espécie diploide, apresentando  $2n=2x=50$ , havendo também, variedades poliploides do gênero *Ananas* (Oliveira et al., 2004).

A planta possui um caule grosso e curto onde se desenvolvem folhas compridas, estreitas e rígidas, quase sempre apresentando espinhos nas bordas e, do caule, desenvolvem-se também raízes axilares. As folhas do abacaxizeiro recebem classificação de acordo com seu formato e posição, sendo denominada da externa para a interna, como A, B, C, D, E e F. As folhas A e B são consideradas mais velhas (adultas), já a folha D é a mais importante do ponto de vista de análise, visto que, é a mais jovem dentro das adultas e metabolicamente mais ativa (Reinhardt, 2000). O sistema radicular é fasciculado, superficial e fibroso, com profundidade de até 30 cm da superfície do solo (Bartholomew et al., 2002; Souza e Reinhardt, 2009).

O fruto é formado a partir da gema terminal da planta e é caracterizado como pseudofruto partenocárpico, formado por um aglomerado de gomos em um eixo central com uma coroa de folhas no topo, e a polpa podendo ser branca, amarela ou laranja-avermelhada (Silva e Tassara, 2001). Esse tipo de infrutescência é chamado de sorose (Lopes Neto et al., 2015). Além disso, essa planta possui fruto caracterizado

como não climatérico, diferentemente dos frutos climatéricos que possuem alta respiração.

Por ser uma espécie originária de regiões de clima tropical, a faixa de temperatura adequada para o crescimento e desenvolvimento da planta e produção de um fruto de qualidade satisfatória encontra-se entre 22 e 32°C, com amplitude térmica entre dia e noite, de 8 a 14°C. Quando cultivada em temperaturas abaixo de 20°C e acima de 32°C, a planta apresenta redução no seu crescimento (Reinhardt et al., 2000).

O abacaxizeiro é exigente em luminosidade, necessitando de insolação anual entre 2.500 e 3.000 horas, ou seja, 6,8 a 8,2 horas de luz solar por dia, e a umidade relativa do ar ideal média anual é de 70% ou superior (Souza e Reinhardt, 2009; Crestani et al., 2010).

O abacaxizeiro é uma cultura com exigência hídrica relativamente baixa quando comparado com outras frutíferas. Uma das principais características da espécie é sua adaptação às áreas de baixa pluviosidade pois, dependendo das condições ambientais em que se encontra, essa planta apresenta o metabolismo do carbono tipo C3 ou do tipo CAM (Metabolismo Ácido das Crassuláceas), adaptação fotossintética que facilita a absorção e fixação de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) à noite, melhorando a eficiência no uso da água quando é cultivado sob condições de estresse hídrico (Aragón et al., 2012).

Para que o abacaxizeiro expresse máximo potencial produtivo, é essencial que o cultivo ocorra em regiões com precipitação anual bem distribuída, entre 1.000 e 1.500 mm (Reinhardt et al., 2013).

### **2.1.2 Ciclo, propagação e produção de mudas**

O ciclo de vida do abacaxizeiro divide-se em três fases: a primeira é a fase vegetativa, podendo ter uma duração de cinco a 12 meses, com início no plantio e término na indução floral, podendo ocorrer naturalmente ou através de uma indução artificial para uniformização da produção do fruto, garantindo que ele atinja pet aladrão comercial. A segunda fase é a reprodutiva, quando ocorre a formação do fruto, podendo durar de cinco a seis meses e, por último, a fase propagativa, que corresponde à fase de produção de mudas que pode durar de dois a 10 meses, dependendo do tipo de muda formada (Silva et al., 2004).

O abacaxizeiro não é propagado comercialmente via sementes, pois estas, geralmente, são abortadas em razão de suas variedades apresentarem uma alta autoincompatibilidade e/ou apresentarem baixa fertilidade, porém, as sementes são importantes para variabilidade genética da cultura e para o melhoramento genético, sendo obtidas principalmente via hibridações artificiais (Cabral et al., 2003).

Em plantios comerciais, o método de propagação utilizado é o assexuado, no qual o material usado advém da fase propagativa da planta. Através de brotações desenvolvidas a partir de gemas axilares originadas da planta mãe, posicionadas no caule (rebentão), pedúnculo (filhote) e região de inserção do pedúnculo no caule (filhote-rebentão), dentre as mudas do tipo rebentão, é a que produz frutos em menor tempo após o plantio, em torno de 10 a 18 meses (Cunha e Cabral, 1999). A coroa também é usada para propagação em menor quantidade, devido ser apenas uma por planta e acompanhar o fruto durante a comercialização (Coelho et al., 2007; Berilli et al., 2011).

Usualmente, para instalação de novas lavouras comerciais de abacaxi, as mudas utilizadas são provenientes de plantios anteriores, conduzidos para a produção de frutos, nos quais as mudas não apresentam características fitossanitárias adequadas para plantio, devido às pragas e doenças de plantas matrizes infectadas (Matos et al., 2009).

Com a utilização de mudas de baixa qualidade fitossanitária, muitos problemas são acarretados nas lavouras do Brasil, principalmente, por doenças como fusariose, que tem como agente patogênico o fungo *Fusarium subglutinans*. A fusariose é a principal limitação da produção de abacaxi nas principais regiões produtoras do Brasil e em outros países da América do Sul (Souza et al., 2016; Viana et al., 2020). Este tipo de propagação torna-se um fator limitante na expansão da cultura, principalmente pela ausência de viveiristas que têm sua produção desestimulada pelo lento crescimento das mudas e longo período para obtenção das mesmas, além da preferência de material propagativo de lavouras velhas por conta do baixo custo (Cunha e Reinhardt, 2004).

Novas pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de desenvolver novas técnicas para aperfeiçoamento de outros métodos de propagação do abacaxizeiro. Em um estudo realizado por Freitas et al. (2014), foi empregado o método de propagação por seccionamento do caule para verificar o efeito de doses

de brassinosteroide na brotação, no desenvolvimento inicial e na composição nutricional de mudas da cultivar Smooth Cayenne.

Outro método de propagação para produção de mudas é por meio da remoção do meristema apical caulinar da planta, para induzir o desenvolvimento de gemas laterais. É realizado a partir do uso da coroa do abacaxi, onde as gemas saem do estado dormente para o fisiologicamente ativo pela eliminação da dominância do meristema apical (Santos et al., 2011). Este método possui como vantagem evitar o descarte desse material e, pode ser feito, principalmente, utilizando coroas de cultivares como a 'Smooth Cayenne', que têm o fruto destinado à indústria, com uma quantidade elevada de coroas descartadas por ser um material excedente que, geralmente, não apresenta utilidade econômica. Santos et al. (2014) utilizaram esta técnica para avaliar o efeito da aplicação de brassinosteroide e ácidos húmicos no crescimento e estado nutricional de rebentos oriundos de coroas de abacaxi 'Smooth Cayenne'.

A micropropagação, através da produção *in vitro* de plântulas, tornou-se um método muito importante de multiplicação de novas variedades de abacaxizeiro, e uma técnica fundamental para obtenção de mudas sadias, vigorosas e geneticamente superiores. Protocolos de micropropagação de abacaxi vêm sendo desenvolvidos e ajustados desde o trabalho de Aghion e Beauchesne (1960). Desde então, muitos estudos têm demonstrado a aplicabilidade desta técnica aos programas de melhoramento genético do abacaxi, bem como, para produção comercial de mudas (Usman et al., 2013; Scherer et al., 2013; Silva et al., 2016; Mendonça et al., 2017).

Contudo, após o cultivo *in vitro*, é necessário que as mudas passem por um longo período de aclimatização, para adaptação destas ao período *ex vitro*, que faz desta fase a mais crítica, onerando a produção de mudas micropropagadas (Oliveira-Cauduro et al., 2016). O método de micropropagação ainda não foi transformado em uma prática comercial comum de propagação do abacaxi, devido ao alto custo final na produção e aos riscos ainda altos de ocorrência de variações somaclonais nas mudas produzidas (Reinhardt et al., 2018).

### 2.1.3 Cultivares

As cultivares de abacaxizeiro, predominantemente cultivadas no mundo, são: 'Smooth Cayenne', 'MD2 (Gold)', 'Singapore Spanish', 'Queen', 'Red Spanish',

'Perolera' e 'Perola' (Maia et al., 2019). No Brasil, cerca de 95% das lavouras comerciais são constituídas pelas cultivares de abacaxizeiro 'Pérola' e 'Smooth Cayenne', responsáveis por mais de 85% da produção total de abacaxi no país, porém, ambas são suscetíveis à fusariose, principal doença da cultura no Brasil (Reinhardt et al., 2018).

A cultivar Pérola, também conhecida como Pernambuco, apresenta plantas de porte médio, eretas, folhas longas (média de 65 cm) com espinhos nas bordas e próximo ao pedúnculo, pedúnculos longos (média 30 cm), numerosos filhotes (média de 10-15) e poucos rebentões. O fruto apresenta forma cônica com casca amarela e coroa grande, o peso varia de 1 a 1,5 kg com a polpa branca, é succulenta, possui alto teor de açúcar e pouca acidez, com sólidos solúveis totais de 14-16 ° Brix, agradável ao paladar brasileiro. Apesar das boas características do fruto e da polpa, essa cultivar não apresenta características adequadas para a industrialização e exportação *in natura*, pois é suscetível à fusariose e à cochonilha (Cunha e Cabral, 1999).

A cultivar Smooth Cayenne apresenta plantas robustas, com característico crescimento semiereto, folhas que apresentam poucos espinhos na borda (dois a três pares de espinhos), pedúnculo curto e poucas mudas do tipo filhote. O fruto apresenta forma ligeiramente cilíndrica com casca laranja-amarelada quando madura, aspecto atraente, com peso variando de 1,5 a 2,5 kg, polpa firme e amarela, elevados teores de açúcares e acidez, com sólidos solúveis totais de 13-19° Brix. Essas características a tornam adequada para industrialização e exportação como fruta fresca, sendo a cultivar mais utilizada na industrialização por ser considerada um padrão internacional, entretanto, também é susceptível à fusariose e à murcha causada por cochonilhas (Cunha e Cabral, 1999).

A fusariose, causada pelo fungo (*Fusarium guttiforme*), é a doença mais severa na cultura do abacaxi no Brasil, com perdas estimadas de 30 a 40% dos frutos e de até 20% das mudas, sendo um grande problema enfrentado pelos produtores em suas lavouras comerciais. O controle da fusariose tem sido baseado na integração de práticas culturais e na aplicação de fungicidas quando do surgimento da inflorescência. A utilização de variedades resistentes à doença é um método de controle adequado, pois, além de ser economicamente viável, apresenta eficiência ambiental (Ventura et al., 2009).

Os trabalhos de melhoramento genético do abacaxizeiro no Brasil resultaram em quatro cultivares resistentes à fusariose, sendo que, três dessas: 'BRS Imperial'

(2003), 'BRS Vitória' (2006) e 'BRS Ajubá' (2009) foram desenvolvidas e lançadas pela Embrapa Mandioca e Fruticultura. Já a 'IAC Fantástico' (2010) foi lançada pelo Instituto Agrônomo de Campinas (Matos et al., 2011). De acordo com Caetano et al. (2015), somente a disponibilidade de genótipo resistente à doença não assegura que as mudanças almejadas para o manejo da cultura sejam alcançadas, uma vez que, é fundamental considerar a aceitabilidade comercial de um novo genótipo para o sucesso do processo de substituição das variedades comerciais tradicionais, suscetíveis às doenças. Portanto, são necessários estudos mais detalhados com tais cultivares.

A cultivar BRS Imperial, resistente à fusariose, é um híbrido resultante do cruzamento das cultivares *Perola* e *Smooth Cayenne*. Esta cultivar apresenta plantas com características de porte médio, folhas com coloração verde escuro arroxeado e ausência de espinhos, pedúnculo curto (média 20 cm), fruto de formato cilíndrico, com casca de cor amarela na maturação, pesando em torno de 1,6 kg. Embora seja possível encontrar, a nível de campo, frutos com peso de até 0,900 g, a polpa é amarela e apresenta elevado teor de açúcar, acidez moderada e excelente sabor, sendo apropriada para o consumo *in natura* e para industrialização (Cabral e Matos, 2005).

#### 2.1.4 Produção e importância econômica

O abacaxizeiro (*Ananas comosus* L.), Merrill apresenta grande importância econômica e social mundialmente. É a cultura mais valiosa, economicamente, que tem a capacidade de realizar o metabolismo ácido crassuláceo (CAM). Além disso, é a única espécie da família Bromeliaceae cultivada comercialmente para produção de frutos, e considerada como a segunda frutífera tropical mais importante, depois da banana, em termos de comércio internacional (Fang et al., 2016; Wang et al., 2020). No Brasil é a terceira fruta tropical mais plantada, atrás da laranja e da banana.

A espécie é cultivada mundialmente em mais de 60 países. A principal região produtora é o continente asiático, com 45,7% da produção da fruta (13,4 milhões de toneladas), seguida das Américas, com 35,3% (10,3 milhões de toneladas), da região africana como a terceira maior produtora, com representação de 18,6% da produção mundial (5,4 milhões de toneladas), e a Europa e Oceania simbolizando um percentual ínfimo na produção (FAO, 2022).

Atualmente, são produzidas, aproximadamente, 29,3 milhões de toneladas de abacaxi por ano no mundo todo, sendo os maiores produtores a Indonésia, Filipinas e Costa Rica. O Brasil se destaca como quarto maior produtor desta frutífera com uma produção total de 2,3 milhões de toneladas em uma área de aproximadamente 64 mil hectares, resultando em uma produtividade média de cerca de 24 mil frutos por hectare (IBGE, 2022; FAO, 2022).

No Brasil, o abacaxi é produzido em todas as regiões do país, e quase toda a produção é destinada ao abastecimento da demanda interna, pois o país não apresenta grande relevância na participação do mercado internacional. Entre os anos de 2012 até 2019, o país exportou aproximadamente 48 mil toneladas da fruta, somando um montante de US\$ 80 milhões. As exportações, durante esses anos, abrangeram a infrutescência, o abacaxi preparado e processado, e o suco de abacaxi, que corresponderam a cerca de 29%, 2% e 69% da quantidade exportada, respectivamente, tendo como principais destinos da fruta a Argentina e Uruguai (CONAB, 2020).

Os maiores produtores brasileiros de abacaxi são os estados do Pará e Paraíba. O estado do Rio de Janeiro se destaca como o quarto produtor brasileiro e o segundo maior produtor da Região Sudeste, onde a produção de abacaxi se concentra na Região Norte Fluminense, no qual a cultura apresenta grande importância econômica (CONAB, 2020; IBGE, 2022;). De acordo com relatório de atividades da EMATER-RIO 2019, a Região Norte Fluminense teve faturamento bruto de R\$ 175 milhões com produção de abacaxi.

O cultivo do abacaxi na Região Norte Fluminense tem destaque para os municípios de São Francisco de Itabapoana, São João da Barra e Campos dos Goytacazes. Nestes municípios, encontra-se a maior área plantada, as lavouras mais tecnificadas e, conseqüentemente, a maior produtividade e produção do estado. No ano de 2018 o município de São Francisco do Itabapoana teve uma importante posição na produção nacional de abacaxi com uma área colhida de 4.056 hectares, considerada a segunda maior colheita (EMBRAPA, 2019).

Dados de 2022 indicam que a cultura do abacaxi movimentou cerca de 500 milhões de reais no Norte Fluminense, com uma área colhida de 4.334 hectares e um rendimento médio de 26,2 mil frutos por hectare (IBGE, 2022). Esses dados evidenciam a importância da contribuição do cultivo para o desenvolvimento socioeconômico regional.

A fruticultura fluminense tem se mostrado uma ótima opção de investimento no setor agrícola do estado do Rio de Janeiro, tendo grande potencial de desenvolvimento, tanto em aumento de área como na diversificação da sua produção, principalmente, devido à proximidade com o mercado consumidor, que é a capital do estado, e à contribuição significativa para este setor.

## 2.2 SALINIDADE

### 2.2.1 Definição e causas da salinização

A salinização, caracterizada pelo aumento da concentração de sais minerais no solo, é um fenômeno que ocorre em várias regiões do mundo. Esse processo resulta no acúmulo excessivo de sais, sendo desencadeado por uma variedade de fatores, incluindo irrigação com água salina, drenagem inadequada, uso excessivo de fertilizantes, evaporação intensa e baixa precipitação pluviométrica. (Denaxa et al., 2022).

A salinidade é a medida da quantidade de sal presente no solo e na água, e pode ser amplamente classificada em primária e secundária. A salinidade primária é o produto de processos naturais, como intempéries, chuva e vento forte, que depositam sais por um período prolongado no solo e na água. Já a salinidade secundária é a ação da atividade antropogênica, como desmatamento, irrigação inadequada, excessivo uso de fertilizantes e defensivos agrícolas com alto índice salino, dentre outras. Os solos e a água salina são constituídos de vários íons, principalmente, pelo acúmulo de  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$ , e a concentração do sal é expressa como  $\text{mmol.L}^{-1}$  ou  $\text{mg.L}^{-1}$ . No entanto, para fins científicos e conforto analítico, é medido como condutividade elétrica (CE), e a unidade é siemens por metro ( $\text{S.m}^{-1}$ ) (Arif et al., 2020).

A sodicidade refere-se especificamente à quantidade de sódio presente na água de irrigação. No Brasil, ainda não há um referencial limite quanto aos valores de condutividade elétrica na Resolução do CONAMA n. 357, de 17 de março de 2005. No entanto, Ayers e Westcot (1999) classificam o grau de restrição do uso da água de irrigação quanto à condutividade elétrica (CEa), sendo: nenhuma CEa  $< 0,7 \text{ dS.m}^{-1}$ ; ligeira e moderada CEa entre  $0,7 \text{ dS.m}^{-1}$  a  $3,0 \text{ dS.m}^{-1}$ ; e severa CEa  $> 3,0 \text{ dS.m}^{-1}$ . Quanto aos sais presentes nestas águas, o mais comum e trabalhado é o cloreto de

sódio, o qual, de acordo com Cavalcante et al. (2010), prejudica o desenvolvimento inicial da grande maioria das frutíferas.

Problemas com salinidade ocorrem, predominantemente, em regiões áridas e semiáridas, devido à baixa precipitação pluvial e à alta demanda evaporativa, que dificultam a lixiviação dos sais localizados na camada arável do solo, podendo acarretar estresse salino nas plantas. No Brasil, as regiões do semiárido nordestino, em que as taxas de evaporação tendem a serem superiores às de pluviosidade, há o acúmulo natural de sais nos solos e nas águas (Cavalcante et al., 2010).

Nestas regiões, os efeitos da salinidade em plantas cultivadas têm sido objeto de vários estudos com inúmeras frutíferas de elevado valor econômico. Macedo et al. (2019), em sua pesquisa, avaliaram a produtividade e a qualidade física do acesso de maracujá-amarelo 'Guinezinho' em função do espaçamento entre linhas, com água de irrigação salina em safras consecutivas. Na cultura do mamoeiro, Figueredo et al. (2018) avaliaram o crescimento e a partição de fitomassa seca de mudas de mamoeiro híbrido UENF/Caliman 01 irrigado com água de diferentes concentrações salinas. Brito et al. (2020) avaliaram a eficiência fotoquímica em abacaxizeiro 'Pérola' irrigado com água salina no semiárido baiano. Esses estudos são realizados a fim de se obter plantas tolerantes à salinidade.

### **2.2.2 Efeito da salinidade nas plantas**

No que diz respeito às espécies vegetais, os efeitos decorrentes da salinidade e/ou sodicidade manifestam-se de maneira distinta, apresentando variações, tanto entre diferentes espécies quanto entre genótipos de uma mesma espécie. Tal disparidade ocorre devido à diversidade na capacidade adaptativa osmótica das plantas, evidenciando-se que algumas delas conseguem manter rendimentos satisfatórios mesmo em níveis consideravelmente elevados de condutividade elétrica, enquanto outras, se mostram mais suscetíveis a tais condições adversas (Ayers e Westcot, 1999).

O excesso de sais, além de acarretar danos às propriedades físicas e químicas do solo, também provoca a redução do crescimento das plantas cultivadas, fazendo com que estas sofram estresse salino e isso acomete sérios prejuízos à atividade agrícola (Cavalcante et al., 2010).

O efeito do estresse salino sobre as plantas é consequência de dois distintos componentes: (1) o componente osmótico, resultante da elevada concentração de solutos na solução do solo, que provoca um déficit hídrico pela redução do potencial hídrico do solo e (2) o componente iônico, decorrente dos elevados teores de sais, como  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  e da alterada relação  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  e de outros nutrientes, como o  $\text{Ca}^{2+}$ , o que resulta em um desequilíbrio nutricional (Hasegawa et al., 2000; Isayenkov e Maathuis, 2019). Chrysagyris et al. (2019), em seu estudo, observaram que o efeito do estresse salino diminuiu os teores de N, K e Zn nos tecidos foliares e de P, K, Ca e Mg nas raízes de plantas de hortelã em sistema hidropônico.

Em um período curto de estresse, geralmente ocorre predominância do efeito do componente osmótico dos sais nas plantas, porém, em períodos mais longos, pode haver um acúmulo dos íons nas células, acarretando distúrbios nutricionais e metabólicos. Em nível celular, as respostas iniciais estão relacionadas com redução da expansão da superfície foliar, perda da turgescência, desidratação, redução do crescimento e do alongamento das raízes (Munns e Tester, 2008; Nawaz et al., 2010). Outro evento afetado pela salinidade é a fotossíntese, pois o estresse salino acarreta a limitação da assimilação de carbono e produção de biomassa, portanto, restringe o crescimento das plantas (Chen et al., 2015).

A salinidade aumenta o conteúdo de espécies reativas de oxigênio (ERO) nas células vegetais e cria estresse oxidativo, o efeito tóxico dessas ERO é a peroxidação lipídica, deterioração de membranas de organelas, bem como danos ao DNA e proteínas (El Ghazali, 2020). Plantas estressadas por salinidade também são caracterizadas por um balanço de carbono realocado, com uma porção maior de carbono assimilado desviado do crescimento para a respiração de manutenção (Flowers et al., 2015).

O aumento da taxa de respiração é importante durante o estresse salino nas plantas, porque fornece energia na forma de ATP, além de formar esqueletos de carbono e redutores que alimentam processos adaptativos, incluindo exclusão de íons tóxicos, síntese de soluto compatível e desintoxicação das ERO (Munns e Tester, 2008). Parte do processo respiratório acontece no citosol, enquanto uma parte significativa acontece dentro da mitocôndria. Vários sistemas antioxidantes e redox participam na proteção desta organela contra o estresse oxidativo induzido pela salinidade (Sanchez-Guerrero et al., 2019).

As alterações metabólicas nas plantas, em função da salinidade, são variáveis dependendo da espécie, isso porque, existem plantas que são capazes de tolerar o estresse salino. Dessa maneira, as plantas são classificadas em duas categorias quanto à capacidade de sobrevivência nestas condições, denominadas halófitas e glicófitas. As halófitas são nativas de ambientes salinos e, assim, completam o ciclo de vida nestes locais, já as glicófitas não toleram a salinidade da mesma maneira que as halófitas, portanto, não toleram altas concentrações salinas, geralmente têm um limite de sal acima do qual apresentam os primeiros sinais de estresse salino, mas esse limite é variável entre as espécies. Glicófitas e halófitas adotam várias estratégias para combater a salinidade (Krishnamurthy et al., 2018).

A planta responde às condições salinas por meio de várias estratégias, como: a compartimentação de íons tóxicos, a adaptação osmótica e estimulação de maquinaria antioxidante e a biossíntese de poliaminas. Estes ajudam na eliminação de ERO e estabilização da membrana, e absorção de nutrientes (Freitas et al., 2019).

A modulação de diferentes mudanças morfo-anatômicas em raízes e folhas, e a mudança no tamanho e no número de organelas (cloroplasto, mitocôndria e peroxissomo), além da modulação de fitohormônios, levam à adaptação da planta durante a salinidade (Acosta-Motos et al., 2017; Zhang e Dai, 2019). A adaptação osmótica é um mecanismo importante para sustentar o turgor celular que, em particular, mantém o crescimento, a produtividade e o rendimento. A planta sintetiza vários osmólitos, como prolina, glicina betaína e açúcares solúveis.

A prolina é um aminoácido e osmoprotetor, além de uma importante molécula de sinalização que se acumula no citosol da planta com funções na estabilização e proteção da membrana, enzimas e proteínas. Atua regulando positivamente a proteína da membrana e enzimas eliminadoras de ERO, além de manter homeostase do soluto celular (Arif et al., 2020). Alam et al. (2020) observaram aumento no conteúdo de prolina em porta enxertos de citros irrigados com água salina, indicando um mecanismo de defesa da planta contra os efeitos adversos da salinidade. A glicina betaína também atua como osmoprotetor forte e compatível na mitigação do estresse salino. Uma extensa pesquisa descobriu que esse aminoácido mantém o ajuste osmótico discriminando a razão  $\text{Na}^+$  para  $\text{K}^+$ , e acumulando-se na célula, em particular, levando à diminuição dos efeitos tóxicos de íons (Singh et al., 2015).

O abacaxizeiro, sob condições de estresse salino ou hídrico, apresenta o metabolismo CAM (Metabolismo Ácido das Crassuláceas), apesar de se desenvolver

com a via C3. O metabolismo CAM se caracteriza pelo fechamento dos estômatos durante o dia, de forma que a transpiração é impedida, além da captação do CO<sub>2</sub> e do ar atmosférico. Assim, o CO<sub>2</sub> e o ar atmosférico são absorvidos durante a noite, sendo o CO<sub>2</sub> armazenado na forma de ácido málico nos vacúolos (Aragón et al., 2012; Zhang et al., 2014; Couto et al., 2016).

A fotossíntese ocorre durante o dia, sendo o ácido málico descarboxilado, liberando CO<sub>2</sub> para ser transformado em açúcares pelo ciclo de Calvin. No entanto, se não houver estresse, a planta continua funcionando através do metabolismo C3, captando o CO<sub>2</sub> e realizando fotossíntese durante o dia. Neste contexto, a planta do abacaxizeiro caracteriza-se como CAM facultativa, por realizar o metabolismo C3, sob condições de não estresse, e metabolismo CAM, quando as condições se tornam adversas (Taiz et al., 2017). No entanto, o metabolismo CAM não permite que haja um acúmulo satisfatório de matéria seca e crescimento vegetal, mas é um mecanismo de adaptação das plantas para otimização do uso da água.

### 2.2.3 Silício e seu efeito como atenuador do estresse salino

O silício (Si) é o oitavo elemento mais abundante no universo e o segundo mais abundante na crosta terrestre, correspondendo aproximadamente 28%, estando logo após o oxigênio. Podemos inferir que o Si não falta em quantidade, ainda assim, as formas de Si disponíveis nas plantas podem ser limitantes (Malavolta, 1980; Epstein, 1999).

Em solos tropicais, o silício se encontra presente em minerais primários e secundários. No entanto, devido ao avançado processo de intemperização que caracteriza solos submetidos a uma acentuada lixiviação, resultando em acidez e baixa saturação por bases, o silício assume, predominantemente, a forma de quartzo e sílica amorfa (SiO<sub>2</sub>.nH<sub>2</sub>O), além de outras formas não disponíveis às plantas (Barbosa Filho et al., 2001; Giongo e Bohnen, 2011).

Os solos brasileiros, em razão do avançado processo de intemperismo, contêm aproximadamente de 5 a 40% de silício em sua composição. Os solos mais jovens, como os Cambissolos, exibem concentrações mais elevadas desse elemento quando comparados aos solos mais intemperizados, como os Latossolos (Menegale et al., 2015).

Com exceção dos solos orgânicos (Organossolos), a composição da maioria dos solos minerais é caracterizada por areias, predominantemente  $\text{SiO}_2$ , diversos minerais primários (como olivina, augita, hornblenda, quartzo, feldspato-ortoclase, plagioclásio, albita e mica), silicatos secundários (minerais de argila como ilita, vermiculita, montmorilonita, clorita e caulinita) e minerais contendo Si amorfo, como alofona e opala. Estes silicatos apresentam solubilidade moderada e são biogeoquimicamente inertes. O ácido monossilícico, ou ácido ortossilícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ), representa a única forma de Si solúvel em água, enquanto o ácido polisilícico (ácido silícico polimerizado) é, apenas, parcialmente solúvel no solo (Liang et al., 2015).

O silício solúvel em água encontra-se na solução do solo e pode ser adsorvido nas superfícies coloidais do solo que contêm argila, matéria orgânica e complexo orgânico-inorgânico (Liang et al., 2015). Devido à sua suscetibilidade à lixiviação, o silício é classificado como um dos elementos mais facilmente lixiviáveis no perfil do solo. Em solos tropicais e subtropicais, sua eficácia agregante é reduzida, facilitando sua movimentação ao longo do perfil, resultando em baixos teores de silício trocável devido à dessilicificação (perda de silício) (Menegale et al., 2015).

O silício solúvel é absorvido pelas raízes das plantas em sua forma neutra, conhecida como ácido silícico ou monossilícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ). Esse processo ocorre passivamente, regulado pela transpiração através do xilema para transporte a longa distância, juntamente com a água (fluxo de massa), ou por meio de transporte ativo, utilizando transportadores específicos localizados na membrana plasmática das células das raízes (Epstein, 1999; Marafon e Endres, 2011).

O silício é depositado como sílica amorfa em várias partes da planta, como lâminas foliares, bainhas foliares, colmos, cascas e raízes. O acúmulo é, particularmente, significativo nas lâminas foliares, especialmente abaixo da cutícula epidérmica, onde forma uma camada dupla de sílica nas células ou é utilizado na formação de estruturas silicificadas conhecidas como fitólitos (Raven, 2001). Embora parte do silício absorvido permaneça na forma solúvel, a maior parte é incorporada na parede celular (Costa et al., 2009). No entanto, a distribuição do silício na planta está associada à taxa transpiratória das diferentes partes da planta, sendo mais uniforme em plantas acumuladoras (Mendes et al., 2011).

Apesar de o Si ser agora reconhecido como um elemento benéfico (IPNI, 2015), ele é considerado não essencial para o crescimento das plantas (Richmond e Sussman, 2003). Todavia, sua essencialidade foi demonstrada para plantas

vasculares do grupo Equisitaceae e para diatomáceas (Bacillariophyta) marinhas e de água doce. Estas algas são dotadas de parede celular (frústulas) impregnadas com sílica amorfa hidratada ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), apresentando demanda por silício tão alta quanto por nitrogênio (Epstein e Bloom, 2006).

Conforme destacado por Hodson et al. (2005) e Ma (2004), as plantas podem ser categorizadas como acumuladoras de silício ( $> 4\%$  Si), apresentando acúmulo intermediário de silício (2 - 4% Si), como é o caso das famílias Brassicaceae, Urticaceae e Commelinaceae, ou exibindo baixo acúmulo ( $< 2\%$ ). Em ambos os grupos, a presença adequada de silício favorece significativamente o crescimento e a fertilidade das plantas (Epstein, 1999).

Diversas pesquisas científicas demonstram que o Si acarreta efeitos consideráveis no crescimento e desenvolvimento das plantas, diferenciando-se de qualquer outro elemento vegetal não essencial. Isso ressalta a importância de estudos sobre o efeito desse elemento nas plantas (Detmann et al., 2012; Van Bockhaven et al., 2015, Frew et al., 2018).

Epstein (2009) enfatizou que a maioria das plantas apresentam quantidades substanciais de silício, sugerindo que sua presença não é meramente resultado de uma absorção de nutrientes de forma estocástica, como os processos evolutivos direcionaram a absorção de outros nutrientes elementares, a exemplo do potássio (K). Além disso, a absorção de silício pelas plantas pode ser considerada adaptativa, respondendo às condições ambientais adversas, sejam elas de natureza abiótica ou biótica (Hartley, 2015). Portanto, o silício não é necessariamente essencial, mas inegavelmente fundamental para as plantas (Frew et al., 2018). Na literatura há demonstrações da eficácia deste elemento, por meio de estudos/experimentações, englobando o Si na atenuação de estresses abióticos, como o estresse promovido pela salinização.

Em um estudo desenvolvido com a cultura do morango Moradi et al. (2022), avaliaram o efeito da aplicação do metil jasmonato (MeJA) (0,5 mM) e nanopartículas de silício (2 mM) nas características fisiológicas e padrões de expressão espacial de alguns genes relacionados à salinidade. Após a aplicação desses elementos, o morangueiro teve uma melhor resposta à salinidade, melhorando os mecanismos de proteção fisiológica antioxidante enzimáticos e não enzimáticos, além de aumentar a transcrição de genes relacionados à salinidade.

Em outra pesquisa realizada por Hernández-Salinas et al. (2022), investigaram a atuação do Si no aumento da tolerância do tomateiro à salinidade por NaCl em um sistema hidropônico de circuito fechado, onde as plantas foram irrigadas com soluções contendo 0, 20 ou 60 mM de NaCl combinadas com 0 ou 1,50 mM de Si. Como resultado, a massa seca da parte aérea e a produção de frutos diminuíram com a salinidade, no entanto, o Si restaurou parcialmente a biomassa e o rendimento. Além disso, o Si suplementar permitiu um aumento de 80% na atividade da peroxidase e prolina em plantas com NaCl 60 mM.

Os principais mecanismos para melhorar o crescimento e o potássio ( $K^+$ ), a homeostase iônica, o conteúdo de prolina e a capacidade antioxidante enzimática de plantas de soja afetadas pelo sal (50 e 100 mM NaCl) foram investigados quando o silicato de potássio foi fornecido em diferentes vias (aplicação sem Si, pulverização foliar a 20 mM, adição na solução nutritiva a 2,0 mM e coaplicação de pulverização foliar a 20 mM, e adição de solução nutritiva a 2,0 mM). E como resultado, as diferentes vias de aplicação de Si aumentaram a tolerância da soja ao estresse salino, diminuindo drasticamente a captação de  $Na^+$  e peroxidação lipídica, aumentando a concentração de  $K^+$ , a relação  $K^+/Na^+$  e o acúmulo de prolina, regulando positivamente a atividade antioxidante enzimática e aumentando o crescimento das plantas (Peña-Calzada et al., 2023).

Na literatura, há escassez de informações sobre o uso do silício, especialmente em relação ao estresse salino, na cultura do abacaxizeiro. Santos et al. (2017) investigaram os efeitos do cloreto de potássio e do ácido silícico no crescimento e na composição nutricional de mudas do abacaxizeiro 'Vitória'. Os resultados sugerem a possibilidade de fitotoxicidade decorrente da aplicação de silício nas mudas de abacaxizeiro. Assim, a pesquisa sobre esse elemento revela-se fundamental para o avanço na cultura.

### 3 TRABALHOS

#### 3.1 RESPOSTAS BIOMÉTRICAS E BIOQUÍMICAS DE MUDAS DE ABACAXIZEIRO CULTIVADAS EM CONDIÇÕES SALINAS

##### RESUMO

A salinidade pode acarretar estresse osmótico pela absorção dos íons tais como  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$ . Além disso, pode promover alterações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas nas plantas. Nesse sentido, objetivou-se avaliar o efeito da salinidade nas respostas biométricas e bioquímicas em mudas de abacaxizeiro. O experimento foi conduzido em casa de vegetação em Campos dos Goytacazes (latitude =  $21^{\circ}19'23''$  S, longitude =  $41^{\circ}10'40''$  W), Brasil, em delineamento de blocos ao acaso, no esquema fatorial 2x5, sendo duas cultivares (Pérola e BRS Imperial) e cinco concentrações de NaCl (0, 40, 80, 120 e 160 mM) adicionadas na solução nutritiva de Hoagland e Arnon. Após 40 dias de tratamento, avaliou-se o comprimento da parte aérea e raiz e suas massas fresca e seca; diâmetro do caule; número de folhas; área foliar; volume total; área superficial e diâmetro médio radicular; e substâncias bioquímicas. As avaliações biométricas indicaram que o NaCl influenciou médias do comprimento radicular para a 'BRS Imperial', com elevação dos valores até à dose estimada em 59,31 mM. Nas outras características, verificaram-se apenas diferenças entre cultivares, no qual, a 'Pérola' apresentou maior comprimento e massa fresca da parte aérea, área foliar, diâmetro do caule e diâmetro médio radicular. A 'BRS Imperial' apresentou médias superiores em massa seca da parte aérea, número de folhas, massa fresca e seca radicular, área superficial e volume total radicular. A 'BRS Imperial' demonstrou adaptações promissoras frente à salinidade, por meio de alterações morfológicas no sistema radicular, enquanto a 'Pérola' respondeu com maior produção de substâncias osmorreguladoras, como glicina e prolina.

**Palavras-chave:** *Ananas comosus* (L.), 'Perola', 'BRS Imperial', salinidade

## BIOMETRIC AND BIOCHEMICAL RESPONSES OF PINEAPPLE SEEDLINGS GROWN UNDER SALINE CONDITIONS

### ABSTRACT

Salinity can induce osmotic stress through the absorption of ions such as  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$ . It can also induce morphological, physiological, and biochemical changes in plants. The objective was to evaluate the effect of salinity on biometric and biochemical responses in pineapple seedlings. The experiment was conducted in a greenhouse in Campos dos Goytacazes (latitude =  $21^{\circ}19'23''$  S, longitude =  $41^{\circ}10'40''$  W), Brazil, using a 2x5 factorial design, with two cultivars (Pérola and BRS Imperial) and five concentrations of NaCl (0, 40, 80, 120, and 160 mM) added to the Hoagland and Arnon nutrient solution. After 40 days of treatment, were evaluated shoot and root length and their fresh and dry matter; stem diameter; number of leaves; leaf area; total root volume and surface area; average root diameter as well as biochemical substances. The biometric evaluations indicated that NaCl influenced root length means for 'BRS Imperial', with values increasing up to the estimated dose of 59.31 mM. In other characteristics, differences were observed only between cultivars, with 'Pérola' exhibiting greater shoot length and fresh matter, leaf area, stem diameter, and average root diameter. The 'BRS Imperial' exhibited higher means in shoot dry matter, number of leaves, fresh and dry root matter, surface area, and total root volume. The 'BRS Imperial' demonstrated promising adaptations to salinity through morphological changes in the root system, while the 'Pérola' responded with higher production of osmoregulatory substances, such as glycine and proline

**Keywords:** *Ananas comosus* (L.), 'Perola', 'BRS Imperial', salinity

## INTRODUÇÃO

O abacaxizeiro (*Ananas comosus* L.), espécie considerada originária do Brasil, apresenta grande importância econômica e social. Dentre as culturas que têm capacidade de realizar o metabolismo do ácido crassuláceo (CAM), é a mais valiosa economicamente. Além disso, é a única espécie da família Bromeliaceae cultivada comercialmente para produção de frutos. É uma frutífera tropical apreciada globalmente pelo seu sabor, aroma e cor característica, sendo uma das frutas mais tradicionais e consumidas do mundo, *in natura*, ou processada, considerada como a segunda frutífera tropical mais importante, depois da banana, em termos de comércio internacional (Fang et al., 2016; Wang et al., 2020).

A cultura do abacaxizeiro atingiu uma produção mundial de, aproximadamente, 29,3 milhões de toneladas, em uma área colhida com cerca de um milhão de hectares (FAO, 2022). O Brasil tem destaque na fruticultura, pois ocupa posição de maior produtor mundial de frutas tropicais, e o abacaxi é a terceira fruta de maior produção no país, ficando atrás apenas do cultivo de citros e banana. O país ocupa a quarta posição mundial em produção de abacaxi, com produção total de 2,3 milhões de toneladas, em 64 mil hectares e produtividade média em torno de 24 mil frutos por hectare (IBGE, 2022; FAO, 2022).

A demanda crescente por alimentos tem contribuído para a expansão da produção agrícola em áreas com solos degradados por salinidade, inapropriado ao cultivo, possivelmente, em consequência de manejo inadequado da irrigação e do solo, através da prática de irrigação sem sistema de drenagem, aplicação de fertilizantes e defensivos agrícolas com alta concentração de sais (Pedrotti et al., 2015). A salinidade é um dos maiores problemas que afeta a agricultura global, prejudicando cerca de 900 milhões ha de terra, correspondendo a cerca de 20% de terras mundiais e, também, cerca de metade da terra arável total irrigada do planeta (Velmurugan et al., 2020). Além disso, é importante salientar que, no atual cenário de mudanças nos padrões climáticos, com a ocorrência de eventos climáticos extremos, incluindo secas e ondas de calor, algumas áreas agrícolas áridas, semiáridas e costeiras sofrem os maiores impactos dessas mudanças na salinização dos solos (Corwin, 2020).

A salinidade pode acarretar deficiência hídrica por diminuir o potencial da água no solo e pela absorção de íons, como  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  que, em excesso, podem se tornar elementos tóxicos para as plantas, ocasionando estresse osmótico e, além disso, os efeitos deletérios de salinidade para as plantas podem envolver uma série de alterações morfológicas, fisiológicas, bioquímicas e alterações moleculares que afetam adversamente o crescimento e a produtividade (Liu; Chen 2014; Brito et al., 2020; El Ghazali, 2020). Modulação de diferentes mudanças na morfologia do sistema radicular e na anatomia das folhas, alterações no tamanho e no número de organelas (cloroplasto, mitocôndria e peroxissomo), além da modulação de fitohormônios, levam à adaptação da planta durante a salinidade (Acosta-Motos et al., 2017; Zhang; Dai, 2019). A adaptação osmótica é um mecanismo importante para sustentar o turgor celular que, em particular, mantém o crescimento, a produtividade e o rendimento. A planta sintetiza vários osmólitos, como prolina, glicina, betaína e açúcares solúveis (Arif et al., 2020).

Cultivado em áreas dos tabuleiros costeiros do Nordeste e Sudeste do Brasil, o abacaxizeiro está sujeito ao cultivo em locais propícios à ocorrência de acúmulo de sais, principalmente, em regiões áridas e semiáridas. Neste aspecto, se torna um desafio aumentar sua produtividade. Nesse sentido, objetivou-se avaliar o efeito da salinidade nas respostas biométricas e bioquímicas em mudas de abacaxizeiro cultivadas em sistema hidropônico.

## MATERIAL E MÉTODOS

### **Localização experimental**

O experimento foi conduzido em casa de vegetação no campus da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, localizado em Campos dos Goytacazes, no Norte do estado do Rio de Janeiro (latitude =  $21^{\circ}19'23''$  S, longitude =  $41^{\circ}10'40''$  W; altitude = 14 m). Segundo a classificação climática de Köppen, o clima

da Região Norte Fluminense é classificado com Aw, isto é, clima tropical úmido, com verão chuvoso, inverno seco e temperatura do mês mais frio superior a 18°C.

### Condições de cultivo e material vegetal

Durante a condução do experimento, a casa de vegetação foi equipada com um datalogger Hobo modelo U23-001 Pro v2 Onset® para obtenção diária de temperatura e umidade relativa do ar (mínimas, máximas e médias). As leituras obtidas durante o período experimental registraram temperaturas mínima de 10,65°C, máxima de 44,38°C e média de 22,98°C, e umidade relativa mínima de 59,48%, máxima de 99,15% e média de 88,60%, sendo apresentadas na Figura 1.

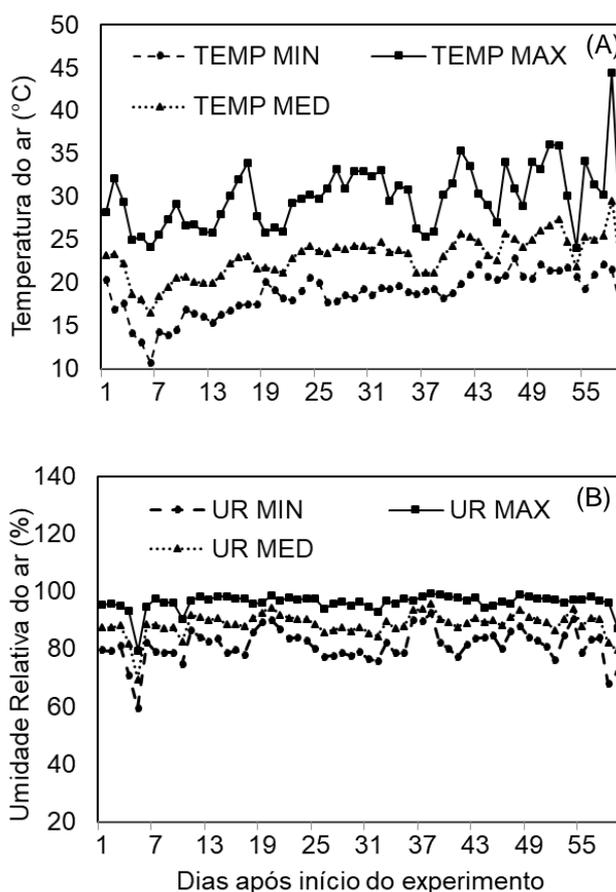


Figura 1. Valores diários de temperatura do ar mínima (TEMP MIN), máxima (TEMP MAX) e média (TEMP MED) (A) em °C e umidade relativa do ar mínima (UR MIN), máxima (UR MAX) e média (UR MED) (B) em % durante o cultivo hidropônico das mudas de duas cultivares de abacaxizeiro (Pérola e BRS Imperial), em casa de vegetação no município de Campos dos Goytacazes-RJ, 2021.

Foram utilizadas mudas do tipo ‘filhote’ de duas cultivares de abacaxizeiro (Pérola e BRS Imperial), coletadas diretamente do campo na lavoura comercial na região Norte do estado do Rio de Janeiro. Inicialmente, foi realizada uma seleção das mudas quanto à sua biometria e aspectos fitossanitários, selecionando-se as mais uniformes, com média de altura de 20 cm e peso de 60 g para sua padronização e homogeneidade.

Em julho de 2021 o experimento foi instalado onde as mudas foram cultivadas em sistema hidropônico. O cultivo das mudas foi feito em recipientes plásticos com capacidade para volume total de dois litros, no qual, foram preenchidos com solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) com modificações (Tabela 1). O recipiente foi coberto com papel alumínio, a fim de evitar o superaquecimento da solução nutritiva e a proliferação de algas.

Tabela 1. Composição da solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) modificada utilizada no experimento. Campos dos Goytacazes, 2021.

Solução estoque	Solução completa mL.L <sup>-1</sup>
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 4H <sub>2</sub> O (2 mol.L <sup>-1</sup> )	1,0
KNO <sub>3</sub> (2 mol.L <sup>-1</sup> )	2,0
NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (1 mol.L <sup>-1</sup> )	0,25
MgSO <sub>4</sub> (1 mol.L <sup>-1</sup> )	2,0
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (1 mol.L <sup>-1</sup> )	0,5
FeEDTA (25 g.L <sup>-1</sup> )	1,0
Micronutrientes*	1,0

\*Micronutrientes: ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O = 578 mg.L<sup>-1</sup>, CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O = 250 mg.L<sup>-1</sup>, MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O = 845 mg.L<sup>-1</sup>, KCl = 3728 mg.L<sup>-1</sup>, (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>·4H<sub>2</sub>O = 88 mg.L<sup>-1</sup>, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> = 1546 mg.L<sup>-1</sup>.

A solução nutritiva foi preparada com água deionizada e o pH da mesma foi ajustado para 5,6-5,8 quando necessário, através de uma solução de HCl ou NaOH (1 M). A aeração da solução nutritiva contida no recipiente plástico se manteve de forma contínua por meio da utilização de bombas de aquário para manter a oxigenação das raízes. Nos primeiros dias, as mudas receberam apenas a solução nutritiva para estímulo do enraizamento e, após este período, os tratamentos foram aplicados.

## **Aplicação dos tratamentos salinos**

Após 20 dias de instalação do experimento, quando as mudas se encontravam enraizadas, os tratamentos salinos foram aplicados. Foram preparadas soluções estoques com cinco concentrações de NaCl (0, 40, 80, 120, 160 mM), no qual foram utilizadas para preparação do volume total necessário para cada troca de solução nutritiva. As concentrações de NaCl utilizadas neste estudo foram selecionadas por meio de pesquisas realizadas na literatura com a cultura do abacaxizeiro (Mendes et al., 2011; Melo et al., 2011; Melo et al., 2016).

Durante a condução do experimento, a solução nutritiva com os tratamentos salinos foi renovada semanalmente. Após 40 dias da aplicação dos tratamentos, o experimento foi encerrado e foram determinadas as variáveis de crescimento e análises bioquímicas na massa seca da parte aérea e da raiz das mudas.

## **Variáveis analisadas**

### Análises biométricas

Para as variáveis de crescimento determinaram-se o comprimento da parte aérea em cm, com auxílio de régua graduada em cm, medindo-se desde o colo da planta até a ponta da folha D; o diâmetro do caule em mm, medido por meio de paquímetro digital; massa fresca da parte aérea e de raízes, em g, através de uma balança semianalítica; e o número de folhas, determinado pela contagem. A medição da área foliar, em cm<sup>2</sup>, foi realizada com auxílio de um medidor de área foliar de bancada modelo LI-3100 LICOR (Lincoln, NE, USA).

As raízes das plantas foram coletadas e, posteriormente, foram analisadas por escaneamento através do scanner EPSON *Expression* 11000XL, equipado com luz adicional (TPU) com resolução de 400 dpi para a leitura biométrica de raízes. Nesse procedimento, as raízes foram distribuídas em uma cubeta com dimensões de 30 x 42 cm, localizada na superfície do equipamento, previamente preenchida com água deionizada para a digitalização da imagem pelo scanner e imediata quantificação das variáveis pelo *software WinRhizo Pro* 2013. Os parâmetros morfológicos determinados foram o comprimento total de raízes em cm, área superficial total de raízes em cm<sup>2</sup>, volume total de raízes em cm<sup>3</sup> e diâmetro médio de raízes em mm.

Na sequência, as raízes e a parte aérea (folha e caule) foram colocadas em sacos de papel e as amostras levadas à estufa de ventilação de ar forçada a 65°C por 72 horas, obtendo-se assim, as respectivas massas secas. Após desidratadas, as amostras foram trituradas em moinho tipo *Willey* com peneira de 20 *mesh* e, em seguida, os materiais foram homogeneizados e armazenados em frascos hermeticamente fechados para análises posteriores.

#### Análises bioquímicas

As análises bioquímicas foram realizadas no Laboratório de Fisiologia Vegetal pertencente à Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), campus Belém/PA.

A concentração de prolina foi determinada de acordo com a metodologia descrita por Bates et al. (1973), e as leituras foram realizadas usando um espectrofotômetro a 520 nm de absorvância com seus resultados expressos em  $\mu\text{mol.g}^{-1}$  de massa seca.

Para determinação de glicina betaína, foi utilizado o método proposto por Greive e Grattan (1983), a leitura espectrofotométrica com absorvância a 365 nm e os resultados expressos em  $\mu\text{g.g}^{-1}$  de massa seca.

A concentração de carboidratos solúveis totais foi obtida conforme o método descrito por Dubois et al. (1956). As leituras foram realizadas em espectrofotômetro a uma absorvância de 490 nm. A concentração é expressa em  $\text{mmol.g}^{-1}$  de massa seca.

Para determinação de sacarose utilizou-se o método de Van Handel (1968). Ao fim do processo foram realizadas as leituras em espectrofotômetro a 620 nm. Os resultados de sacarose foram expressos em  $\text{mg.g}^{-1}$  de massa seca.

A determinação da concentração de nitrato foi realizada através do método preconizado por Cataldo et al. (1975). As leituras foram realizadas em espectrofotômetro na absorvância de 410 nm. Os resultados obtidos foram expressos em  $\text{mmol.kg}^{-1}$  de massa seca.

As determinações de aminoácidos solúveis totais seguiram o método proposto por Yemm e Cocking (1955), as leituras foram realizadas no espectrofotômetro a 570 nm. A concentração é expressa em  $\mu\text{mol.g}^{-1}$  de massa seca.

Concentrações de proteínas solúveis totais foram determinadas segundo o método proposto por Bradford (1976). As leituras foram feitas em espectrofotômetro

no comprimento de onda de 595 nm. Os resultados de proteínas solúveis totais foram expressos em  $\text{mg.g}^{-1}$  de massa seca.

### **Desenho experimental e análise estatística**

O delineamento experimental adotado foi em blocos completamente casualizados (DBC) em esquema fatorial 2x5, com duas cultivares (Pérola e BRS Imperial) e cinco concentrações de NaCl (0, 40, 80, 120 e 160 mM) adicionados na solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) e quatro repetições. Cada unidade experimental foi composta por duas mudas, sendo estas conduzidas em vasos separados, totalizando 80 mudas no experimento.

A análise dos dados foi realizada no *software R* (R Core Team, 2014), com auxílio do pacote *ExpDes.pt*. versão 1.2.2 (Ferreira et al., 2021), no qual, foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F e averiguada a normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro Wilk, ambos ao nível de 5% de probabilidade. Em seguida, foi aplicado o teste de comparação de médias de Tukey para as cultivares (fator qualitativo) e análise de regressão para as diferentes concentrações de NaCl (fator quantitativo) ao nível 5% de significância. Para confecções dos gráficos foi utilizado o pacote *ggplot2* versão 3.4.1 (Wickham, 2016) e o editor de imagens *inkscape*.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Verificou-se interação significativa para o comprimento de raízes, com a cultivar BRS Imperial sendo afetada pelo uso de NaCl na solução (Figura 2). Estimou-se, em modelo de regressão quadrática, com ajuste de coeficiente de determinação igual a 80%, o comprimento de raízes de até 31,18 cm, na concentração de 59,31 mM de NaCl, onde observa-se na curva da regressão que, a partir dessa concentração salina, houve redução no comprimento radicular. A cultivar BRS Imperial só não

obteve maior comprimento de raízes em comparação com a cultivar Pérola, quando se utilizou a concentração de 160 mM de NaCl.

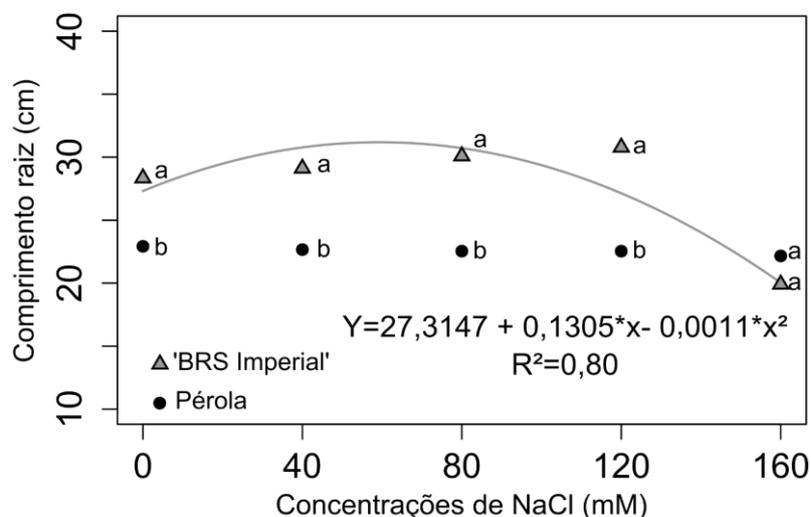


Figura 2. Comprimento de raiz de duas cultivares de abacaxizeiro (BRS Imperial e Pérola), submetidas às concentrações crescentes de NaCl na solução nutritiva. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre as cultivares na mesma concentração de NaCl.

Pesquisas evidenciam que, em condições de salinidade, as plantas apresentam redução no crescimento radicular. Sousa et al. (2019) avaliaram o crescimento do morangueiro submetidos aos diferentes níveis de salinidade e observaram redução máxima de 30% no crescimento radicular. Em um estudo com a cultivar de abacaxizeiro Smooth Cayenne, Samuel et al. (2018) observaram que a adição de NaCl inibiu, de forma considerável, o crescimento no comprimento de radicular.

Para as características comprimento da parte aérea, massa fresca e seca da parte aérea; massa fresca e seca de raiz; diâmetro do caule; número de folhas; área foliar; área superficial total de raízes; volume total de raízes e diâmetro médio de raízes não foram observadas diferenças significativas quando se elevou as concentrações de NaCl, sendo observado efeito significativo entre as cultivares.

Observou-se que a cultivar Pérola apresentou maior comprimento (Figura 3A) e massa fresca (Figura 3B) da parte aérea; área foliar (Figura 3C); diâmetro do caule (Figura 3D) e diâmetro médio de raízes (Figura 3E), com médias respectivas de 30 cm, 100 g, 533 cm<sup>2</sup>, 22 mm e 0,73 mm. Já a 'BRS Imperial' exibiu resultados de médias inferiores, respectivamente, de 24 cm, 86 g, 358 cm<sup>2</sup>, 20 mm e 0,68 mm.

No entanto, para as variáveis: massa seca da parte aérea (Figura 4A); número de folhas (Figura 4B); massa fresca (Figura 4C) e seca (Figura 4D) de raiz; área superficial total de raízes (Figura 4E); e volume total de raízes (Figura 4F); a cultivar BRS Imperial exibiu médias superiores com os referentes percentuais de aumento de 8,1%; 6,6%; 17,2%; 12,4%; 30,9% e 26,5%, para esses parâmetros, em comparação com a cultivar Pérola.

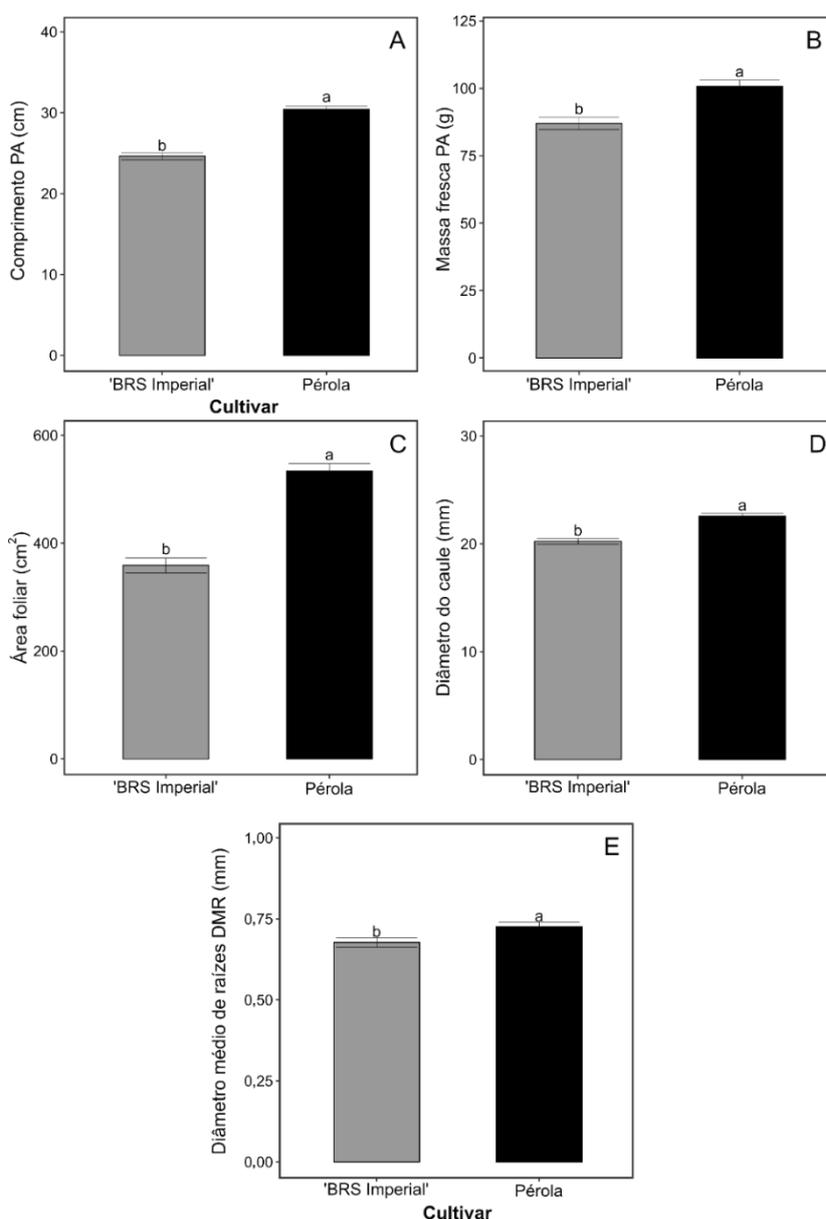


Figura 3. Comprimento da parte aérea (A), massa fresca da parte aérea (B), área foliar (C), diâmetro do caule (D) e diâmetro médio das raízes (E) das mudas de duas cultivares de abacaxizeiro (BRS Imperial e Pérola), submetidas às concentrações de NaCl na solução nutritiva. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre as cultivares. As barras representam o erro padrão.

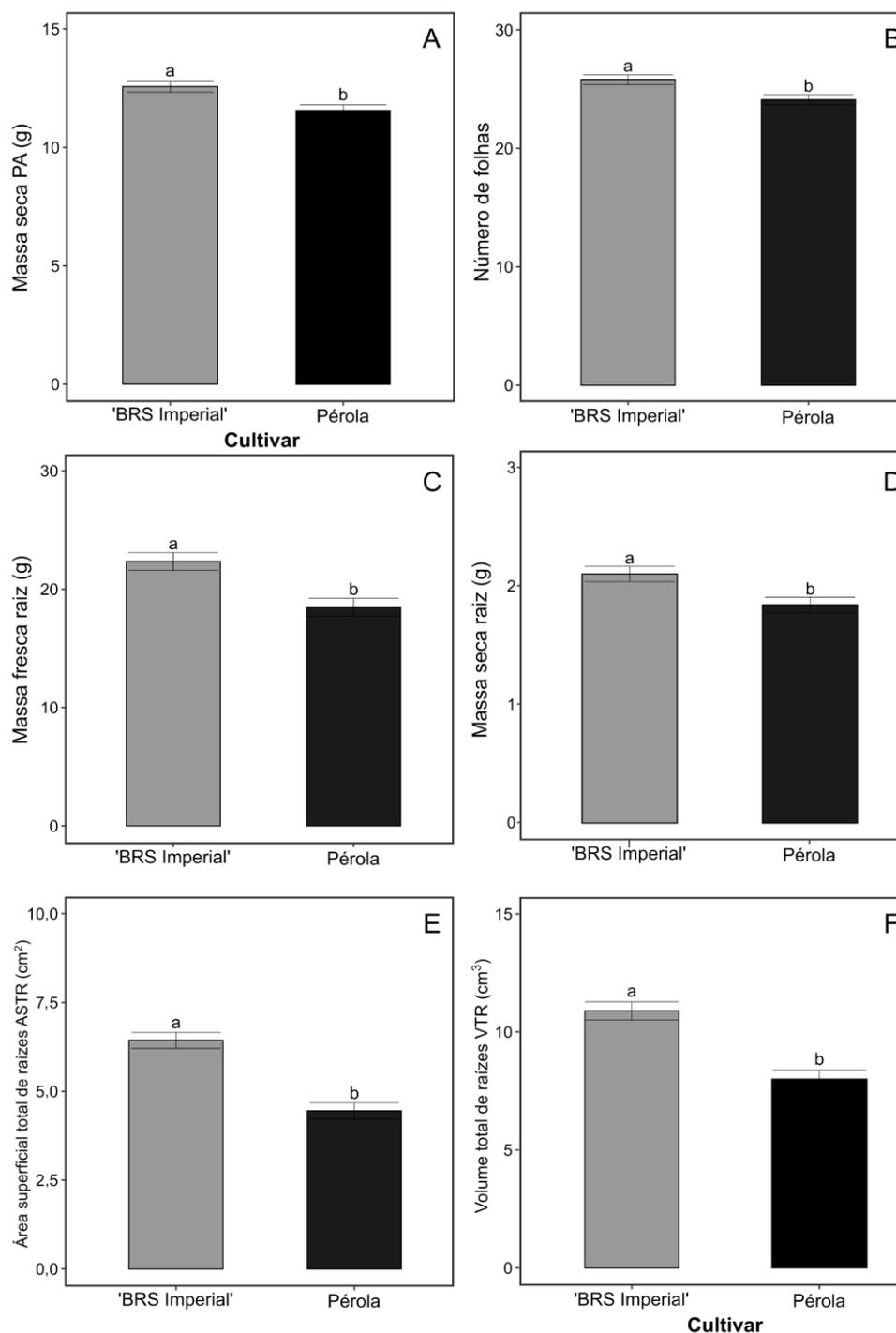


Figura 4. Massa seca da parte aérea (A), número de folhas (B), massa fresca da raiz (C), massa seca da raiz (D), área superficial total de raízes (E) e volume total de raízes (F) das mudas de duas cultivares de abacaxizeiro (BRS Imperial e Pérola), submetidas às concentrações de NaCl na solução nutritiva. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre as cultivares. As barras representam o erro padrão.

As análises morfológicas de raiz apresentaram resultados promissores para a 'BRS Imperial' pois, tanto para massa fresca e seca de raiz, área superficial total e volume total de raízes, esta cultivar mostrou-se mais adaptada às condições de cultivo em comparação com a Pérola, por apresentar médias superiores, favorecendo os parâmetros morfológicos estudados.

A arquitetura e expansão do sistema radicular é regulada, principalmente, pela eficiência de absorção de água e nutrientes minerais que são importantes para o desenvolvimento vegetal. A arquitetura do sistema radicular, composta por características estruturais, como: comprimento da raiz, extensão, número e comprimento das raízes laterais, entre outras características, apresenta grande plasticidade em resposta às mudanças ambientais e estresse por salinidade e o estudo dessas características pode ser fundamental para o desenvolvimento de culturas com raízes mais eficientes (Khan et al., 2016).

As plantas usam a plasticidade de suas raízes para sobreviver em condições de estresse. Um aumento no comprimento da raiz lateral de terceira ordem, no estudo realizado por Arif et al. (2019), destaca a plasticidade do sistema radicular sob estresse salino. Esse alongamento das raízes é o resultado da divisão celular e da expansão celular no meristema apical da raiz. Podemos inferir que a salinidade pode alterar o alongamento da raiz, promovendo a divisão e expansão celular, o que pode ter ocorrido na cultivar BRS Imperial do presente estudo.

Ao contrário do que houve com as raízes, a cultivar Pérola apresentou maior comprimento e massa fresca da parte aérea, área foliar e diâmetro do caule em comparação com a 'BRS Imperial'. Isso evidencia que, possivelmente, essa cultivar apresentou como resposta o destino de fotoassimilados para incremento da parte aérea. Além disso, a cultivar Pérola tem como características, apresentar um porte médio e folhas longas (Santos; Borém, 2019).

Em contrapartida, a massa seca da parte aérea não apresentou o mesmo comportamento que a variável massa fresca na cultivar Pérola, visto que, para este parâmetro, a cultivar BRS Imperial apresentou as maiores médias. Esse resultado pode estar relacionado à quantidade de água armazenada na planta, no qual, as plantas da cultivar Pérola possivelmente apresentaram um acúmulo de água maior e, após o processo de desidratação, a massa seca nesta cultivar apresentou redução. A fotografia das mudas com evidências de suas características biométricas pode ser observada na Figura 5.

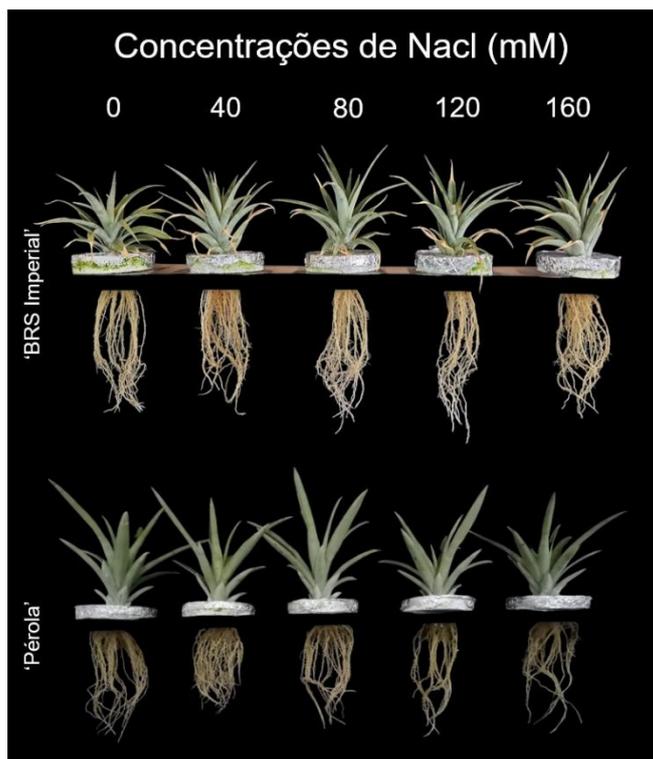


Figura 5. Fotos das mudas de duas cultivares de abacaxizeiro (BRS Imperial e Pérola), submetidas às concentrações crescentes de NaCl na solução nutritiva.

Nas análises das variáveis bioquímicas, para a prolina na parte aérea, os resultados destacam que houve significância apenas entre as cultivares. As concentrações de prolina na 'Pérola' foram notavelmente superiores, registrando um aumento de 15,4% em comparação com a 'BRS Imperial' (Figura 6A). No que se refere às concentrações de prolina nas raízes, observou-se que o modelo de regressão quadrática proporcionou o melhor ajuste, exibindo um coeficiente de determinação notável de 93% para 'Pérola'. Por outro lado, para a 'BRS Imperial', a ausência de um ajuste de regressão refletiu em uma média geral de  $2,47 \mu\text{mol.g}^{-1}$  MS (Figura 6B).

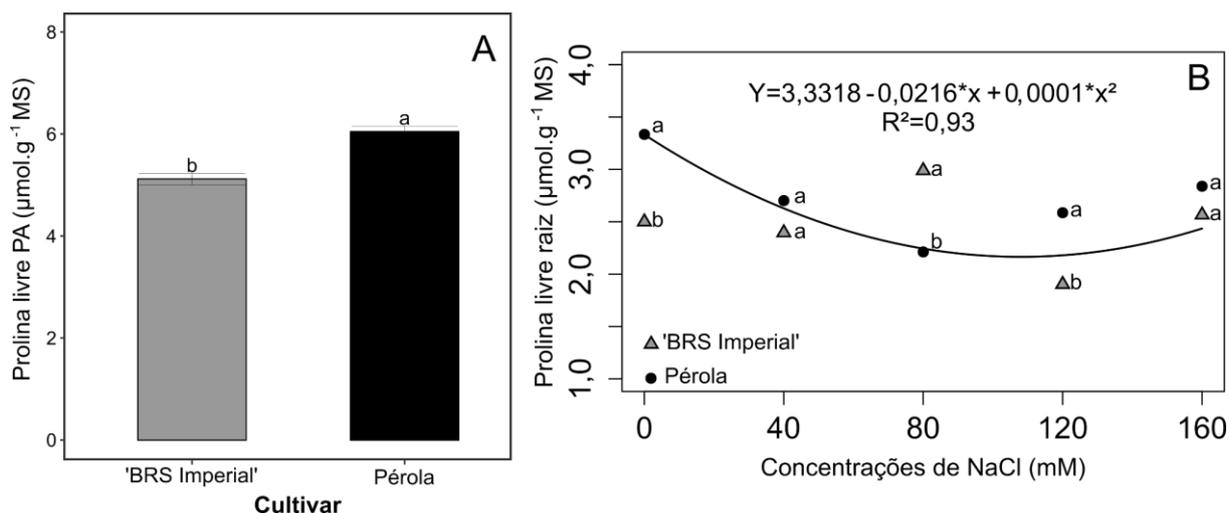


Figura 6. Prolina na parte aérea (A) e raízes (B) das mudas de duas cultivares de abacaxizeiro (BRS Imperial e Pérola), submetidas às concentrações crescentes de NaCl na solução nutritiva. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre as cultivares na mesma concentração de NaCl. As barras representam o erro padrão.

Na variável glicina betaína, na parte aérea, houve diferença significativa na interação dos fatores, no qual, para a cultivar Pérola, o modelo de regressão linear (Figura 7A) foi o que mais se ajustou, exibindo um coeficiente de determinação de 98%, onde houve incrementos de 39% na concentração 160 mM de NaCl em relação ao tratamento sem aplicação salina, enquanto para a cultivar BRS Imperial, o modelo de regressão quadrática foi o que melhor se ajustou, com um coeficiente de determinação de 90%, alcançando um valor máximo de 31,65 µg.g<sup>-1</sup>, estimado em 41,92 mM de NaCl. Na curva de regressão é possível perceber que, a partir dessa concentração salina, houve redução na produção deste composto, onde a concentração de 160 mM propiciou a menor concentração de glicina betaína. Nas raízes (Figura 7B), o modelo que mais se ajustou foi a regressão quadrática para a 'Pérola', com a máxima concentração de glicina betaína de 50,78 µg.g<sup>-1</sup> de MS, estimada em 94,2 mM de NaCl, enquanto não houve ajuste de regressão para a cultivar BRS Imperial, com média geral de 31,24 µg.g<sup>-1</sup> de MS.

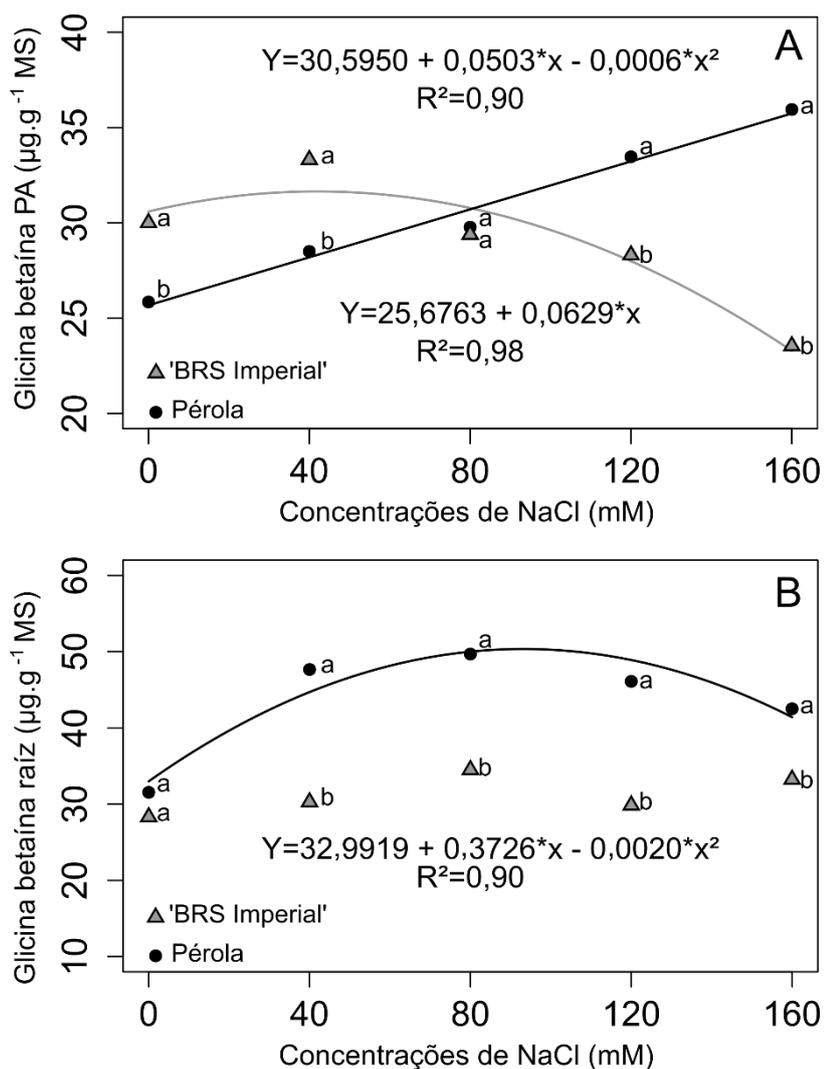


Figura 7. Glicina betaína na parte aérea (A), raízes (B) das mudas de duas cultivares de abacaxizeiro (BRS Imperial e Pérola), submetidas às concentrações crescentes de NaCl na solução nutritiva. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre as cultivares na mesma concentração de NaCl.

Quando as plantas se encontram em condições de estresse salino, estas são capazes de acionar diversos mecanismos de repostas a essas condições desfavoráveis. Neste sentido, há alguns compostos chamados osmólitos compatíveis, ou osmoprotetores, que atuam no ajuste osmótico das células. Dentre estes, pode-se citar o aminoácido prolina e a glicina betaína. Quando em grandes quantidades dentro da planta, essas substâncias não alteram negativamente seu metabolismo e se acumulam de forma a ajustar a quantidade de água na célula, evitando perdas excessivas pelo controle do potencial osmótico (Szabados et al., 2011; Arif et al., 2020). Além disso, também desempenham função de proteção à membrana

plasmática como antioxidantes, e na manutenção das quantidades de carbono e nitrogênio em plantas que estão se recuperando do estresse (Gupta; Huang, 2014).

Na pesquisa notou-se que, a partir dos resultados, de maneira geral, a cultivar Pérola foi a que apresentou uma maior produção dessas substâncias. A maior produção destas substâncias osmorreguladoras é um indicativo de repostas do mecanismo de defesa no metabolismo vegetal promovido pelas condições salinas.

Alam et al. (2020) observaram aumento na concentração de prolina em porta enxertos de citros irrigados com água salina, indicando um mecanismo de defesa da planta contra os efeitos adversos da salinidade. Uma extensa pesquisa descobriu que a glicina betaína é importante para manter o ajuste osmótico, discriminando a razão  $\text{Na}^+$  para  $\text{K}^+$ , e, ao se acumular na célula, em particular, leva à diminuição dos efeitos tóxicos de íons (Singh et al., 2015).

Para as concentrações de carboidratos solúveis totais, houve diferença significativa apenas na parte aérea entre as cultivares estudadas, independente das concentrações salinas, onde observa-se (Figura 8A) que as concentrações na cultivar BRS Imperial foram 20,2% superiores que na cultivar Pérola. Para as raízes, não houve significância.

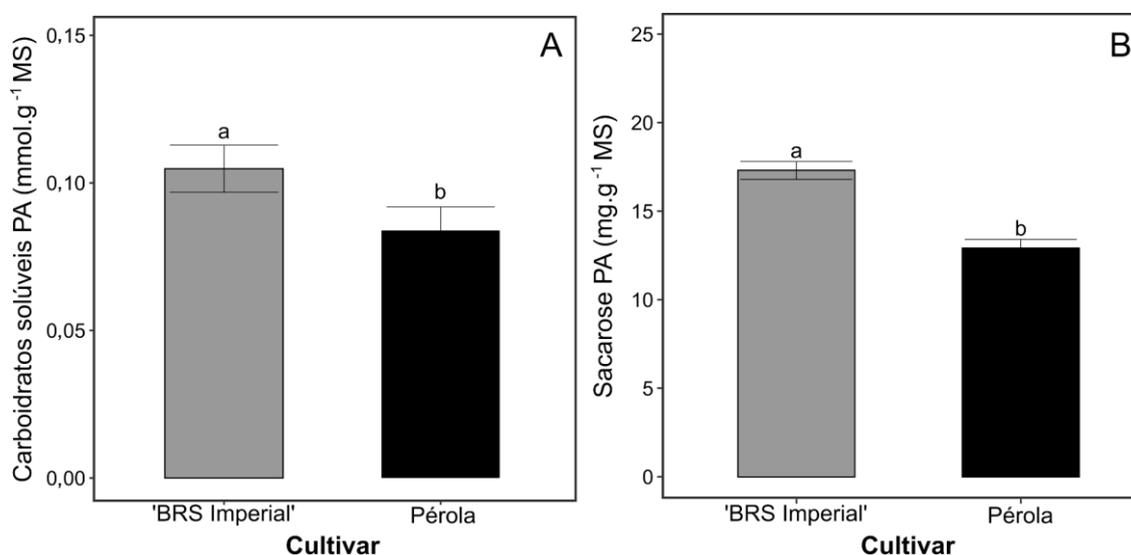


Figura 8. Carboidratos solúveis totais (A) e sacarose (B) na parte aérea das mudas de duas cultivares de abacaxizeiro (BRS Imperial e Pérola), submetidas às concentrações de NaCl na solução nutritiva. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre as cultivares. As barras representam o erro padrão.

Na produção de sacarose na parte aérea (Figura 8B), observou-se diferença significativa apenas no fator qualitativo (cultivares), onde a produção deste composto foi 25,4% maior na cultivar BRS Imperial. Nas raízes, houve significância na interação dos fatores, porém, não houve ajuste ao modelo de regressão para explicação biológica destes resultados.

Além dos osmolitos prolina e glicina betaína, outros solutos orgânicos também se acumulam nas plantas para mitigar o estresse osmótico, como os açúcares, os carboidratos solúveis totais e o dissacarídeo sacarose (Liu et al., 2020, Li et al., 2023). Os açúcares podem fornecer proteção osmótica que ajuda a aliviar os efeitos nocivos do estresse salino. Aumentos de glicose, frutose e sacarose fornecem estoques de carbono benéficos, além de manter o equilíbrio osmótico e eliminar espécies reativas de oxigênio tóxicas (ERO) (Singh et al., 2015).

Em nossa pesquisa, verificamos que, ao contrário do que houve com a prolina e glicina, que apresentaram maiores concentrações na cultivar Pérola, a cultivar BRS Imperial acumulou estes açúcares em sua parte aérea. A sacarose é um dos principais produtos da fotossíntese, sintetizada pela enzima sacarose fosfato sintase (SPS) e, principalmente, hidrolisada pela invertase e sacarose sintase em órgãos fotossintéticos e heterotróficos (Ruan et al., 2010). O estresse salino aumenta os níveis de atividade do SPS, promove a síntese de sacarose e aumenta a produção de amido (Li et al., 2020).

Na concentração de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), os resultados expressaram significância apenas na parte aérea e entre as cultivares, ou seja, as diferentes concentrações salinas não apresentaram influência na produção desse composto. A partir do teste de média, observou-se que a cultivar Pérola (Figura 9A) foi a que teve maior produção de  $\text{NO}_3^-$ , com média de 0,742 mmol de  $\text{NO}_3^- \cdot \text{kg}^{-1}$ , enquanto a cultivar BRS Imperial expressou média de 0,704 mmol. $\text{kg}^{-1}$ .

Ao analisar as concentrações de aminoácidos solúveis totais, observamos diferença significativa apenas na parte aérea entre as cultivares estudadas, no qual, a cultivar BRS Imperial apresentou concentrações de 317,02  $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$  e a cultivar Pérola, de 265,97  $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$  de MS de aminoácidos solúveis totais, ou seja, um incremento de aproximadamente 16,1% (Figura 9B).

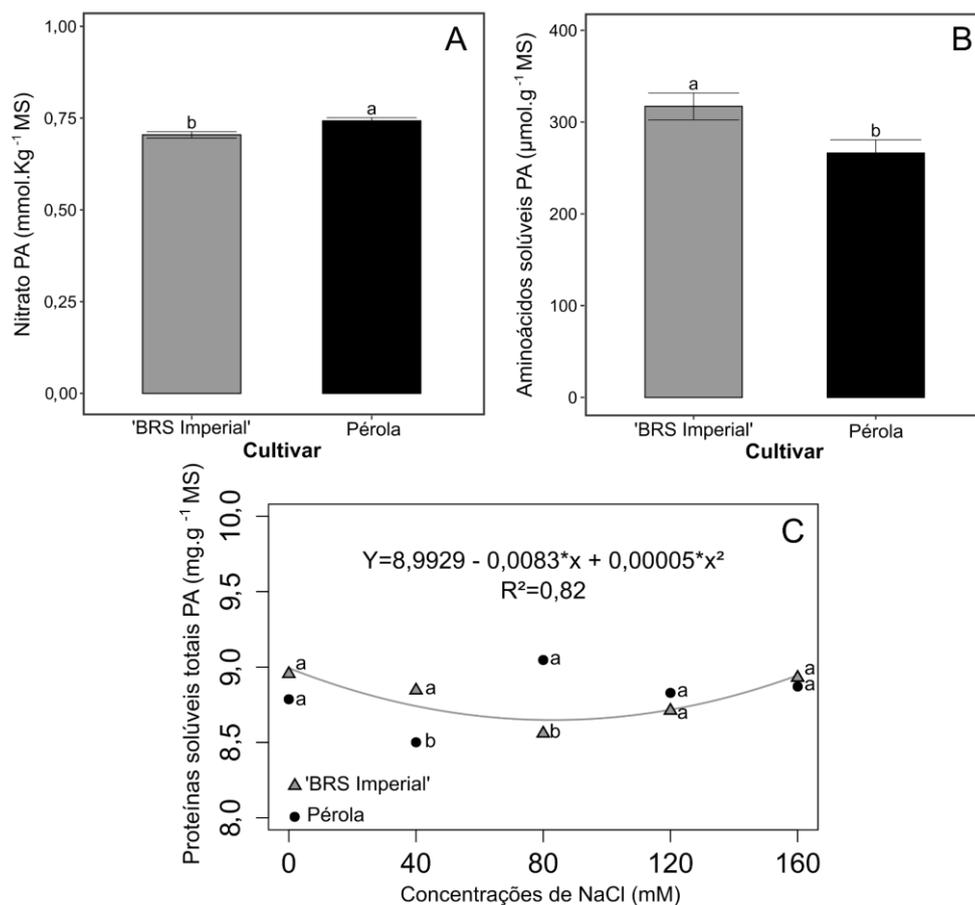


Figura 9. Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) (A), aminoácidos solúveis totais (B) e proteínas solúveis totais (C) da parte aérea de mudas de duas cultivares de abacaxizeiro (BRS Imperial e Pérola) submetidas às concentrações crescentes de NaCl na solução nutritiva. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre as cultivares na mesma concentração de NaCl. As barras representam o erro padrão.

Para as concentrações de proteínas solúveis totais da parte aérea, houve significância na interação dos fatores, no qual, para cultivar BRS Imperial, o modelo de regressão quadrática (Figura 9C) foi o que mais se ajustou, exibindo um coeficiente de determinação de 82%. Entretanto, para a cultivar Pérola, não houve ajuste ao modelo de regressão, apresentando como resultado uma média geral de  $8,81 \text{ mg.g}^{-1}$  de MS de proteínas solúveis totais. Não houve significância em nenhum dos fatores para as raízes.

Em nosso estudo, verificamos que a produção de aminoácidos solúveis totais também foi expressiva na cultivar BRS Imperial. Em um estudo realizado com porta-enxertos de pistache, associados aos estresses abióticos (seca e salinidade), a produção de aminoácidos livres totais e carboidratos solúveis totais foram

aumentados nos estresses por seca e salinidade, enquanto o teor de proteína diminuiu, possivelmente, pela indução do processo de desnaturação de proteínas (Goharrizi et al., 2020).

## CONCLUSÕES

No período de 40 dias, todas as variáveis de crescimento: comprimento da parte aérea e raiz e suas massas fresca e seca; diâmetro do caule; número de folhas; área foliar; volume total; área superficial e diâmetro médio radicular; analisadas no estudo, exceto o comprimento radicular, não são afetadas com as concentrações crescentes de NaCl, porém, as cultivares apresentam comportamentos distintos.

Na 'BRS Imperial', a redução do comprimento radicular começa a partir de 59,31 mM de NaCl e a concentração de 160 mM de NaCl foi destacada como aquela que causa a menor capacidade de crescimento radicular.

Os resultados indicam que a 'BRS Imperial' apresenta uma resposta adaptativa favorável em relação ao crescimento e desenvolvimento em ambientes salinos, particularmente evidente nas características morfológicas das raízes. Portanto, recomenda-se o cultivo desta cultivar em condições salinas.

A cultivar Pérola demonstrou-se mais sensível ao efeito da salinidade, adotando como estratégias de defesa o ajuste osmótico, evidenciadas pelas concentrações mais elevadas de osmoprotetores glicina betaína e prolina.

## AGRADECIMENTOS

A Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

Brasil (CAPES) pelo apoio financeiro, à Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) e ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal UENF.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta-Motos, J., Ortuno, M., Bernal-Vicente, A., Diaz-Vivancos, P., Sanchez-Blanco, M., Hernandez, J. (2017) Plant responses to salt stress: adaptive mechanisms. *Agronomy*, 7 (1): 18. <https://doi.org/10.3390/agronomy7010018>.
- Alam, A., Ullah, H., Attia, A., Datta, A. (2020) Effects of Salinity Stress on Growth, Mineral Nutrient Accumulation and Biochemical Parameters of Seedlings of Three Citrus Rootstocks. *International Journal of Fruit Science*, 20 (04): 786-804. <https://doi.org/10.1080/15538362.2019.1674762>.
- Arif, M. R., Islam, M. T., Robin, A. H. K. (2019) Salinity Stress Alters Root Morphology and Root Hair Traits in *Brassica napus*. *Plants*, 8 (7): 192. <https://doi.org/10.3390/plants8070192>.
- Arif, Y., Singh, P., Siddiqui, H., Bajguz, A., Hayat, S. (2020) Salinity induced physiological and biochemical changes in plants: An omic approach towards salt stress tolerance. *Plant Physiology and Biochemistry*, 156: 64-77. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.08.042>.
- Bates, L. S., Waldren, R. P., Teare, I. D. (1973) Rapid determination of free proline for water-stress studies. Short communication. *Plant and Soil*, 39: 205-207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>.
- Bradford, M. (1976) A Rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72: 248-254. DOI: 10.1006/abio.1976.9999.

- Brito, C. F. B., Fonseca, V. A., Santos, M. R., Donato, S. L. R., Arantes, A.M., Santos, A.J. (2020). Photochemical efficiency in pineapple plants under saline water irrigation. *Revista Ambiente & Água*, 15 (5): e2564. <https://doi.org/10.4136/ambiente-agua.2564>.
- Cataldo, D. A., Haroon, M., Schrader, L., Youngs, V. (1975). Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 6: 71-80. DOI: 10.1080/00103627509366547.
- Corwin, D. L. (2020). Climate change impacts on soil salinity in agricultural areas. *European Journal of Soil Science*. <https://doi.org/10.1111/ejss.13010>.
- Dubois, M., Giles, K. A., Hamilton, J. K., Robers, P. A., Smithanal, F., Chem. (1956) Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28 (3): 350-356. <http://dx.doi.org/10.1021/ac60111a017>.
- El Ghazali, G. E. B. (2020) Suaeda vermiculata Forssk. ex J.F. Gmel.: structural characteristics and adaptations to salinity and drought: a review. *International Journal of Sciences*, 9 (02): 28-33. DOI: 10.18483/ijSci.2268.
- Fang, J., Miao, C., Chen, R., Ming, R. (2016). Genome-wide comparative analysis of microsatellites in pineapple. *Tropical Plant Biology*, v. 9, p. 117-135.
- FAO. (2022) Food and Agriculture Organization. FAOSTAT. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2024.
- Ferreira, E. B., Cavalcante, P. P., Nogueira, D. A. (2021) ExpDes.pt: Pacote Experimental Designs (Portugues). R package version 1.2.2. <https://CRAN.R-project.org/package=ExpDes.pt>.

- Goharrizi, K. J., Baghizadeh, A., Kalantar, M., Fatehi, F. (2020) Combined effects of salinity and drought on physiological and biochemical characteristics of pistachio rootstocks. *Scientia Horticulturae*, 261 (5): 108970. DOI:10.1016/j.scienta.2019.108970.
- Greive, C. M, Grattan, S. R. (1983) Rapid assay for determination of water-soluble quaternary amino compounds. *Plant Soil*, 70, 303-307. <https://doi.org/10.1007/BF02374789>.
- Gupta, B., Huang, B. (2014) Mechanism of salinity tolerance in plants: physiological, biochemical, and molecular characterization. *International Journal of Genomics*, 1: 1-18. DOI: 10.1155/2014/701596.
- H, Wickham. (2016) ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York. <https://ggplot2.tidyverse.org>.
- Hoagland, D. R., Arnon, D. I. (1950). The waterculture method for growing plants without soil. Berkeley, CA: California Agricultural Experiment Station (Circ. 347).
- IBGE. (2022) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/14/10193>>. Acesso em: 10 de janeiro 2024.
- Khan, M. A., Gemenet, D. C., Villordon, A. (2016) Root System Architecture and Abiotic Stress Tolerance: Current Knowledge in Root and Tuber Crops. *Frontiers in Plant Science*, v. 7, p.1584. DOI: 10.3389/fpls.2016.01584.
- Li, S., Li, Y., Gao, Y., He, X., Li, Q. (2020) Effects of CO<sub>2</sub> enrichment on non-structural carbohydrate metabolism in leaves of cucumber seedlings under salt stress. *Scientia Horticulturae*, v. 265, p. 109275. DOI: 10.1016/j.scienta.2020.109275

- Liu, C., Chen, J. (2014) Effects of Salt Stress on Growth, Ion Concentration, and Quality of Pineapple Fruits. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 45: 1949-1960. DOI: 10.1080/00103624.2014.909837.
- Liu, L., Wang, B., Liu, D., Zou, C., Wu, P., Wang, Z., Li, C. (2020) Transcriptomic and metabolomic analyses reveal mechanisms of adaptation to salinity in which carbon and nitrogen metabolism is altered in sugar beet roots. *BMC Plant Biology*, 20 (138): 1-21. doi:10.1186/s12870-020-02349-9.
- Li, Y., Chu, Y., Yao, K., Shi, C., Deng, X., Lin, J. (2023) Response of sugar metabolism in the cotyledons and roots of *Ricinus communis* subjected to salt stress. *Plant Biology* 25: 62-71. <https://doi.org/10.1111/plb.13475>.
- Melo, Y. L., Gomes, I. A., Dantas, C. V. S., Brito, L. K. F., Oliveira, M. D. M., Macêdo, C. E. C. (2011) Indicadores de estresse salino em abacaxizeiro cultivado na ausência e presença de fitorreguladores. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 33 (3): 698-705. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452011005000104>.
- Melo, Y. L., Dantas, C. V. S., Melo, Y. L., Maia, J. M., Macêdo, C. E. C. (2016) Changes in osmotic and ionic indicators in *Ananas comosus* (L.) cv. MD Gold pre-treated with phytohormones and submitted to saline médium. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 39, (2): e-155. <https://doi.org/10.1590/0100-29452017155>.
- Mendes, B. S. S., Willadino, L., Cunha, P. C., Oliveira Filho, R. A., Camara, T. R. (2011) Mecanismo fisiológicos e bioquímicos do abacaxi ornamental sob estresse salino. *Revista Caatinga*, 24 (3): 71-77.
- Pedrotti, A., Chagas, R. M., Ramos, V.C., Prata, A. P. do N., Lucas, A. A. T., Santos, P. B. dos. (2015) Causas e consequências do processo de salinização dos solos. *Revista Eletrônica Em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 19, (2): 1308-1324. DOI: 105902/2236117016544.
- R Core Team. (2014) R: A Language and Environment for Statistical Computing. Available from URL. <http://www.r-project.org>

- Ruan, Y. -L., Jin, Y., Yang, Y. -J., Li, G. -J., Boyer, J. S. (2010) Sugar Input, Metabolism, and Signaling Mediated by Invertase: Roles in Development, Yield Potential, and Response to Drought and Heat. *Molecular Plant*, 3 (6): 942-955. DOI:10.1093/mp/ssq044.
- Samuel, K., Salomé, Y., Souleymane, C., Hilaire, K. (2018) Effect of salinity on some morphophysiological characters of somatic embryogenesis-regenerated plants of pineapple [*Ananas comosus* (L.) Merr. cv. Smooth Cayenne]. *Journal of Recent Advances in Applied Sciences*, 31 (1): 1-9.
- Santos, C. E. M., Borém, A. (2019) Abacaxi do plantio à colheita. Viçosa (MG)1. Ed. Editora UFV. 202p.
- Singh, M., Kumar, J., Singh, S., Singh, V.P., Prasad, S.M. (2015) Roles of osmoprotectants in improving salinity and drought tolerance in plants: A review. Reviews. *Environmental Science and Biotechnology*, 14: 407-426. <https://doi.org/10.1007/s11157-015-9372-8>.
- Sousa, C. G., Souza, M. V. P., Guilherme, J. M. S., Silva Junior, F. B., Freitas, A. G. S., Viana, T. V. A. (2019) Crescimento de morangueiro submetido a níveis de salinidade e adubação orgânica. *Revista Verde*, 14 (4): 485-490.
- Szabados, L., Kova, H., Zilberstein, A.Z., Bouchereau, A. (2011) Plants in extreme environments: Importance of Protective Compounds in Stress Tolerance. *Advances in Botanical Research*, 57: 105-150.
- Van Handel, E. (1968). Direct microdetermination of sucrose. *Analytical Biochemistry*. v. 22, p. 280-283.
- Velmurugan, A., Swarnam, P., Subramani, T., Meena, B., Kaledhonkar, M.J. (2020). Water Demand and Salinity. Desalination - Challenges and Opportunities. IntechOpen, 1-11. <https://doi.org/10.5772/intechopen.88095>.

Wang, L., Li, Y., Jin, X., Liu, L., Dai, X., Liu, Y., Zhao, L., Zheng, P., Wang, X., Liu, Y., Zhao, L., Zheng, P., Wang, X., Liu, Y., Lin, D., Qin. (2020). Floral transcriptomes reveal gene networks in pineapple floral growth and fruit development. *Communications biology*, 3 (500): 1-15.

Yemm, E.W.; Cocking, E.C. (1955). The determination of amino-acids with ninhydrin. *Analyst*, 80: 209-213.

Zhang, Q., Dai, W. (2019). Plant response to salinity stress. In: Dai, W. (Ed.), *Stress Physiology of Woody Plants*. CRC Press, Boca Raton, p. 155-173.

### 3.2 BIOMETRIA, ATIVIDADE BIOQUÍMICA E COMPOSIÇÃO NUTRICIONAL EM ABACAXIZEIRO 'BRS IMPERIAL' CULTIVADO EM CONDIÇÕES SALINAS COM SILÍCIO

#### RESUMO

O abacaxizeiro é uma cultura alternativa, principalmente em regiões áridas e semiáridas, estando sujeito ao cultivo em locais propícios à ocorrência de acúmulo de sais. Porém, existem poucos estudos com a cultura que englobem avaliação do crescimento e metabolismo em condições salinas e, principalmente, atrelado ao uso do Si. Nesse sentido, objetivou-se avaliar a biometria, atividade bioquímica e composição nutricional em mudas de abacaxizeiro 'BRS Imperial', cultivado em condições salinas com silício. O experimento foi conduzido em casa de vegetação em Campos dos Goytacazes, Brasil, em delineamento de blocos ao acaso, no esquema fatorial 3x2, com três concentrações de NaCl (0, 1,5 e 3,5 mS.cm<sup>-1</sup>) e duas concentrações de silício (0 e 1,5 mM) adicionados na solução nutritiva. Após 126 dias de tratamento, avaliou-se o comprimento da parte aérea e raiz e suas massas fresca e seca; diâmetro do caule; número de folhas; área foliar; volume total; área superficial e diâmetro médio radicular; substâncias bioquímicas e teor de N, Si, Na, e Cl. Os resultados revelaram que as variáveis biométricas relacionadas à parte aérea, como comprimento, massa fresca e seca, e área foliar, foram significativamente reduzidas em plantas expostas à salinidade, enquanto a adição de Si não teve um efeito significativo. Em contrapartida, a aplicação de Si promoveu um aumento no comprimento radicular, área superficial e volume total das raízes em algumas condições. As análises bioquímicas mostraram que o Si contribuiu para o aumento dos carboidratos solúveis totais e glicina na parte aérea. No entanto, a adição de Si não incrementou o teor de N, nem reduziu consistentemente os níveis de Na nas plantas expostas à salinidade para o teor Cl. O Si promoveu efeitos variáveis, com redução nas raízes, na condição de 5,5 mS.cm<sup>-1</sup>. Conseqüentemente, os efeitos adversos da salinidade causada pelo NaCl nas mudas de abacaxizeiro 'BRS Imperial' foram, principalmente, atribuídos ao excesso de sódio.

**Palavras-chave:** *Ananas comosus* (L.), salinidade, suplementação com Si

BIOMETRICS, BIOCHEMICAL ACTIVITY, AND NUTRITIONAL COMPOSITION IN  
'BRS IMPERIAL' PINEAPPLE CULTIVATED UNDER SALINE CONDITIONS WITH  
SILICON

ABSTRACT

The pineapple is an alternative crop, particularly in arid and semi-arid regions, subject to cultivation in locations prone to salt accumulation. However, there are few studies on the crop that encompass growth and metabolism assessment under saline conditions, primarily linked to Si usage. In this regard, the aim was to evaluate biometrics, biochemical activity, and nutritional composition in 'BRS Imperial' pineapple seedlings cultivated under saline conditions with silicon. The experiment was conducted in a greenhouse in Campos dos Goytacazes, Brazil, using a randomized block design in a 3x2 factorial scheme, with three NaCl concentrations (0, 1.5, and 3.5  $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) and two silicon concentrations (0 and 1.5 mM) added to the nutrient solution. After 126 days of treatment, were evaluated shoot and root length and their fresh and dry matter; stem diameter; number of leaves; leaf area; total root volume and surface area; average root diameter, biochemical substances, and N, Si, Na, and Cl content. The results revealed that biometric variables related to the shoot, such as length, fresh and dry matter, and leaf area, were significantly reduced in plants exposed to salinity, while Si addition did not have a significant effect. Conversely, Si application promoted an increase in root length, surface area, and total volume of roots under some conditions. Biochemical analyses showed that Si contributed to the increase in total soluble carbohydrates and glycine in the shoot. However, Si addition did not increase N content, nor consistently reduce Na levels in plants exposed to salinity, for the Cl content, Si promoted variable effects, with a reduction in the roots in the 5.5  $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$

condition. Consequently, the adverse effects of salinity caused by NaCl on 'BRS Imperial' pineapple seedlings were mainly attributed to excess sodium.

**Keywords:** *Ananas comosus* (L.), salinity, Si supplementation

## INTRODUÇÃO

Dentre os diversos fatores abióticos que causam estresse, a salinidade emerge como um dos principais, acarretando implicações significativas para a agricultura ao impactar adversamente o crescimento, desenvolvimento e produtividade das plantas cultivadas (Nadeem et al., 2016). Em escala global, aproximadamente 930 milhões de hectares de terras aráveis, representando mais de 6% da extensão total, encontram-se sob o impacto da salinidade, sendo essa proporção continuamente ampliada, sobretudo devido a fatores naturais e antropogênicos (Hasanuzzaman et al., 2018).

A salinização do solo é afetada por diversos elementos, dentre estes, alterações climáticas e práticas antropogênicas descontroladas pelo aumento contínuo da população humana e, conseqüentemente, a demanda na produção de alimentos. Tais como a expansão de áreas de cultivo em solo salino, decorrente da aplicação de práticas de irrigação inadequadas (Joshi et al., 2022), além do uso contínuo de fertilizantes e defensivos agrícolas com alta concentração salina. Limitação de precipitação, alta evapotranspiração, alta temperatura e má gestão da água contribuem para o aumento da salinidade do solo, especialmente, em regiões áridas e semiáridas de todo o mundo (Chen et al., 2021; Denaxa et al., 2022).

A salinidade, assim como outros estresses abióticos intensos, impacta inúmeras funções fisiológicas, bioquímicas e morfológicas das plantas (Abid et al., 2020; Denaxa et al., 2022). O acúmulo de Na<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup> no protoplasma pode desequilibrar a homeostase iônica das células, essencial para muitos processos fisiológicos, bioquímicos e moleculares e, além disso, o excesso desses íons pode provocar um

desequilíbrio nutricional, que pode afetar a absorção, distribuição e assimilação de nutrientes (Munns et al. 2016; Conceição et al., 2019).

Em resposta ao estresse, as plantas desenvolveram, como mecanismo de estratégia bioquímica, o acúmulo de solutos compatíveis no citosol, como a prolina, glicina betaína e açúcares solúveis, auxiliando no equilíbrio da pressão osmótica promovida por um excesso de íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  no vacúolo (Munns et al. 2016). Atrelado a isto, as plantas também adotam outros mecanismos de defesa, que envolvem alterações morfofisiológicas e mudanças celulares e anatômicas para mitigar o estresse (Saud et al. 2014).

Diante deste cenário, muitos estudos vêm apontando o silício (Si) como um elemento com capacidade de modular o metabolismo vegetal, funcionando como elemento não essencial que confere, claramente, benefícios às plantas, melhorando o crescimento, o rendimento e a qualidade das culturas, a fotossíntese e a fixação de nitrogênio, particularmente, em resposta aos estresses bióticos e abióticos como a salinidade (Zhu e Gongo 2014; Coskun et al., 2016; Pirasteh-Anosheh et al., 2017; Conceição et al., 2019; Ali et al., 2021).

De acordo com Peña-Calzada et al. (2023), os benefícios do Si para as plantas, fundamentalmente, pode ser explicado de duas maneiras: primeiramente, o Si pode diminuir o estresse iônico, reduzindo a captação e translocação de  $\text{Na}^+$  melhorando a homeostase iônica e a concentração de Si; o Si incorporado na defesa antioxidante reduz o estresse osmótico, diminuindo o conteúdo de peroxidação lipídica e aumentando o acúmulo de prolina e a regulação positiva das enzimas antioxidantes, resultando em maior produção de massa seca da planta nas condições salinas.

Nesse contexto, o abacaxi é uma cultura alternativa de cultivo nos tabuleiros costeiros do Nordeste e Sudeste do Brasil, principalmente, em regiões áridas e semiáridas, estando sujeito ao cultivo em locais propícios à ocorrência de acúmulo de sais. Porém, existem poucos estudos com a cultura que englobem avaliação do crescimento e metabolismo em condições salinas e, principalmente, atrelado ao uso do Si. Neste sentido, objetivou-se avaliar a biometria, atividade bioquímica e composição nutricional em mudas de abacaxizeiro 'BRS Imperial', cultivado em condições salinas com silício.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Localização experimental

O experimento foi conduzido em casa de vegetação no campus da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, localizado em Campos dos Goytacazes, no Norte do estado do Rio de Janeiro (latitude = 21°19'23" S, longitude = 41°10'40" W; altitude = 14 m). Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da Região Norte Fluminense é classificado com Aw, isto é, clima tropical úmido, com verão chuvoso, inverno seco e temperatura do mês mais frio superior a 18°C.

### Condições de cultivo e material vegetal

Durante a condução do experimento, a casa de vegetação foi equipada com um datalogger Hobo modelo U23-001 Pro v2 Onset® para obtenção diária de temperatura e umidade relativa do ar (mínimas, máximas e médias). As leituras obtidas durante o período experimental registraram temperaturas mínima de 13,16°C, máxima de 37°C e média de 23,13°C, e umidade relativa mínima de 30%, máxima de 97,71% e média de 50%.

Foram utilizadas mudas do tipo filhote da cultivar BRS Imperial, coletadas diretamente do campo na lavoura comercial da Fazenda Taquarussú, localizada em Imburi, no município de São Francisco do Itabapoana, no estado do Rio de Janeiro (21°28'S e 41°7'O).

Inicialmente foi realizada uma seleção das mudas quanto à sua biometria, selecionando-se as mais uniformes, com peso médio de 18 g, para sua padronização e homogeneidade, a fim de evitar uma variação entre as plantas antes do início da aplicação dos tratamentos.

Em seguida, as mudas passaram por um tratamento fitossanitário por imersão em solução aquosa contendo o fungicida NATIVO (grupo químico: Estrobilurina e Triazol) na concentração de 1,2 mL.L<sup>-1</sup> e inseticida ACTARA (grupo químico: Neonicotinoides e Piretroides) na concentração de 120 g.L<sup>-1</sup> para controle de fusariose (*Fusarium subglutinans*) e cochonilha-do-abacaxi (*Dysmicoccus brevipes*), respectivamente. A imersão foi feita por cinco minutos e, em seguida, as mudas foram

colocadas para secar em bancadas dentro da casa de vegetação com sua base voltada para cima.

Em maio de 2022, o experimento foi instalado, onde as mudas foram cultivadas em sistema hidropônico. O cultivo foi feito em recipientes plásticos com capacidade para volume total de dois litros, no qual, foram preenchidos com solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950), com modificações. O recipiente foi coberto com papel alumínio, a fim de evitar o superaquecimento da solução nutritiva e a proliferação de algas.

A solução nutritiva foi preparada com água deionizada e o pH da mesma foi ajustado para 5,6-5,8, quando necessário, através de uma solução de HCl ou NaOH (1 M). A aeração da solução nutritiva, contida no recipiente plástico, se manteve de forma contínua através da utilização de bombas de aquário para manter a oxigenação das raízes. Nos primeiros dias, as mudas receberam apenas a solução nutritiva para estímulo do enraizamento e, após esse período, os tratamentos foram aplicados.

### **Aplicação dos tratamentos**

Após 15 dias de instalação do experimento, quando as mudas se encontravam enraizadas, os tratamentos foram aplicados. Os tratamentos foram compostos por três concentrações de NaCl (0, 3,5 e 5,5 mS.cm<sup>-1</sup>) e duas concentrações de silício (0 e 1,5 mM). As concentrações de NaCl e Si, utilizadas neste estudo, foram selecionadas por meio de pesquisas realizadas na literatura (Marinho et al., 1998; Ma e Yamji, 2006; Nikolic et al., 2007).

No preparo da solução nutritiva foi feita a adição do Cloreto de Sódio (NaCl) e Ácido Silício SiO<sub>2</sub>\*xH<sub>2</sub>O PA. MERCK® (99,0 – 100,5 % de SiO<sub>2</sub> disponível). Para o cálculo da quantidade de sal gasta na elaboração de cada nível de salinidade desejado foi utilizada a equação 1, como procederam Cavalcante et al. (2010):

$$Cs = 0,01 [(CEd - CEa) Gp] \times Peq \quad (1)$$

Em que: Cs = concentração de cada espécie iônica (g.L<sup>-1</sup>); CEd = condutividade elétrica desejada; CEa = condutividade elétrica da água utilizada para o preparo da solução; Peq = peso equivalente; Gp = grau de pureza de cada sal. Após a elaboração, as condutividades elétricas das soluções foram aferidas para simples conferência dos resultados.

Durante a condução experimental, a solução nutritiva com os tratamentos foi renovada semanalmente e, além disso, também foi realizado o monitoramento e ajuste do pH e sua condutividade elétrica, quando necessário, decorrentes da variação de temperatura e/ ou evaporação da água. Após 126 dias da aplicação dos tratamentos, o experimento foi encerrado e foram determinadas as variáveis biométricas, análises bioquímicas e composição nutricional de N, Na, Cl e Si na massa seca da parte aérea e da raiz das mudas.

## **Variáveis analisadas**

### Análises biométricas

Para as variáveis de crescimento determinaram-se o comprimento da parte aérea em cm, com auxílio de régua graduada em cm, medindo-se desde o colo da planta até a ponta da folha D; o diâmetro do caule em mm, medido por meio de paquímetro digital; massa fresca da parte aérea e raiz em g, através de uma balança semianalítica; e o número de folhas, determinado pela contagem. A medição da área foliar em cm<sup>2</sup> foi realizada com auxílio de um medidor de área foliar de bancada modelo LI-3100 LICOR (Lincoln, NE, USA).

As raízes das plantas foram coletadas e, posteriormente, foram analisadas por escaneamento através do scanner EPSON *Expression* 11000XL, equipado com luz adicional (TPU) com resolução de 400 dpi para a leitura biométrica de raízes. Neste procedimento, as raízes foram distribuídas em uma cubeta com dimensões de 30 x 42 cm, localizada na superfície do equipamento, previamente preenchida com água deionizada para a digitalização da imagem pelo scanner e imediata quantificação das variáveis pelo *software WinRhizo Pro 2013*. Os parâmetros morfológicos determinados foram o comprimento total de raízes em cm, área superficial total de raízes em cm<sup>2</sup>, volume total de raízes em cm<sup>3</sup> e diâmetro médio de raízes em mm.

Na sequência, as raízes e parte aérea (folha e caule) foram colocadas em sacos de papel e as amostras levadas à estufa de ventilação de ar forçada a 65°C por 72 horas, obtendo-se assim, as respectivas massas secas. Após desidratadas, as amostras foram trituradas em moinho tipo *Willey* com peneira de 20 mesh e, em seguida, os materiais foram homogeneizados e armazenados em frascos hermeticamente fechados para as análises posteriores.

## Análises bioquímicas

As análises bioquímicas foram realizadas no Laboratório de Fisiologia Vegetal pertencente à Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), campus Belém/PA.

O amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) foi determinado conforme o método proposto por Weatherburn (1967). As concentrações foram estimadas a partir da leitura em 625 nm em espectrofotômetro, e o resultado expresso em  $\text{mmol de NH}_4^+ \cdot \text{kg}^{-1}$  de massa seca.

Concentrações de proteínas solúveis totais foram determinadas segundo o método proposto por Bradford (1976). As leituras foram feitas em espectrofotômetro no comprimento de onda de 595 nm. Os resultados de proteínas solúveis totais foram expressos em  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$  de massa seca.

A concentração de carboidratos solúveis totais foi obtida conforme o método descrito por Dubois et al. (1956). As leituras foram realizadas em espectrofotômetro a uma absorvância de 490 nm. A concentração é expressa em  $\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}$  de massa seca.

A concentração de prolina foi determinada de acordo com a metodologia descrita por Bates et al. (1973), as leituras foram realizadas usando um espectrofotômetro a 520 nm de absorvância e seus resultados expressos em  $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$  de massa seca.

Para determinação de glicina betaína foi utilizado o método proposto por Greive e Grattan (1983), a leitura espectrofotométrica com absorvância a 365 nm e os resultados expressos em  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  de massa seca.

## Composição Nutricional

As análises nutricionais foram realizadas no Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas, pertencente à Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Campos dos Goytacazes/RJ.

O nitrogênio (N) e o sódio (Na) foram determinados no extrato da massa seca oxidada por digestão sulfúrica. O Na foi analisado em espectrofotômetro de absorção atômica, enquanto o N, pelo método colorimétrico do reagente Nessler em espectrômetro de UV visível a 480nm (Jackson, 1965).

A determinação do cloro (Cl) foi adaptada, tomando como base os trabalhos de Lacroix et al. (1970) e Malvolta et al. (1989) pelo método de Mohr. O cloro foi extraído pela solução de nitrato de cálcio na forma de íon cloreto, titulado com solução

padronizada de nitrato de prata, na presença de cromato de potássio como indicador. O ponto final da titulação foi identificado pela coloração vermelha, resultante da formação de cromato de prata depois de toda a precipitação do cloreto, devido ao cromato de prata ser mais solúvel do que o cloreto de prata.

A determinação do silício (Si) foi realizada com o emprego do método colorimétrico amarelo, descrito por Korndörfer et al. (2004), que consiste, basicamente, na extração do Si do material vegetal por digestão com peróxido de hidrogênio e hidróxido de sódio em autoclave, seguido de posterior emprego de outros reagentes necessários para a determinação do silício, finalizando o processo com a leitura do Si nos extratos em fotocolorímetro, no comprimento de onda de 410 nm, e, imediatamente após a adição dos reagentes, uma vez que o complexo amarelo ácido sílico-molíbico é bastante instável.

### **Desenho experimental e análise estatística**

O delineamento experimental adotado foi em blocos completamente casualizados (DBC), em esquema fatorial 3x2, com três concentrações de NaCl (0, 1,5 e 3,5 mS.cm<sup>-1</sup>) e duas concentrações de silício (0 e 1,5 mM) adicionadas na solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) e quatro repetições. Cada unidade experimental foi composta por duas mudas, sendo estas conduzidas em vasos separados, totalizando 48 mudas no experimento.

A análise dos dados foi realizada no *software R* (R Core Team, 2014), com auxílio do pacote *ExpDes.pt*. versão 1.2.2 (Ferreira et al., 2021), no qual, foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F e averiguada a normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro Wilk, ambos ao nível de 5% de probabilidade de erro. Em seguida, foi aplicado o teste de comparação de médias de tukey, também ao nível 5% de significância. Para confecções dos gráficos, foi utilizado o pacote *ggplot2* versão 3.4.1 (Wickham, 2016) e o editor de imagens *inkscape*.

A fim de verificar a dispersão e o grau de associação das diferentes variáveis consideradas neste estudo, foi conduzida a análise multivariada de componentes principais (PCA). A partir das médias dos tratamentos obtiveram-se os autovalores e autovetores. Em seguida, foi construído um gráfico *biplot* para o conjunto de variáveis. A análise e construção do gráfico foi realizada com recursos do pacote *factoextra* versão 1.0.7 (Kassambara e Mundt, 2020).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao analisar as variáveis biométricas, constatou-se que apenas o diâmetro do caule e o número de folhas não evidenciaram diferenças significativas. Por outro lado, em relação às variáveis comprimento da parte aérea (Figura 1A), massa fresca da parte aérea e raiz (Figura 1B), massa seca da parte aérea (Figura 1C) e área foliar (Figura 1D), observou-se significância no fator isolado concentrações de NaCl. Foi notável a redução expressiva das médias dessas variáveis nas plantas submetidas às condições salinas. Além disso, os resultados indicaram que a adição de silício não teve efeito significativo.

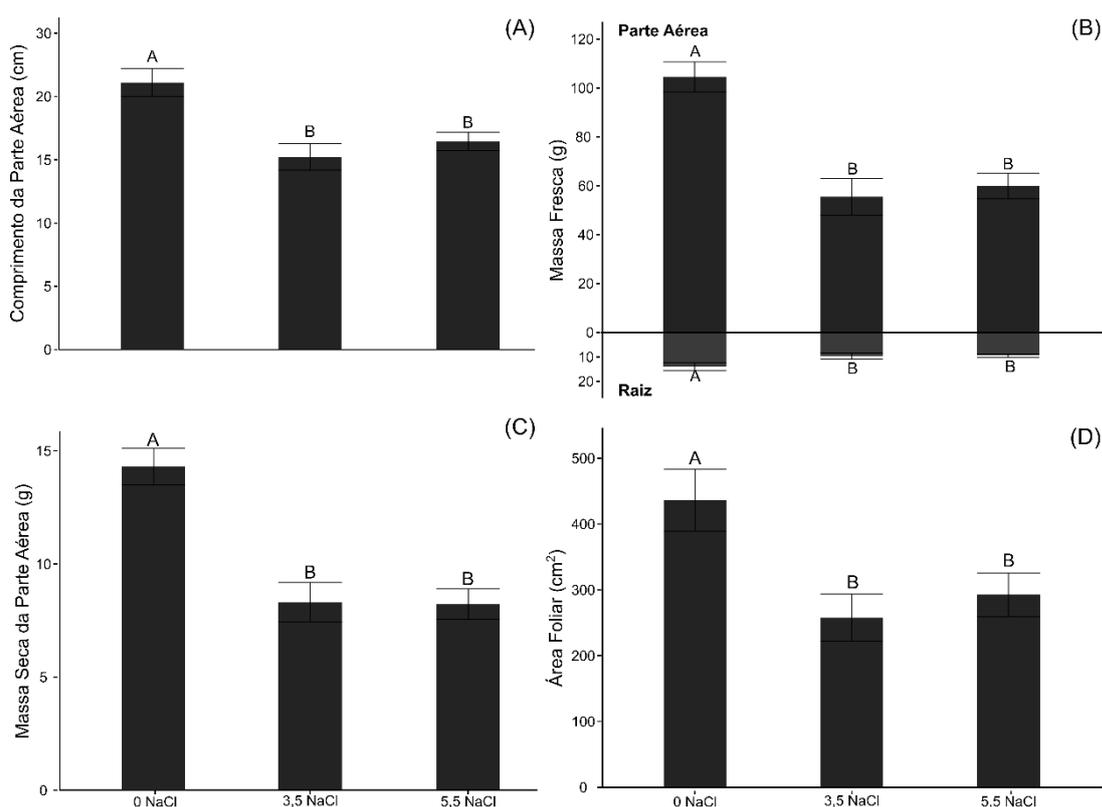


Figura 1. Comprimento da parte aérea (A); massa fresca da parte aérea (B1); massa fresca da raiz (B2); massa seca da parte aérea (C) e área foliar (D), das mudas de abacaxizeiro 'BRS Imperial' cultivadas em sistema hidropônico com uso de NaCl (0, 3,5 e 5,5 mS.cm<sup>-1</sup>) e Si (0 e 1,5 mM). Letras distintas indicam diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre as concentrações de NaCl. As barras representam o erro padrão.

Já para os parâmetros biométricos de raiz: comprimento (Figura 2A); massa seca (Figura 2B); área superficial (Figura 2C); diâmetro médio (Figura 2D) e volume total (Figura 2E) houve diferença significativa na interação dos fatores NaCl e Si.

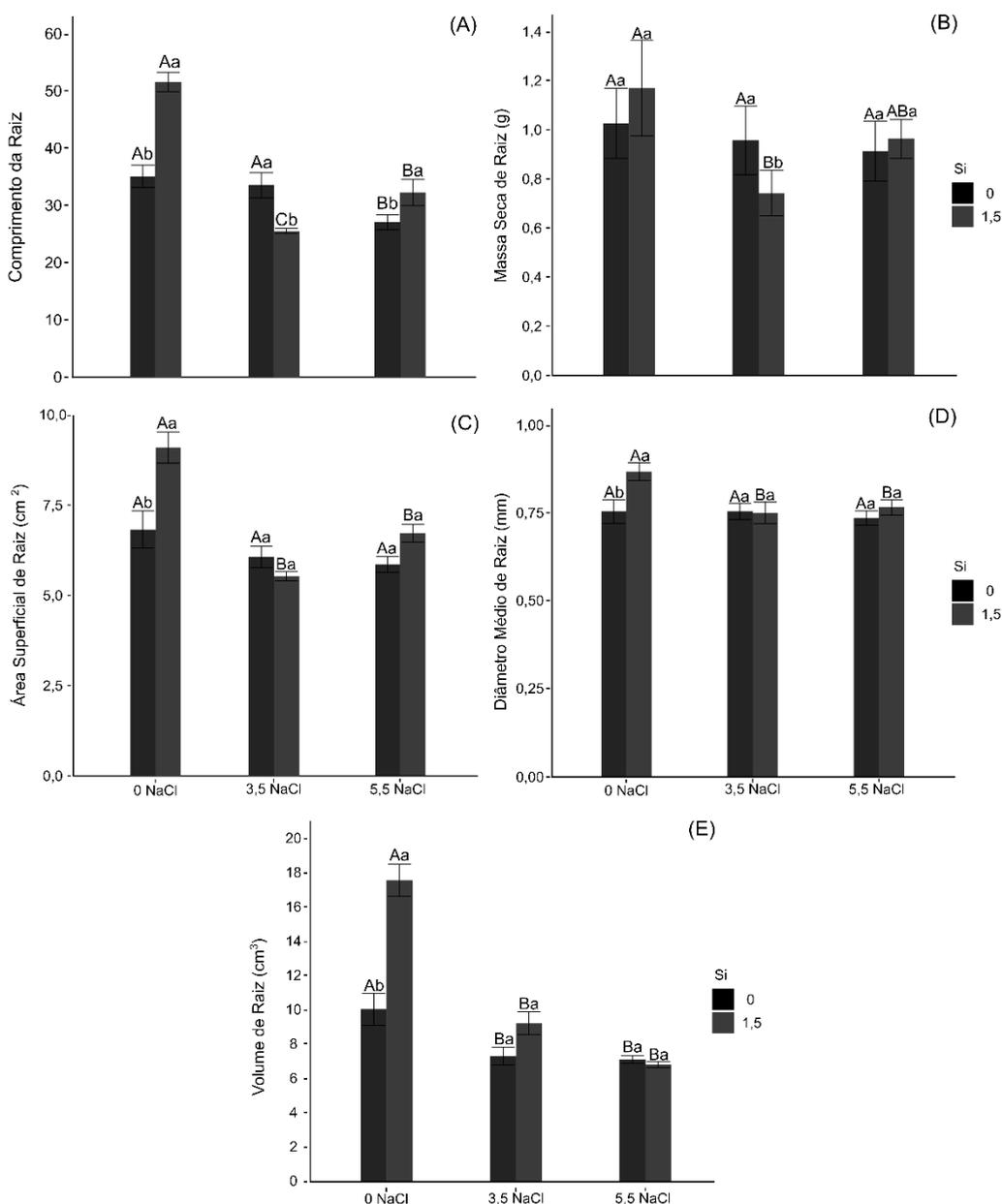


Figura 2. Comprimento da raiz (A); massa seca de raiz (B); área superficial de raiz (C); diâmetro médio de raiz (D) e volume total de raiz (E), das mudas de abacaxizeiro 'BRS Imperial' cultivadas em sistema hidropônico com uso de de NaCl (0, 3,5 e 5,5 mS.cm<sup>-1</sup>) e Si (0 e 1,5 mM). Letras maiúsculas distintas indicam diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre as concentrações de NaCl e, minúsculas, entre as concentrações de Si. As barras representam o erro padrão.

O Si foi capaz de promover um incremento no comprimento radicular. Nas plantas condicionadas sem adição salina, o incremento foi de 46,94% e, nas condições de maior concentração salina de 5,5 mS.cm<sup>-1</sup>, a adição do Si na solução contribuiu com um incremento de 19,1%. Para área superficial de raízes, o Si na solução incrementou um percentual de 33,2% e 15% no diâmetro médio das raízes das plantas sem adição de sal, porém, não foi capaz de propiciar incremento para as plantas sob as condições salinas. No volume total de raízes das plantas sem adição de sal, o Si promoveu um incremento expressivo de 74,8%, e na concentração salina de 3,5 mS.cm<sup>-1</sup> o incremento foi de 26,2%.

O aumento dos níveis salinos em condições de cultivo resulta no declínio dos atributos de crescimento das plantas, características fisiológicas, atividade bioquímica, nas trocas gasosas e concentração iônica, o que, por sua vez, acarreta redução do rendimento (Liu et al., 2020; Peña-Calzada et al., 2023). A redução nas características relacionadas ao crescimento pode ser atribuída à expansão celular prejudicada, decorrente da ação comprometida do fito-hormônio responsável pelo crescimento. Isso resulta em restrições no turgor celular, volume celular e, conseqüentemente, na taxa de crescimento celular. Em casos mais severos, essa condição pode levar à senescência das folhas (Joshi et al., 2022).

Além disso, outro fator que pode estar relacionado ao declínio nos atributos de crescimento das plantas é devido à maior concentração de Na<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup> no canal de crescimento que afeta a estabilidade da membrana e reduz a atividade fotossintética, trazendo, como consequência, um desequilíbrio na absorção de água e nutrientes, que reduz notavelmente a biomassa vegetal (Abbasi et al., 2015; Stavridou et al., 2017). Diante destes aspectos, a aplicação de Si alivia significativamente o efeito negativo da salinidade devido ao seu papel benéfico no equilíbrio das características morfofisiológicas, na nutrição mineral e no mecanismo de defesa antioxidante (Hassanvand et al., 2019; Khorasaninejad et al., 2020).

Os efeitos benéficos do Si no crescimento das plantas podem estar relacionados ao fato do Si estar associado à diminuição da concentração de Na<sup>+</sup> e ao aumento da absorção de K<sup>+</sup>, mantendo assim, uma maior relação K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>, o que, eventualmente, melhora o crescimento das plantas em condições salinas (Alsaeedi et al., 2019; Javaid et al., 2019; Hurtado et al., 2021).

De maneira geral, podemos observar em nossa pesquisa uma maior sensibilidade do efeito salino nos parâmetros biométricos da parte aérea das plantas. Resultados semelhantes foram obtidos por Liu et al. (2020), no qual, a salinidade elevada por NaCl impactou em um aumento da proporção raiz/parte aérea, reduzindo o crescimento, o peso seco, comprimento de brotos, número de novos brotos, e área foliar, além de diminuir o comprimento e número de raízes em cultivares de romã. De acordo com os autores, as características de crescimento são importantes indicativos para avaliar a tolerância das plantas ao sal.

Apesar da não essencialidade do Si para espécies cultivadas, os resultados de alguns estudos mostram os efeitos benéficos do Si no crescimento de plantas cultivadas em condições salinas. Em nosso estudo, para os parâmetros radiculares, foi possível notar que a adição do Si proporcionou resultados benéficos.

Ali et al. (2021) verificaram, em sua pesquisa, que a aplicação externa de Si às cultivares de milho estressadas com NaCl resultou em incremento na massa fresca e seca da parte aérea e raiz, além de um incremento no comprimento radicular. De Sá et al. (2021) realizaram um experimento em casa de vegetação para avaliar o efeito do Si no crescimento e na nutrição mineral do maracujazeiro amarelo (*Passiflora edulis*), submetido ao estresse salino em solução nutritiva. Os pesquisadores também observaram que, embora os níveis de Si não tenham exercido um controle total do estresse salino, o suprimento com Si atenuou o efeito do maior estresse salino na matéria seca das raízes e caule. A aplicação de Si e nano-silício melhorou significativamente o crescimento vegetativo e o conteúdo relativo de água, e resultou em aumentos significativos na altura das plantas, peso fresco e seco, rendimento total e sistemas de defesa antioxidante de ervilha cultivada sob estresse salino (Ismail et al., 2022).

No presente estudo para as análises bioquímicas de amônio na parte aérea (Figura 3A) houve significância ( $p < 0,05$ ) apenas nas concentrações salinas, no qual, a condição de  $3,5 \text{ mS.cm}^{-1}$  de NaCl acarretou redução desse composto em 29%, em comparação às plantas sem adição de sal.

Nas raízes (Figura 3B) houve interação significativa, no qual o Si contribui de forma expressiva para o aumento desse composto e, assim, obtivemos como resultado um incremento de 67,8% nas plantas sem sal e 34,5% nas plantas cultivadas em  $5,5 \text{ mS.cm}^{-1}$  de NaCl.

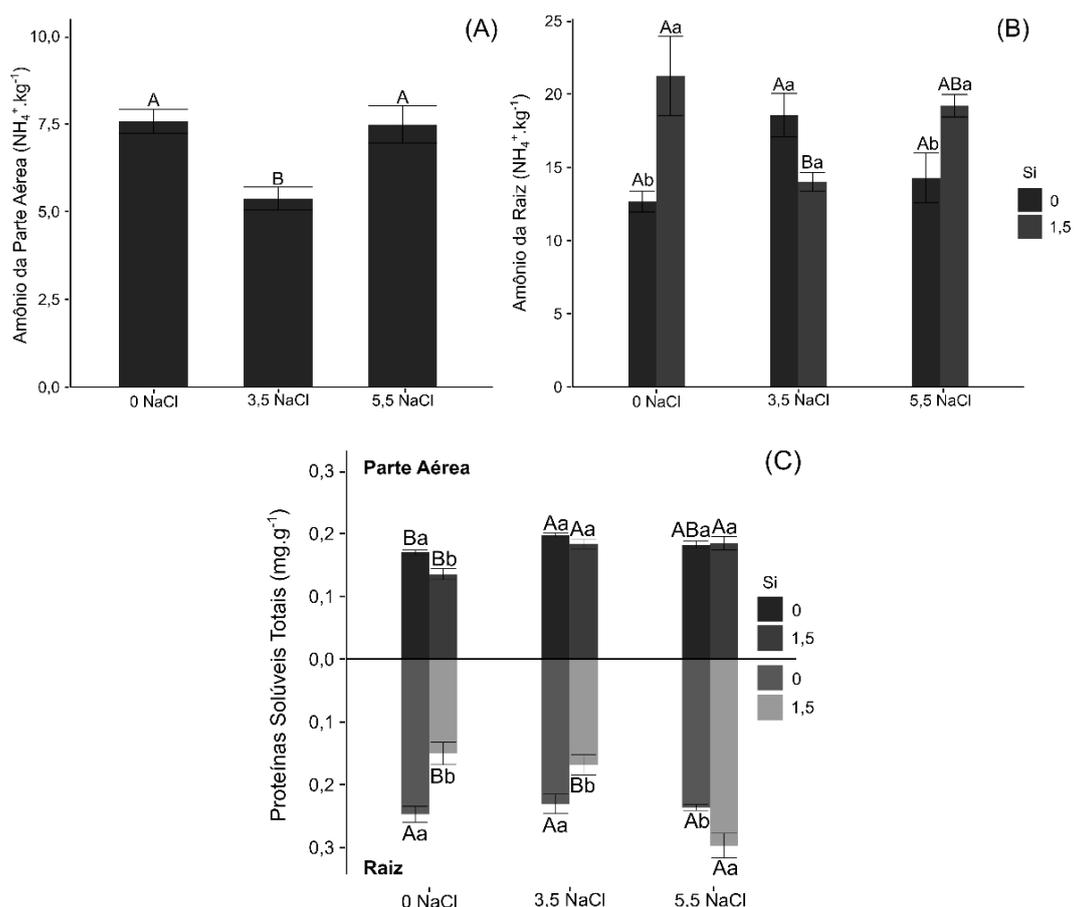


Figura 3. Amônio da parte aérea (A); amônio da raiz (B) e proteínas solúveis totais da parte aérea e raiz (C), das mudas de abacaxizeiro 'BRS Imperial' cultivadas em sistema hidropônico com uso de de NaCl (0, 3,5 e 5,5 mS.cm<sup>-1</sup>) e Si (0 e 1,5 mM). Letras maiúsculas distintas indicam diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre as concentrações de NaCl e, minúsculas, entre as concentrações de Si. As barras representam o erro padrão.

As proteínas solúveis totais, tanto na parte aérea como na raiz (Figura 3C), expressaram diferença significativa na interação. A condição de 3,5 mS.cm<sup>-1</sup> sem interação com Si proporcionou aumento dessa substância na parte aérea, e a combinação do Si com as duas concentrações salinas (3,5 e 5,5 mS.cm<sup>-1</sup>) apresentou elevação desse composto bioquímico quando comparadas com as plantas sem salinidade. Nas raízes das plantas condicionadas na maior concentração de NaCl, quando a solução nutritiva foi implementada com Si, houve um incremento de 25% em comparação àquelas cultivadas somente em solução com NaCl, entretanto, o Si acarretou a diminuição desse composto nas plantas sem adição de sal e nas com 3,5 mS.cm<sup>-1</sup> de NaCl.

Neste estudo, as raízes acumularam mais amônio, e sob tratamento da maior concentração de NaCl associada com aplicação do Si, houve um incremento deste composto. Segundo Taiz et al. (2017), o carregamento do nitrato no xilema depende de sua concentração no citosol. Provavelmente, o Si estimulou a absorção e acumulação de  $\text{NO}_3^-$  no vacúolo das células radiculares. O  $\text{NO}_3^-$  é a principal forma nitrogenada absorvida pelas plantas, sendo posteriormente reduzido a amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) através de reações sequenciais de redução, catalisadas pelas enzimas redutase do nitrato, redutase do nitrito, glutamina sintetase e glutamato sintase, o que leva, conseqüentemente, à síntese de aminoácidos e proteínas (Debouba et al., 2007).

Em nossa pesquisa, as raízes das mudas de abacaxizeiro sob maior concentração salina, e o incremento de Si na solução nutritiva, exerceu um efeito benéfico em comparação àquelas somente com NaCl na solução. De acordo com Al-Aghabary et al. (2005), o Si pode atuar como um indutor da síntese proteica, visto que, a presença desse elemento em plantas, sob condições de estresse por salinidade, aumenta a síntese de RNAm e, conseqüentemente, há um maior incremento na concentração proteica. Para esses autores, o Si também reduz a degradação de proteínas, decorrente da elevada concentração de NaCl. Khan et al. (2018) verificaram que a aplicação do Si em milho, sob condições salinas, proporcionou um aumento significativo de mais de 50% no conteúdo de proteínas.

Para o conteúdo de carboidratos solúveis totais na parte aérea (Figura 4A), houve significância ( $p < 0,05$ ) nos fatores de forma isolada, no qual, em ambas as concentrações salinas (3,5 e 5,5  $\text{mS.cm}^{-1}$ ) houve aumento deste composto em comparação às plantas sem salinidade, além disso, a adição do Si na solução nutritiva promoveu um incremento de 26%. Na raiz (Figura 4B), esta variável apresentou efeito significativo apenas para as diferentes concentrações de NaCl, com um incremento de 47,7% nas condições de maior concentração salina.

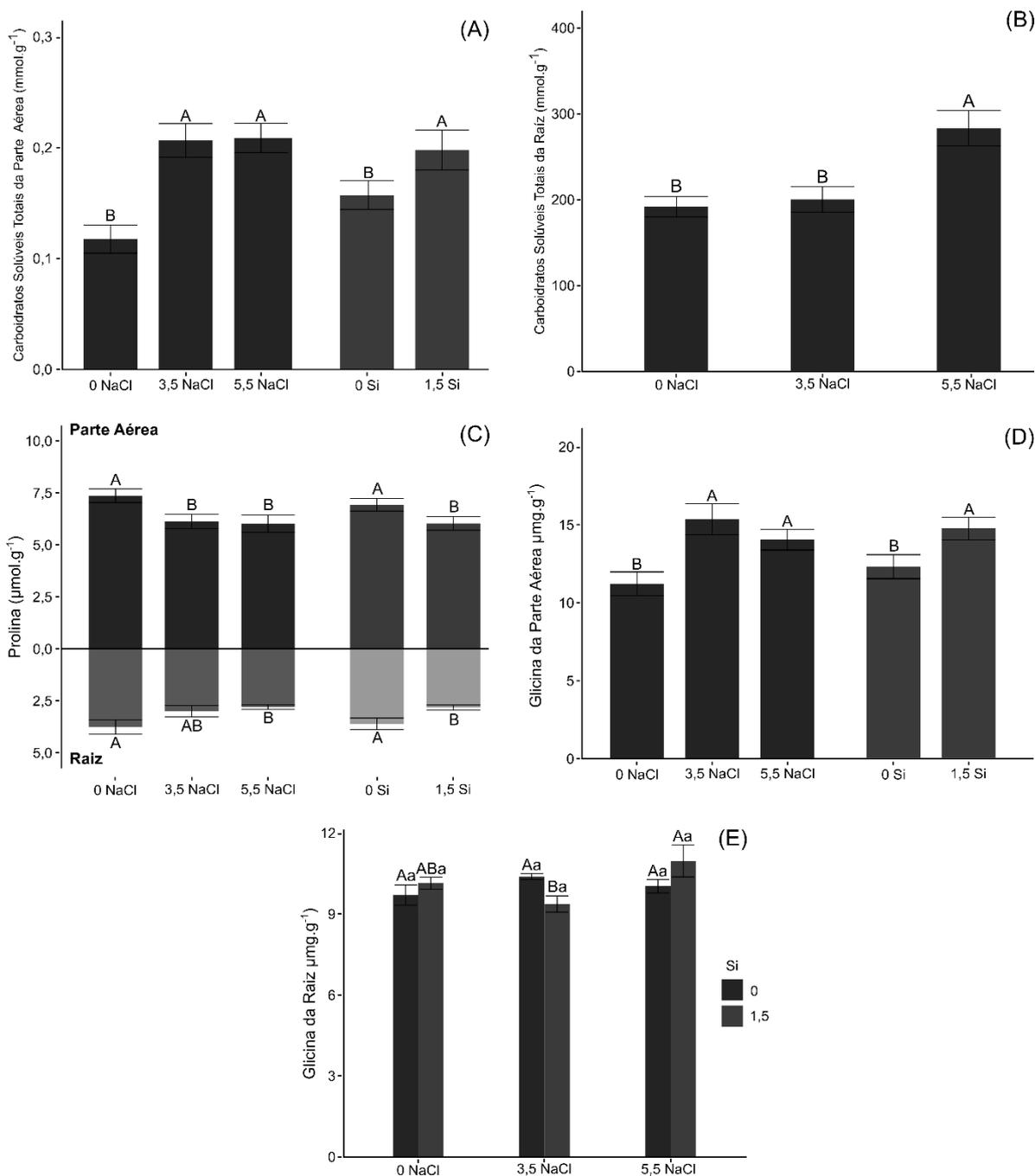


Figura 4. Carbohidratos solúveis totais da parte aérea (A); e da raiz (B); prolina da parte aérea e raiz (C); glicina da parte aérea (D) e raiz (E), das mudas de abacaxizeiro 'BRS Imperial' cultivadas em sistema hidropônico com uso de de NaCl (0, 3,5 e 5,5 mS.cm<sup>-1</sup>) e Si (0 e 1,5 mM). Letras maiúsculas distintas indicam diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre as concentrações de NaCl e minúsculas entre as concentrações de Si. As barras representam o erro padrão.

O osmorregulador prolina presente na parte aérea e nas raízes (Figura 4C) expressou, como resultado, diferenças significativas apenas nos fatores avaliados

isoladamente. Para as concentrações de NaCl, foram obtidos na parte aérea percentuais de redução de 16,7 e 18,2%, nas respectivas concentrações de 3,5 e 5,5 mS.cm<sup>-1</sup> de NaCl em comparação ao tratamento sem aplicação salina. Porém, nas raízes, a adição do Si na solução de cultivo hidropônico não resultou em efeito positivo de acúmulo desse composto.

A glicina na parte aérea (Figura 4D) apresentou significância dos fatores isolados. Para as concentrações de 3,5 e 5,5 mS.cm<sup>-1</sup> de NaCl, houve um aumento desse composto em 36,8 e 25,1%, respectivamente, em comparação ao tratamento sem aplicação salina e, além disso, a incorporação do Si na solução nutritiva contribuiu com um incremento de 20% nas plantas. Nas raízes (Figura 4E), a interação dos fatores (NaCl e Si) foi significativa, onde as plantas condicionadas na maior concentração de NaCl, quando a solução nutritiva foi implementada com Si, houve um incremento de 8%, em comparação ao tratamento sem sal.

Entre os mecanismos de tolerância amplamente reconhecidos, que se desenvolveram para auxiliar as plantas a mitigarem os efeitos prejudiciais do estresse, destaca-se o acúmulo compatível de solutos orgânicos (Khan et al., 2019). Por longo tempo, diversos estudos têm buscado compreender o papel desses solutos compatíveis que se acumulam quando uma planta é exposta ao estresse salino, incluindo os carboidratos (Zhu et al., 2016), prolina (Cui et al., 2021) e a glicina betaína (Ahmad et al., 2019).

Estes solutos, caracterizados por sua diversidade química, ausência de carga em pH neutro, solubilidade em água e capacidade de acumulação em concentrações elevadas durante períodos de estresse, não comprometem as reações bioquímicas normais (Zhang et al., 2004). Além disso, devido à sua natureza hidrofílica, interagem com proteínas de membrana e outros complexos proteicos sem causar perturbações na estrutura ou função normais das proteínas. Sabe-se que osmólitos compatíveis desempenham um papel crucial na estabilização de proteínas funcionais, enzimas, complexos proteicos e na integridade da membrana durante períodos de estresse salino, sendo importantes componentes para o ajuste osmótico vegetal (Rajasheker et al., 2019; Jiménez-Arias et al., 2021).

Atrelado a este contexto, vários estudos sugerem que a aplicação de Si pode aumentar a tolerância ao estresse salino em diversas culturas agrícolas, através da regulação da síntese de osmólitos compatíveis. Ahmad et al. (2019) relataram que a aplicação de Si aumentou os níveis de prolina e glicina betaína nas plantas de feijão

mungo em condições salinas e concluíram que a suplementação de Si mitigou os efeitos negativos do NaCl através de modificações na absorção de nutrientes inorgânicos, na produção de osmólitos e no sistema de defesa antioxidante. Alzahrani et al. (2018), em um estudo avaliando o papel defensivo do Si no trigo contra condições de estresse induzidos por seca, salinidade ou cádmio, observaram que todos os tratamentos com Si provaram resultar em aumentos adicionais nos teores de açúcares solúveis totais e prolina em comparação com os tratamentos sem sal.

Embora, no geral, o Si pareça aumentar os níveis de açúcares, glicina betaína e prolina, em nossa pesquisa observamos que a suplementação com Si acarretou na redução da prolina tanto nas folhas como nas raízes do abacaxizeiro. Reduções do osmoprotetor glicina betaína foram relatadas em *Borago officinalis* L. quando avaliou-se os efeitos do silício exógeno em combinação com o estresse por NaCl (Torabi et al., 2015). Em contraste, o nosso estudo apresentou acúmulo de carboidratos e glicina betaína como reguladores osmóticos.

Nas análises da composição nutricional das mudas de abacaxizeiro 'BRS Imperial', o teor de N expressou como resultado diferenças significativas apenas na parte aérea e nos fatores avaliados isoladamente (Figura 5A). Para as concentrações de NaCl, foram obtidos percentuais de redução de 16,2 e 7,5%, nas respectivas concentrações de 3,5 e 5,5 mS.cm<sup>-1</sup> de NaCl em comparação ao tratamento sem aplicação salina. Porém, a adição do Si na solução de cultivo hidropônico não resultou em efeito positivo de incremento deste nutriente, visto que, houve uma redução no teor de N em 11,8%.

Para o teor de Si, houve significância na interação dos fatores nas raízes (Figura 5B), as plantas tratadas com Si apresentaram médias superiores e, além disso, as mudas que foram expostas às concentrações de NaCl e que foram suplementadas com Si na solução nutritiva, apresentaram menor teor deste elemento, ou seja, a salinidade afetou a absorção do Si.

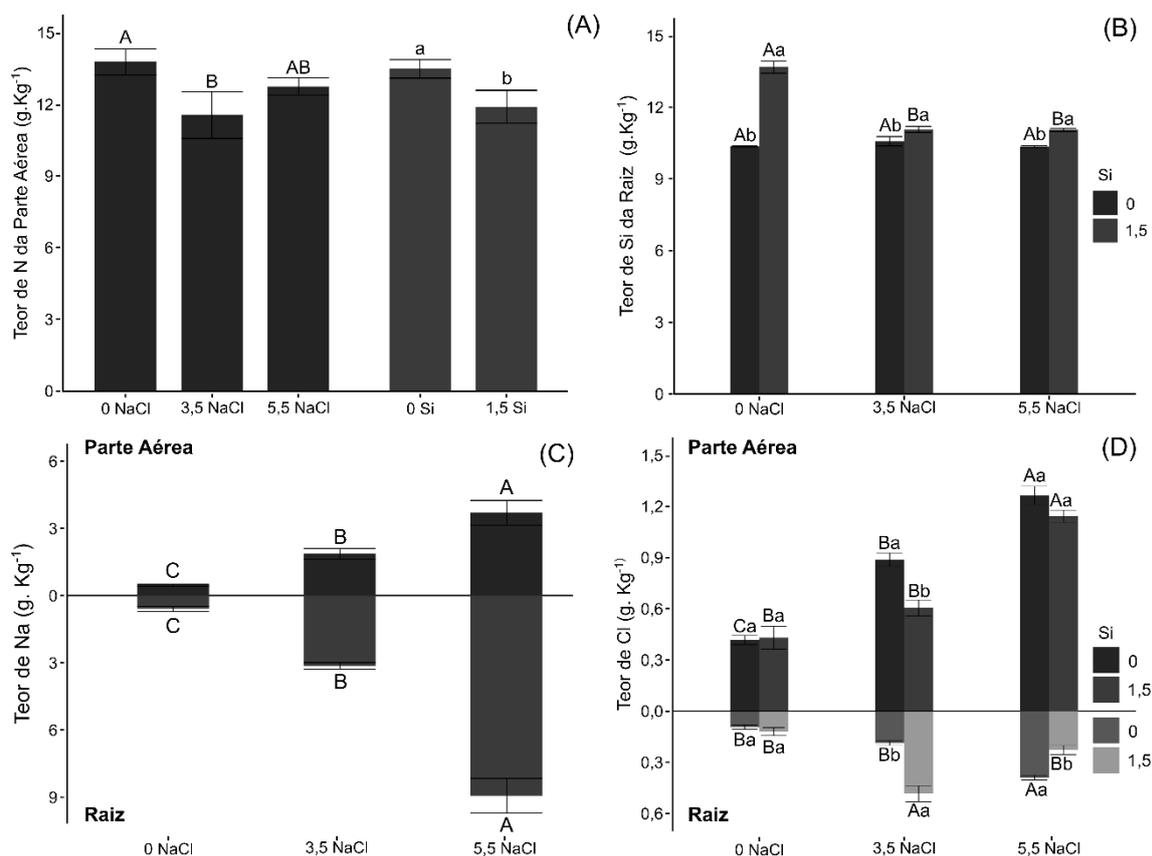


Figura 5. Teor de N da parte aérea (A); teor de Si da raiz; teor de Na da parte aérea e raiz (C) e teor de Cl da parte aérea e raiz (D), das mudas de abacaxizeiro 'BRS Imperial' cultivadas em sistema hidropônico com uso de de NaCl (0, 3,5 e 5,5 mS.cm<sup>-1</sup>) e Si (0 e 1,5 mM). Letras maiúsculas distintas indicam diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre as concentrações de NaCl e minúsculas entre as concentrações de Si. As barras representam o erro padrão.

O teor de Na expressou, como resultado, diferenças significativas na parte aérea e raiz para as diferentes concentrações de NaCl (Figura 5C). Os resultados exibem uma diferença expressiva no teor de Na das plantas em condições salinas em comparação às plantas sem adição do sal.

Para o teor de Cl, houve significância na interação, tanto na parte aérea como nas raízes (Figura 5D). Na parte aérea foi observado o efeito positivo da adição do Si nos tratamentos de concentração salina de 3,5 mS.cm<sup>-1</sup> em comparação com o tratamento somente com NaCl, onde houve uma redução no teor de Cl em 31,82 %, no tratamento de 5,5 mS.cm<sup>-1</sup> associado com Si. Apesar de não ter tido efeito significativo, podemos observar que as médias das plantas com Si também apresentaram redução do teor de Cl. Já nas raízes, a aplicação de Si com 5,5 mS.cm<sup>-1</sup>

<sup>1</sup> de NaCl reduziu em 43,44% o teor de Cl nas plantas em comparação com as sem adição do Si.

Embora os estudos apontem que o Si influencia o acúmulo de nutrientes minerais (Ali et al., 2021), no caso das mudas de abacaxizeiro 'BRS Imperial' nas condições do presente estudo, os resultados da composição nutricional nos revelaram que a implementação com 1,5 mM de Si na solução nutritiva não contribuiu na absorção e aumento do teor de N nas plantas e, além disso, o Si não contribuiu com a redução do teor de Na, pois este elemento, quando em excesso, pode acarretar diversos danos.

Santos et al. (2017) avaliaram o efeito do cloreto de potássio e do ácido silícico no crescimento e na composição nutricional de mudas de abacaxizeiro 'Vitória', e observaram menor crescimento nas plantas tratadas com Si, além de menor acúmulo de nitrogênio, fósforo, cálcio, magnésio e enxofre. Os autores salientam a escassez de informações sobre o Si para a cultura do abacaxizeiro, enfatizando que o estudo possibilitou verificar que o abacaxizeiro pode ter sofrido fitotoxicidade causada pela aplicação do Si.

De Sá et al. (2021) observaram resultados semelhantes ao nosso, no acúmulo de N em folhas de maracujazeiro amarelo, onde houve redução de N nas folhas das plantas sob tratamento com silício no nível de 60 mM de NaCl. Além disso, os autores também verificaram que o acúmulo do Na foliar não apresentou influência das concentrações de SiO<sub>2</sub>. Miranda et al. (2010) observaram em caju pré-anão o aumento quadrático do acúmulo foliar de Na, após fornecimento de 0,5 e 1,0 mM de SiO<sub>2</sub>. E a concentração de 1,5 mM de SiO<sub>2</sub> apresentou resposta linear com o aumento das concentrações de NaCl.

Em nosso estudo, o Si foi capaz de promover um resultado positivo no teor de Cl da raiz para o tratamento de 5,5 mS.cm<sup>-1</sup>, no qual houve uma redução desse elemento. Nas folhas, o teor de Cl foi maior, e este fato pode estar relacionado com a mobilidade do elemento, uma vez que este é transportado pela corrente transpiratória no xilema, se acumulando nas folhas pelo processo de transpiração. O abacaxizeiro é considerado sensível a altos níveis de Cl (Kleinheinz, 1999). Chapman (1973) considerou como "intermediários" valores entre 1,1 e 4,3 g.kg<sup>-1</sup> de Cl em folhas de abacaxizeiro.

Teixeira et al. (2011a) determinaram os efeitos de fontes e doses de fertilizante potássico no estado nutricional de abacaxi 'Smooth Cayenne' e

observaram que na dose de  $700 \text{ kg.ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ , aplicados sob a forma de  $\text{KCl}$ , o teor de  $\text{Cl}$  nas folhas de abacaxizeiro atingiu  $4,3 \text{ g.kg}^{-1}$ , entretanto, esta concentração não chegou a causar sintomas de toxidez de  $\text{Cl}$ . Porém, reduziu a produtividade (Teixeira et al., 2011b). No presente estudo, os teores de  $\text{Cl}$  na parte aérea do abacaxizeiro 'BRS Imperial' variaram entre 0,41 e  $1,26 \text{ g.kg}^{-1}$ .

No geral, diversos estudos têm evidenciado os benefícios de  $\text{Si}$  no desenvolvimento de várias espécies de plantas, especialmente em condições de estresse abiótico, como o estresse salino. Entretanto, o efeito positivo deste elemento nem sempre está associado ao estresse, como observado em algumas variáveis analisadas em nossa pesquisa, onde o efeito benéfico do  $\text{Si}$  também se manifestou em plantas sem estresse. Resultados de Abbas et al. (2015) corroboram nossas observações pois, ao estudarem o quiabo exposto ao sal, constataram que muitos dos efeitos induzidos pelo  $\text{Si}$  não são específicos do estresse e, também, ocorrem em plantas não estressadas.

Portanto, o efeito positivo do  $\text{Si}$  está intrinsecamente ligado aos níveis de tolerância ao estresse da planta, os quais variam entre as espécies. Essa variabilidade pode ser atribuída às diferenças nas capacidades de absorção de  $\text{Si}$  por parte das espécies. Além disso, o efeito do  $\text{Si}$  na tolerância ao estresse das plantas, geralmente é influenciado pela concentração de  $\text{Si}$ , pela intensidade e duração do estresse, pelos métodos de aplicação do  $\text{Si}$  e pelos sistemas de cultivo empregados nos experimentos (por exemplo, cultivo no solo ou hidroponia) (Khan et al., 2019; Thorne et al., 2020).

Tendo em vista que muitas variáveis apresentaram comportamento similar, foi realizada a análise de componentes principais (PCA) visando sintetizar e identificar as variáveis mais representativas dos tratamentos aplicados. Os resultados demonstram que uma parcela substancial da variabilidade dos dados foi explicada pelos dois primeiros PCs, totalizando conjuntamente 82,5% da variação total. O primeiro componente principal (PC1) contribuiu majoritariamente para essa variação, representando 58,1%, enquanto o segundo componente principal (PC2) contribuiu com 24,4%.

As variáveis que mais influenciaram a composição dos componentes foram o comprimento da parte aérea (COMP\_PA), a massa fresca da parte aérea (MF\_PA), a massa seca da parte aérea (MS\_PA), o volume de raiz (VOL\_RA) e os carboidratos solúveis totais da parte aérea (CST\_PA), refletindo a influência dos tratamentos sobre essas características. Por outro lado, variáveis como o teor de sódio na raiz (Na\_RA)

e na parte aérea (Na\_PA), o teor de N na parte aérea (N\_PA) e as proteínas da raiz (PROT\_RA) não tiveram contribuições relevantes para a composição dos componentes principais.

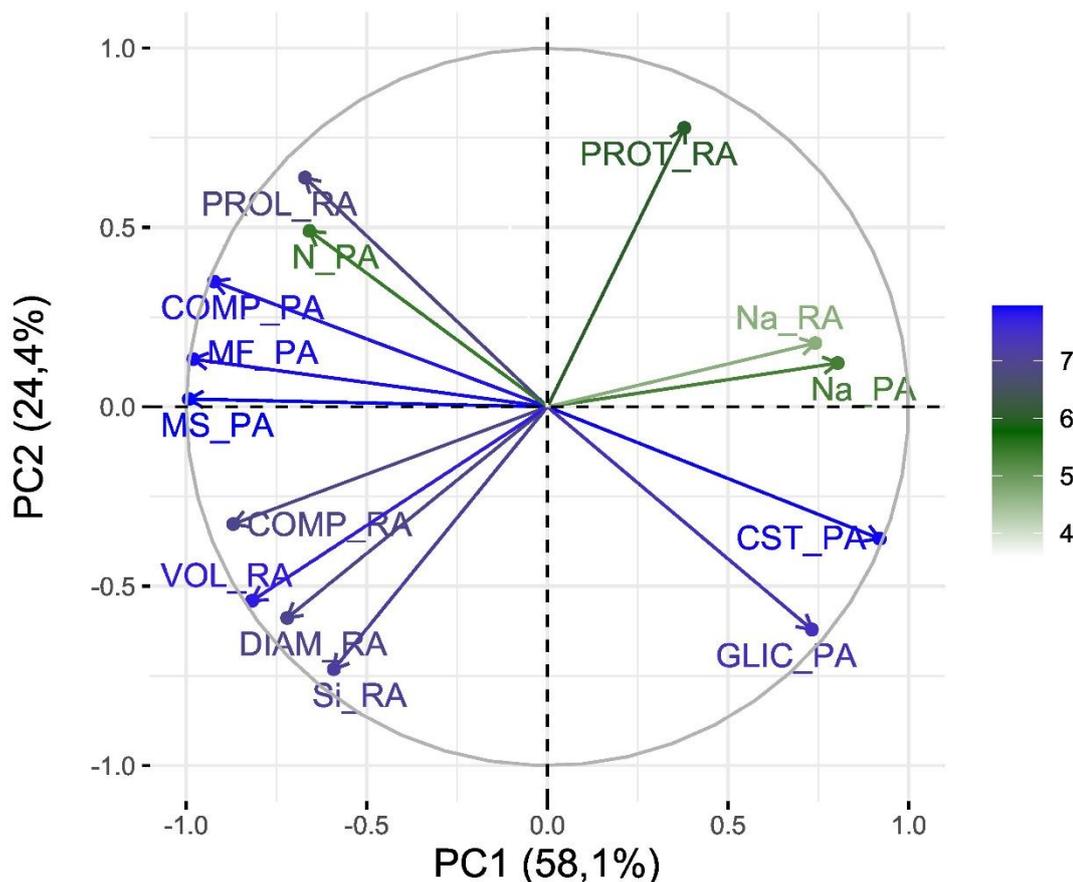


Figura 6. *Biplot* obtido com os valores dos dois primeiros componentes principais, mostrando a dispersão, o grau de associação das diferentes variáveis que mais contribuíram no estudo das mudas de abacaxizeiro 'BRS Imperial' cultivadas em sistema hidropônico com uso de NaCl e Si. Prolina na raiz (PROL\_RA), massa seca da parte aérea (MS\_PA), massa fresca da parte aérea (MF\_PA), comprimento da parte aérea (COMP\_PA), N na raiz (N\_RAIZ), Si na raiz (SI\_RA), diâmetro da raiz (DIAM\_RA), volume da raiz (VOL\_RA), comprimento da raiz (COMP\_RA), Na na raiz (Na\_RA), Na na parte aérea (Na\_PA), proteínas na raiz (PROT\_RA), glicina na parte aérea (GLI\_PA), carboidratos solúveis totais na parte aérea (CST\_PA).

Adicionalmente, foram observadas correlações entre diferentes características das plantas. Por exemplo, as características biométricas da parte aérea (comprimento, massa fresca e massa seca) apresentaram correlações positivas entre si, mas

correlações negativas com o conteúdo de carboidratos solúveis totais na parte aérea. O teor de Si na raiz (Si\_RA) correlacionou-se positivamente com variáveis relacionadas ao sistema radicular, como comprimento, diâmetro e volume radicular, indicando um efeito benéfico do silício nessas características. Por outro lado, essas mesmas variáveis apresentaram correlações negativas com o teor de Na na raiz (Na\_RA), sugerindo que um maior teor de sódio pode inibir o crescimento radicular. Esses resultados corroboram relatos anteriores sobre o efeito negativo do sódio no crescimento das plantas (Ali et al., 2021).

Para as substâncias osmorreguladoras, a PCA relevou uma correlação negativa entre glicina na parte aérea (GLIC\_PA) e prolina na raiz (PROL\_RA), isso pode indicar que a planta está direcionando seus recursos para um único osmorregulador. A síntese de glicina e prolina requer energia e recursos metabólicos. Se a planta perceber que pode alcançar uma adaptação eficaz usando apenas um dos osmorreguladores, pode optar por direcionar seus recursos para a síntese desse composto específico, economizando energia e nutrientes (Taiz et al., 2017).

Esses resultados fornecem entendimentos importantes sobre como os diferentes tratamentos influenciam as características das plantas estudadas, destacando quais variáveis são mais relevantes e como elas interagem entre si.

## CONCLUSÕES

A salinidade tem um efeito negativo nas variáveis biométricas da parte aérea das mudas de abacaxizeiro 'BRS Imperial', incluindo comprimento, massa fresca e seca, e área foliar, quando cultivadas em sistema hidropônico com NaCl e Si.

A suplementação com silício (Si) na solução nutritiva apresenta um efeito benéfico em alguns parâmetros radiculares das mudas de abacaxizeiro 'BRS Imperial', como comprimento, área superficial e volume total das raízes.

A salinidade afeta a atividade bioquímica das mudas de abacaxizeiro 'BRS Imperial', e a suplementação de Si na solução nutritiva contribui para o aumento de

substâncias osmorreguladoras, como carboidratos solúveis totais e glicina na parte aérea das plantas.

Para os parâmetros nutricionais, a adição de Si na solução não contribui com o incremento do teor de nitrogênio (N) nas plantas, nem para a redução do teor de sódio (Na), no entanto, para o teor de cloro (Cl), o Si promove efeitos variáveis, com redução nas raízes na condição de 5,5 mS.cm<sup>-1</sup>. Conseqüentemente, os efeitos adversos da salinidade causada pelo NaCl nas mudas de abacaxizeiro 'BRS Imperial' foram, principalmente, atribuídos ao excesso de sódio.

#### AGRADECIMENTOS

A Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) pelo apoio financeiro, à Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) e ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal UENF.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbasi, G. H., Akhtar, J., Ahmad, R., Jamil, M., Anwar-ul-Haq, M., Ali, S., Ijaz, M., (2015) Potassium application mitigates salt stress differentially at different growth stages in tolerant and sensitive maize hybrids. *Plant Growth Regulation*, 76: 111-125. <https://doi.org/10.1007/s10725-015-0050-1>.
- Abbas, T., Balal, R. M., Shahid, M. A., Pervez, M. A., Ayyub, C. M., Aqueel, M. A., et al. (2015) Silicon-induced alleviation of NaCl toxicity in okra (*Abelmoschus esculentus*) is associated with enhanced photosynthesis, osmoprotectants and

antioxidant metabolism. *Acta Physiologiae Plantarum*, 37: 6. DOI: 10.1007/s11738-014-1768-5.

Abid, M., Zhang, Y. J., Li, Z., Bai, D. F., Zhong, Y. P., Fang, J. B. (2020) Effect of Salt stress on growth, physiological and biochemical characters of Four kiwifruit genotypes. *Scientia Horticulturae*, 271: 109473. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109473>.

Ahmad, P., Ahanger, M. A., Alam, P., Alyemeni, M. N., Wijaya, L., Ali, S., Ashraf, M. (2019) Silicon (Si) Supplementation Alleviates NaCl Toxicity in Mung Bean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] Through the Modifications of Physio-biochemical Attributes and Key Antioxidant Enzymes. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38: 70-82. DOI: 10.1007/s00344-018-9810-2.

Al-Aghabary, K., Zhu, Z., Shi, Q. H. (2005) Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. *Journal of plant nutrition*, 27 (12): 2101-2115. DOI: 10.1081/PLN-200034641.

Ali, M., Afzal, S., Parveen, A., Kamran, M., Javed, M. R., Abbasi, G. H., Malik, Z., Riaz, M., Ahmad, S., Chattha, M., Ali, M., Ali, Q., Uddin, M. Z., Uddin, M. Z., Rizwan, M., Ali, S. (2021) Silicon mediated improvement in the growth and ion homeostasis by decreasing Na<sup>+</sup> uptake in maize (*Zea mays* L.) cultivars exposed to salinity stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 158: 208-218. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2020.10.040>.

Alsaeedi, A., El-Ramady, H., Alshaal, T., El-Garawany, M., Elhawat, N., Al-Otaibi A. (2019) Silica nanoparticles boost growth and productivity of cucumber under water deficit and salinity stresses by balancing nutrients uptake. *Plant Physiology and Biochemistry*, 139:1-10. DOI: 10.1016/j.plaphy.2019.03.008.

Alzahrani, Y., Kuşvuran, A., Alharby, H. F., Kuşvuran, S., Rady, M. M. (2018) The defensive role of silicon in wheat against stress conditions induced by drought,

salinity or cadmium. *Ecotoxicology and environmental safety*, 154: 187-196. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.02.057.

Bates, L. S., Waldren, R. P., Teare, I. D. (1973) Rapid determination of free proline for water-stress studies. Short communication. *Plant and Soil*, 39: 205-207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>.

Bradford, M. (1976). A Rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72: 248-254. DOI: 10.1006/abio.1976.9999.

Hurtado, A. C., Chiconato, D. A., Prado, R. M., Sousa Junior, G. D. S, Gratão, P. L., Felisberto, G., Viciado, D O., Santos, D. M M. (2020) Different methods of silicon application attenuate salt stress in sorghum and sunflower by modifying the antioxidative defense mechanism. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 15: 110964. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110964>.

Cavalcante, L. F., Cordeiro, J. C., Nascimento, J. A. M., Cavalcante, Í. H. L., Dias, T. J. (2010) Fontes e níveis da salinidade da água na formação de mudas de mamoeiro cv. Sunrise Solo. *Semina: Ciências Agrárias*, 31 (1): 1281- 1290. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2010v31n4Sup1p1281>.

Chapman, H. D. (1973) Diagnostic criteria for plants and soils. Riverside: Department of Soils and Plant Nutrition, University of California, 793p.

Chen, T., Shabala, S., Niu, Y., Chen, Z-H., Shabala, L., Meinke, H., Venkataraman, G., Pareek, A., Xu, J., Zhou, M. (2021) Molecular mechanisms of salinity tolerance in rice. *The Crop Journal*, 9 (3): 506-520. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2021.03.005>.

Conceição, S. S., Oliveira Neto, C. F., Marques, E. C., Barbosa, A. V., Galvao, J. R., Oliveira, T. B., Okumura, R. S., Martins., J. T. S., Costa, T. C., Gomes-Filho, E. (2019) Silicon modulates the activity of antioxidant enzymes and nitrogen

compounds in sunflower plants under salt stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65 (9): 1237-1247. DOI: 10.1080/03650340.2018.1562272.

Coskun, D., Britto, D. T., Huynh, W. Q., Kronzucker, H. J. (2016) The role of silicon in higher plants under salinity and drought stress. *Frontiers in Plant Science*, 7:1072. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01072>.

Cui, G., Xiao, X., Zhang, W. J., Lang, D., Li, Z., Zhang, X. (2021) Exogenous silicon relieve drought stress and salt stress of *Glycyrrhiza uralensis* seedlings by regulating proline metabolism and nitrogen assimilation. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 96 (6): 728-737. DOI: 10.1080/14620316.2021.1921624.

Debouba, M., Maâroufi-Dghimi, H., Suzuki, A., Ghorbel, M. H., Gouia, H (2007) Changes in growth and activity of enzymes involved in nitrate reduction and ammonium assimilation in tomato seedlings in response to NaCl stress. *Annals of Botany*, 99 (6): 1143-1151 DOI: 10.1093/aob/mcm050.

Denaxa, N. -K., Nomikou, A., Malamos, N., Liveri, E., Roussos, P. A., Papatropoulos, V. (2022) Salinity Effect on Plant Growth Parameters and Fruit Bioactive Compounds of Two Strawberry Cultivars, Coupled with Environmental Conditions Monitoring. *Agronomy*, 12 (10): 2279. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102279>.

De Sá, J. R., Toledo, F. H. S. F., Mariño, Y. A., Soares, C. R. F. S., Ferreira, E. V. O. (2021) Growth and nutrition of *Passiflora edulis* submitted to saline stress after silicon application. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 43 (1): 1-11. <https://doi.org/10.1590/0100-29452021057>.

Dubois, M., Giles, K. A., Hamilton, J. K., Robers, P. A., Smithanal, F., Chem. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28 (3): 350-356. <http://dx.doi.org/10.1021/ac60111a017>.

- Ferreira, E. B., Cavalcante, P. P., Nogueira, D. A. (2021) ExpDes.pt: Pacote Experimental Designs (Portugues). R package version 1.2.2. <https://CRAN.R-project.org/package=ExpDes.pt>.
- Greive, C. M, Grattan, S. R. (1983) Rapid assay for determination of water-soluble quaternary amino compounds. *Plant Soil*, 70: 303-307. <https://doi.org/10.1007/BF02374789>.
- Hasanuzzaman, M., Oku, H., Nahar, K., Bhuyan, M. B., Al Mahmud, J., Baluska, F., Fujita, M. (2018) Nitric oxide-induced salt stress tolerance in plants: ROS metabolism, signaling, and molecular interactions. *Plant Biotechnol*, 12: 77-92. <https://doi.org/10.1007/s11816-018-0480-0>.
- Hassanvand, F., Nejad, A. R., Fanourakis, D. (2019) Morphological and physiological components mediating the silicon-induced enhancement of geranium essential oil yield under saline conditions. *Industrial Crops and Products*,134: 19-25. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.03.049>.
- Hoagland, D. R., Arnon, D. I. (1950) The waterculture method for growing plants without soil. Berkeley, CA: California Agricultural Experiment Station (Circ. 347).
- Ismail, L. M., Soliman, M. I., Abd El-Aziz, M. H., Abdel-Aziz, H. M. M. Impact of Silica Ions and Nano Silica on Growth and Productivity of Pea Plants under Salinity Stress. *Plants*, 11(4): 494. <https://doi.org/10.3390/plants11040494>.
- Jackson, M. L. (1965) Soil chemical analysis. New Jersey: Prentice Hall, 498p.
- Javaid, T., Farooq, M. A., Akhtar, J., Saqib, Z. A., Anwar-ul-Haq M. (2019) Silicon nutrition improves growth of salt-stressed wheat by modulating flows and partitioning of Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> and mineral ions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 141: 291-299. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.06.010>.
- Jiménez-Arias, D., García-Machado, F. J., Morales-Sierra, S., García-García, A. L., Herrera, A. J., Valdés, F., Luis, J. C., Borges, A. A. (2021) A Beginner's Guide to

Osmoprotection by Biostimulants. *Plants*, 10 (2): 363.  
<https://doi.org/10.3390/plants10020363>.

Joshi, S., Nath, J., Singh, A. K. (2022) Ion transporters and their regulatory signal transduction mechanisms for salinity tolerance in plants. *Physiol Plant*, 174 (3): e13702. <https://doi.org/10.1111/ppl.13702>.

Kassambara, A. and Mundt, F. (2020) Factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. R Package Version 1.0.7.  
<https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>.

Khan, A., Khan, A. L., Muneer, S., Kim, Y. H., Al-Rawahi, A., Al-Harrasi, A. (2019) Silicon and Salinity: Crosstalk in Crop-Mediated Stress Tolerance Mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 10: 1429. DOI: 10.3389/fpls.2019.01429.

Khan, W. U. D., Aziz, T., Maqsood, M. A., Farooq, M., Abdullah, Y., Ramzani, P. M. A., Bilal S. M. (2018) Silicon nutrition mitigates salinity stress in maize by modulating ion accumulation, photosynthesis, and antioxidants, *Photosynthetica*, 56: 1047-1057. <https://doi.org/10.1007/s11099-018-0812-x>.

Khorasaninejad, S., Zare, F., Hemmati, K. (2020) Effects of silicon on some phytochemical traits of purple coneflower (*Echinacea purpurea* L.) under salinity. *Scientia Horticulturae*, 264: 108954.  
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108954>.

Kleinheinz, V. (1999) Sulfur and chloride in the soil-plant system. Kassel: K+S Group, 99p.

Korndörfer, G. H., Pereira, H.S., Nola, A. (2004) Análise de silício: solo, planta e fertilizante. Uberlândia: Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, 34p.

Lacroix, R. L., Keeney, D. R., Walsh, L. M. (1970) Potentiometric titration of chloride in plant tissue extracts using the chlorine ion electrode. *Communications in Soil*

*Science and Plant Analysis*, 1 (1): 1-6.  
<https://doi.org/10.1080/00103627009366233>.

Liu, C., Zhao, X., Yan, J., Yuan, Z., Gu, M. (2020) Effects of Salt Stress on Growth, Photosynthesis, and Mineral Nutrients of 18 Pomegranate (*Punica granatum*) Cultivars. *Agronomy*, 10 (1): 27. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010027>.

Ma, J. F., Yamji N. (2006) Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science*, 11 (8): 392-397. DOI: 10.1016/j.tplants.2006.06.007.

Malavolta, E., Vitti, G. C., Oliveira, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas. Piracicaba: POTAFOS, 1989. 201p.

Marinho, F. J. L., Fernandes, P. D., Gheyi, H. R. (1998) Desenvolvimento inicial do abacaxizeiro, cv. Smooth Cayenne, sob diferentes condições de salinidade da água. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2: 1-5.

Miranda, J. R. P., Carvalho, J. G., Freire, A. L.O.; Fernandes, A. R. (2010) Avaliação do silício como atenuador dos efeitos da salinidade na nutrição mineral de clones de *Anacardium occidentale* L. *Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia*, 7(3): 144-155.

Munns, R., James, R. A., Gilliham, M., Flowers, T. J., Colmer, T. D. (2016) Tissue tolerance: an essential but elusive trait for salt-tolerant crops. *Functional Plant Biology*, 43 (12):1103-1113. DOI: 10.1071/FP16187.

Nadeem, S. M., Ahmad, M., Zahir, Z. A., Kharal, M. A. (2016) Role of phytohormones in stress tolerance of plants. In: Hakeem, K. R., Akthar, M. S. (Eds) *Plant, soil and microbes*, Springer, Cham, pp 385-421. DOI:10.1007/978-3-319-29573-2\_17.

Nikolic, M., Nikolic, N., Liang, Y., Kirkby, E.A., Römheld, V. (2007) Germanium-68 as an adequate tracer for silicon transport in plants. Characterization of silicon

uptake in different crop species. *Plant physiology*, 143 (1): 495-503. DOI: 10.1104/pp.106.090845.

Peña-Calzada, K., Olivera-Viciedo, D., Calero-Hurtado, A., Prado, R. D., Habermann, E., Tenesaca, L. F. L., Ajila, G., Oliveira, R., Rodriguez, J. C., Gratao, P. L. (2023) Silicon mitigates the negative impacts of salt stress in soybean plants. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103 (9): 4360-4370. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12503>.

Pirasteh-Anosheh, H., Emam, Y., Rousta, M.J., Ashraf, M. (2017) Salicylic acid induced salinity tolerance through manipulation of ion distribution rather than ion accumulation. *Journal of Plant Growth Regulation*, 36 (1): 227-239. <https://doi.org/10.1007/s00344-016-9633-y>.

Rajasheker, G., Jawahar, G., Jalaja, N., Kumar, S. A., Kumari, P. H., Punita, D. L., Kishor, P. B. K. (2019) Role and regulation of osmolytes and ABA interaction in salt and drought stress tolerance. *Plant Signaling Molecules*. Woodhead Publishing, 417-436. DOI: 10.1016/B978-0-12-816451-8.00026-5.

R Core Team. (2014) R: A Language and Environment for Statistical Computing. Available from URL. <http://www.r-project.org>.

Santos, P.C., Silva, M. P., Carvalho, A. J. C., Freitas, M. S. M., Petri, D. J. C. Brochado, R. L., Biazatti, M. A. (2017) 'Vitória' pineapple seedlings fertilized with potassium chloride and silicic acid: growth and nutritional composition. *Brazilian Journal of Agricultural Sciences*, 12 (3): 309-315. <https://doi.org/10.5039/agraria.v12i3a5455>.

Saud, S., Li, X., Chen, Y., Zhang, L., Fahad, S., Hussain, S., Chen, Y. (2014) Silicon application increases drought tolerance of Kentucky bluegrass by improving plant water relations and morpho-physiological functions. *Scientific World Journal*, 2014: 368694. DOI: 10.1155/2014/368694.

- Stavridou, E., Hastings, A., Webster, R. J., Robson, P. R. H. (2017) The impact of soil salinity on the yield, composition and physiology of the bioenergy grass *Miscanthus × giganteus*. *GCB Bioenergy: Bioproducts for a Sustainable Bioeconomy*, 9: 92-104. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12351>.
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., Murphy, A. (2017) *Plant physiology and development*. 6nd ed. Porto Alegre, Artmed, 888 p.
- Teixeira, L. A. J., Quaggio, J. A., Cantarella, H., Mellis, E. V. (2011a) Potassium fertilization for pineapple: effects on soil chemical properties and plant nutrition. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 33 (2): 627-636. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452011000200036>.
- Teixeira, L. A. J., Quaggio, J. A., Cantarella, H., Mellis, E. V.. (2011b). Potassium fertilization for pineapple: effects on plant growth and fruit yield. *Revista Brasileira De Fruticultura*, 33 (2): 618-626. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452011000200035>.
- Thorne, S. J., Hartley, S. E., Maathuis, F. J. M. (2020) Is Silicon a Panacea for Alleviating Drought and Salt Stress in Crops? *Frontiers in Plant Science*, 11: 1221. DOI: 10.3389/fpls.2020.01221.
- Torabi, F., Majd, A., Enteshari, S. (2015) The effect of silicon on alleviation of salt stress in borage (*Borago officinalis* L.). *Soil Science and Plant Nutrition*, 61 (5): 788-798. DOI: 10.1080/00380768.2015.1005540.
- Weatherburn, M. W. (1967) Phenol-hypochlorite reaction for determination of ammonia. *Analytical Chemistry*, 39: 971-974. <https://doi.org/10.1021/ac60252a045>.
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. <https://ggplot2.tidyverse.org>.

- Zhang, F., Yang, Y., He, W., Zhao, X., Zhang, L. (2004) Effects of salinity on growth and compatible solutes of callus induced from *Populus euphratica*. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, 40: 491-494. doi:10.1079/IVP2004546.
- Zhu, Y., Gong, H. (2014) Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agronomy for Sustainable Development*, 34 (2): 455-472. 10.1007/s13593-013-0194-1.
- Zhu, Y., Guo, J., Feng, R. Jia, J., Han, W., Gong, H. (2016) The regulatory role of silicon on carbohydrate metabolism in *Cucumis sativus* L. under salt stress. *Plant Soil*, 406: 231-249. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2877-2>.

## 4 CONCLUSÕES

O abacaxizeiro (*Ananas comosus* L.), espécie considerada originária do Brasil, apresenta grande importância econômica e social. A demanda crescente por alimentos tem contribuído para a expansão da produção agrícola em áreas com solos degradados por salinidade, inapropriado ao cultivo, possivelmente em consequência de manejo inadequado da irrigação e do solo, através da prática de irrigação sem sistema de drenagem, aplicação de fertilizantes e defensivos agrícolas com alta concentração de sais. Neste contexto, o abacaxi é uma cultura alternativa de cultivo nos tabuleiros costeiros do Nordeste e Sudeste do Brasil, principalmente em regiões áridas e semiáridas, estando sujeito ao cultivo em locais propícios à ocorrência de acúmulo de sais. Porém, existem poucos estudos com a cultura que englobem avaliação do crescimento e metabolismo em condições salinas e, principalmente, atrelado ao uso do Si. Desta maneira, esta tese foi dividida em dois trabalhos. Foram conduzidos dois experimentos em casa de vegetação em Campos dos Goytacazes (latitude = 21°19'23" S, longitude = 41°10'40" W). O primeiro experimento teve como objetivo avaliar o efeito da salinidade nas respostas biométricas e bioquímicas em mudas de abacaxizeiro (Pérola e BRS Imperial). Foi adotado o delineamento de blocos ao acaso, no esquema fatorial 2x5, sendo duas cultivares (Pérola e BRS Imperial) e cinco concentrações de NaCl (0, 40, 80, 120 e 160 mM) adicionados na solução nutritiva de Hoagland e Arnon. Após 40 dias de tratamento, avaliou-se o comprimento da parte aérea e raiz e suas massas fresca e seca; diâmetro do caule; número de folhas; área foliar; volume total; área superficial e diâmetro médio radicular, e substâncias bioquímicas. As avaliações biométricas indicaram que o NaCl influenciou médias do comprimento radicular para a 'BRS Imperial', com elevação dos valores até a dose estimada em 59,31 mM. Nas outras características, verificaram-se apenas diferenças entre cultivares, no qual a 'Pérola' apresentou maior comprimento e massa fresca da parte aérea, área foliar, diâmetro do caule e diâmetro médio radicular. A 'BRS Imperial' apresentou médias superiores em massa seca da parte aérea, número de folhas, massa fresca e seca radicular, área superficial e volume total radicular. Neste primeiro estudo, concluímos que no período de 40 dias, todas as variáveis de crescimento analisadas no estudo, exceto o comprimento radicular, não são afetadas com as concentrações crescentes de NaCl, porém, as cultivares

apresentam comportamentos distintos. Na 'BRS Imperial', a redução do comprimento radicular começa a partir de 59,31 mM de NaCl e a concentração de 160 mM de NaCl foi destacada como aquela que causa a menor capacidade de crescimento radicular. Os resultados indicam que a 'BRS Imperial' apresenta uma resposta adaptativa favorável em relação ao crescimento e desenvolvimento em ambientes salinos, particularmente evidente nas características morfológicas das raízes. Portanto, recomenda-se o cultivo desta cultivar em condições salinas. A cultivar Pérola demonstrou-se mais sensível ao efeito da salinidade, adotando como estratégia de defesa o ajuste osmótico, evidenciadas pelas concentrações mais elevadas de osmoprotetores glicina betaina e prolina. O segundo experimento teve como objetivo avaliar a biometria, atividade bioquímica e composição nutricional em mudas de abacaxizeiro 'BRS Imperial' cultivado em condições salinas com silício. O delineamento experimental adotado foi em blocos ao acaso, em esquema fatorial 3x2, com três concentrações de NaCl (0, 1,5 e 3,5 mS.cm<sup>-1</sup>) e duas concentrações de silício (0 e 1,5 mM) adicionados na solução nutritiva de Hoagland e Arnon. Após 126 dias de tratamento, avaliou-se o comprimento da parte aérea e raiz e suas massas fresca e seca; diâmetro do caule; número de folhas; área foliar; volume total; área superficial e diâmetro médio radicular, substâncias bioquímicas e teor de N, Si, Na, e Cl. Neste segundo estudo, concluímos que a salinidade tem um efeito negativo nas variáveis biométricas da parte aérea das mudas de abacaxizeiro 'BRS Imperial', incluindo comprimento, massa fresca e seca, e área foliar, quando cultivadas em sistema hidropônico com NaCl. A suplementação com silício (Si) na solução nutritiva, apresenta um efeito benéfico em alguns parâmetros radiculares das mudas de abacaxizeiro 'BRS Imperial', como comprimento, área superficial e volume total das raízes. A salinidade afeta a atividade bioquímica das mudas de abacaxizeiro 'BRS Imperial' e a suplementação de Si na solução nutritiva contribui para o aumento de substâncias osmorreguladoras, como carboidratos solúveis totais e glicina na parte aérea das plantas. Para os parâmetros nutricionais, a adição de Si na solução não contribui com incremento do teor de nitrogênio (N) nas plantas, nem para a redução do teor de sódio (Na), no entanto, para o teor de cloro (Cl), o Si promove efeitos variáveis, com redução nas raízes na condição de 5,5 mS.cm<sup>-1</sup>. Conseqüentemente, os efeitos adversos da salinidade causada pelo NaCl nas mudas de abacaxizeiro 'BRS Imperial' foram, principalmente, atribuídos ao excesso de sódio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta-Motos, J., Ortuno, M., Bernal-Vicente, A., Diaz-Vivancos, P., Sanchez-Blanco, M., Hernandez, J. (2017) Plant responses to salt stress: adaptive mechanisms. *Agronomy*, 7(1):18. <https://doi.org/10.3390/agronomy7010018>.
- Aghion, D., Beauchesne, G. (1960) Utilization de la technique de culture sterile d'organes pour des clones d'Ananas. *Fruits*, 15(10):464-466.
- Alam, A., Ullah, H., Attia, A., Datta, A. (2020) Effects of Salinity Stress on Growth, Mineral Nutrient Accumulation and Biochemical Parameters of Seedlings of Three Citrus Rootstocks. *International Journal of Fruit Science*, 20(04):786-804. <https://doi.org/10.1080/15538362.2019.1674762>.
- Aragón, C., Carvalho, L., González, J., Escalona, M., Amancio, S. (2012) The physiology of ex vitro pineapple (*Ananas comosus* L. Merrill var MD-2) as CAM or C3 is regulated by environmental conditions. *Plant Cell Reports*, 31(4):757-769. DOI: 10.1007/s00299-011-1195-7.
- Arif, Y., Singh, P., Siddiqui, H., Bajguz, A., Hayat, S. (2020) Salinity induced physiological and biochemical changes in plants: An omic approach towards salt stress tolerance. *Plant Physiology and Biochemistry*, 156:64-77. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.08.042>.
- Ayers, R.S., Westcot, D.W. (1999) Qualidade da água na agricultura. Campina Grande: UFPB, 153p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29).
- Barbosa Filho, M.P., Snyder, G.H., Fagerua, N.K., Datnoff, L.E., Silva, O.F. (2001) Silicato de cálcio como fonte de silício para o arroz de sequeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25(2):325-330. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000200009>.

- Bartholomew, D.P., Paull R.E., Rohrbach, K.G. (2002) *The Pineapple Botany, Production and Uses*. University of Hawaii at Manoa Honolulu USA: CABI Publishing, 301 p.
- Berilli, S.S., Almeida, S.B., Carvalho, A.J.C., Freitas, S.J., Berilli, A.P.C.G., Santos, P.C. (2011) Avaliação sensorial dos frutos de cultivares de abacaxi para consumo in natura. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 33(sp1):592-598. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452011000500081>.
- Borland, A.M., Hartwell, J., Weston, D.J., Schlauch, K.A., Tschaplinski, T.J., Tuskan, G.A., Yang, X., Cushman J.C. (2014). Engineering crassulacean acid metabolism to improve water-use efficiency. *Trends in Plant Science*, 19(5):327-338. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.01.00>.
- Brito, C.F.B., Fonseca, V.A., Santos, M.R., Donato, S.L.R., Arantes, A.M., Santos, A.J. (2020) Photochemical efficiency in pineapple plants under saline water irrigation. *Revista Ambiente & Água*, 15(5):e2564. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2564>.
- Cabral, J.R.S., Matos, A.P., Jughans, D.T. (2003) Desenvolvimento de híbridos de abacaxi resistentes à fusariose. Cruz da Almas: Embrapa-CNPMPF, 4p. (Comunicado Técnico, 88).
- Cabral, J.R.S., Matos, A.P. (2005). Imperial, nova cultivar de abacaxi. Cruz da Almas: Embrapa-CNPMPF, 4p. (Comunicado Técnico, 114).
- Caetano, L.C.S., Ventura, J.A., Balbino, J.M.S. (2015) Comportamento de genótipos de abacaxizeiro resistentes à fusariose em comparação a cultivares comerciais suscetíveis. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 37(2):404-409. <https://doi.org/10.1590/0100-2945-117/14>.
- Carr, M.K.V. (2012) The water relations and irrigation requirements of pineapple (*Ananas comosus* var. *comosus*): a review. *Experimental Agriculture*, 48(4):488-501. <http://dx.doi.org/10.1017/S0014479712000385>.

- Cavalcante, L.F., Cordeiro, J.C., Nascimento, J.A.M., Cavalcante, Í.H.L., Dias, T.J. (2010) Fontes e níveis da salinidade da água na formação de mudas de mamoeiro cv. Sunrise Solo. *Semina: Ciências Agrárias*, 31(1):1281-1290. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2010v31n4Sup1p1281>.
- Chen, T.W., Kahlen, K., Stutzel, H. (2015) Disentangling the contributions of osmotic and ionic effects of salinity on stomatal, mesophyll, biochemical and light limitations to photosynthesis. *Plant, Cell & Environment*, 38(8):1528-1542. DOI: 10.1111/pce.12504.
- Chen, Y., Wang, Y., Huang, J., Zheng, C., Cai, C., Wang, Q., Wu, C. -A. (2017) Salt and methyl jasmonate aggravate growth inhibition and senescence in *Arabidopsis* seedlings via the JA signaling pathway. *Plant Science*, 261:1-9. 10.1016/j.plantsci.2017.05.005.
- Chrysargyris, A., Papakyriakou, E., Petropoulos, S.A., Tzortzakis, N. (2019) The combined and single effect of salinity and copper stress on growth and quality of *Mentha spicata* plants. *Journal of Hazardous Materials*, 368:584-593. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.01.058.
- Coelho, R.I., Carvalho, A.J.C., Lopes, J.C., Teixeira, S.L., Marinho, C.S. (2007) Coroa do abacaxi 'Smooth Cayenne' na produção de mudas do tipo rebentão. *Ciência e Agrotecnologia*, 31(6):1867-1871. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542007000600040>.
- CONAB. (2020) Companhia Nacional De Abastecimento. Disponível em: <file:///C:/Users/User/Downloads/Compendio\_de\_Estudos\_da\_Conab\_-\_V.24\_-\_Participacao\_do\_Abacaxi\_no\_Desenvolvimento\_Economico\_nas\_Regioes\_Produtoras.pdf>. Acesso em: 05 de dezembro de 2020.
- Conceição, S.S., Oliveira Neto, C.F., Marques, E.C., Barbosa, A.V., Galvao, J.R., Oliveira, T.B., Okumura, R.S., Martins, J.T.S., Costa, T.C., Gomes-Filho, E. (2019) Silicon modulates the activity of antioxidant enzymes and nitrogen compounds in

sunflower plants under salt stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(9): 1237-1247. DOI: 10.1080/03650340.2018.1562272.

Coskun, D., Britto, D.T., Huynh, W.Q., Kronzucker, H.J. (2016) The role of silicon in higher plants under salinity and drought stress. *Frontiers in Plant Science*, 7:1072. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01072>.

Costa, R.R., Moraes, J.C., da Costa, R.R. (2009) Interação silício-imidacloprid no comportamento biológico e alimentar de *Schizaphis graminum* (Rond.) (Hemiptera: Aphididae) em plantas de trigo. *Ciência e Agrotecnologia*, 33(2):455-460. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542009000200014>.

Couto, T.R., Silva, J. R., Moraes, C.R.O., Ribeiro, M.S., Netto, A.T., Carvalho, V.S., Campostrini, E. (2016) Photosynthetic metabolism and growth of pineapple (*Ananas comosus* L. Merr.) cultivated ex vitro. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 28(3):333-339. <http://dx.doi.org/10.1007/s40626-016-0062-x>.

Crestani, M., Barbieri, R.L., Hawerth, F.J., Carvalho, F.I.F., Oliveira, A.C. (2010) Das Américas para o Mundo: Origem, domesticação e dispersão do abacaxizeiro. *Ciência Rural*, 40(6):1473-1483. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782010000600040>.

Cunha, G.A.P., Cabral, R.S.C. (1999). Taxonomia, espécies, cultivares e morfologia. In: Cabral, J.R.S., Souza, L.F. da S. O abacaxizeiro – cultivo, agroindústria e economia. 3. ed. Brasília, Embrapa/Mandioca e Fruticultura, p.15-51.

Cunha, G.A.P., Reinhardt, D.H.R.C. (2004). Manejo de mudas de abacaxi. Cruz das Almas, EMBRAPA. (Comunicado Técnico, 105).

Da Mata, D.A. (2023) Fruticultura Tropical: Evolução da cultura do abacaxizeiro no Brasil e seus impactos econômicos e sociais na Paraíba. *Revista Científica Rural*, 25(1):318-238. <https://doi.org/10.29327/246831.25.1-21>.

- Denaxa, N.-K., Nomikou, A., Malamos, N., Liveri, E., Roussos, P.A., Papatziropoulos, V. (2022). Salinity Effect on Plant Growth Parameters and Fruit Bioactive Compounds of Two Strawberry Cultivars, Coupled with Environmental Conditions Monitoring. *Agronomy*,12(10):2279. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102279>.
- Detmann, K.C., Araújo, W.L., Martins, S.C.V., Sanglard, L.M.V.P., Reis, J.V., Detmann, E., Rodrigues, F.Á., Nunes-Nesi, A., Fernie, A.R., DaMatta, F.M. (2012) Silicon nutrition increases grain yield, which, in turn, exerts a feed-forward stimulation of photosynthetic rates via enhanced mesophyll conductance and alters primary metabolism in rice. *New Phytologist*, 196(3):752-762. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2012.04299. X.
- El Ghazali, G.E.B. (2020) Suaeda vermiculata Forssk. ex J.F. Gmel.: structural characteristics and adaptations to salinity and drought: a review. *International Journal of Sciences*, 9(2):28-33. DOI: 10.18483/ijSci.2268.
- EMATER-RIO. (2019) Relatório de atividades 2019. Disponível em: <C:/Users/User/OneDrive/Documentos/PROJETO%20DOC/ARTIGOS/Relatorio\_de\_Atividades\_2019\_20\_08\_2020.pdf>. Acesso em: 5 de dezembro de 2020.
- EMBRAPA. (2019) Produção brasileira de abacaxi em 2019. Disponível em: <embrapa 201 abacaxi.pdf>. Acesso em: 05 de dezembro de 2020.
- Epstein E. (2009) Silicon: its manifold roles in plants. *Annals of Applied Biology*, 155 (2): 155-160. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2009.00343.x>.
- Epstein, E. (1999). Silicon. *Annual review of plant physiology and plant molecular biology*, 50: 641-664. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.641>.
- Epstein, E., Bloom, A. J. (2006) *Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas*. Editora: Planta – Londrina – PR, 404p.

- Fang, J., Miao, C., Chen, R., Ming, R. (2016) Genome-wide comparative analysis of microsatellites in pineapple. *Tropical Plant Biology*, 9(3):117-135. <https://doi.org/10.1007/s12042-016-9163-6>.
- FAO. (2022) Food and Agriculture Organization. FAOSTAT. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2024.
- Flowers, T.J., Munns, R., Colmer, T.D. (2015) Sodium chloride toxicity and the cellular basis of salt tolerance in halophytes. *Annals of Botany*, 115(03):419-431. DOI: 10.1093/aob/mcu217.
- Freitas, P.A.F., Carvalho, H.H., Costa, J.H., Miranda, R.S., Saraiva, K., Oliveira, F.D. B., Coelho, D.G., Prisco, J.T., Gomes-Filho, E. (2019) Salt acclimation in sorghum plants by exogenous proline: physiological and biochemical changes and regulation of proline metabolism. *Plant Cell Reports*, 38(03):403-416. DOI: 10.1007/s00299-019-02382-5.
- Freitas, S.J., Santos, P.C., Berilli, S.S., Lopes, L.C., Carvalho, A.J.C. (2014) Brotação, desenvolvimento e composição nutricional de mudas de abacaxizeiro provenientes de gemas axilares submetidas ao brassinosteroide. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 9(1):19-24. <https://doi.org/10.5039/agraria.v9i1a3270>.
- Frew, A., Weston, L. A., Reynolds, O.L., Gurr, G.M. (2018) The role of silicon in plant biology: a paradigm shift in research approach. *Annals of Botany*, 121(7):1265-1273. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy009>.
- Giongo, V., Bohnen, H. (2011) Relação entre alumínio e silício em genótipos de milho resistente e sensível a toxidez de alumínio. *Bioscience Journal*, 27(3):348-356.
- Hartley, S.E. (2015) Round and round in cycles? Silicon-based plant defences and vole population dynamics. *Functional Ecology*, 29(2):151-153. doi:10.1111/1365-2435.12365.

- Hasegawa, P.M., Bressan, R.A., Zhu, J.K., Bohnert, H.J. (2000) Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annual Review Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 51:463-499. DOI: 10.1146/annurev.arplant.51.1.463.
- Hernández-Salinas, M., Valdez-Aguilar, L.A., Alia-Tejacal, I., Alvarado-Camarillo, D., Cartmill, A. (2022) Silicon enhances the tolerance to moderate NaCl-salinity in tomato grown in a hydroponic recirculating system. *Journal of Plant Nutrition*, 45(3):413-425. DOI: 10.1080/01904167.2021.1963772.
- Hodson, M.J., White, P.J., Mead, A., Broadley, M.R. (2005) Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. *Annals of botany*, 96(6):1027-1046. DOI: 10.1093/aob/mci255.
- IBGE. (2019) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção Agrícola Municipal 2018. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612>>. Acesso em: 05 de dezembro de 2020.
- IBGE. (2022) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/14/10193>>. Acesso em: 10 de janeiro 2024.
- IPNI. (2015) International Plant Nutrition Institute. Silício. Nutri-Facts, Agronomic fact sheets on crop nutrientes, n 14. Disponível em: [http://www.ipni.net/publication/nutrifacts-na.nsf/0/A7B4AB4D35C153BF85257ECE006E0E34/\\$FILE/NutriFacts-NA-14.pdf](http://www.ipni.net/publication/nutrifacts-na.nsf/0/A7B4AB4D35C153BF85257ECE006E0E34/$FILE/NutriFacts-NA-14.pdf). Acesso em: 10 de janeiro de 2024.
- Isayenkov, S.V., Maathuis, F.J.M. (2019) Plant salinity stress: many unanswered questions remain. *Frontiers in Plant Science*, 10:80. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00080>.
- Islam, S., Zaid, A., Mohammad, F. (2021) Role of Triaccontanol in Counteracting the Ill Effects of Salinity in Plants: A Review. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40:1-10. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10064-w>.

- Khan, M.I.R., Reddy, P.S., Ferrante, A., Khan, N.A. (2019) Plant signaling molecules: role and regulation under stressful environments. Woodhead Publishing, Sawston.
- Kouadio, O.K.S., Yapo, E.S.S., Coulibaly, S., Tanoh, H.K. (2018) Effect of salinity on some morphophysiological characters of somatic embryogenesis-regenerated plants of pineapple [*Ananas comosus* (L.) Merr. Cv. Smooth cayenne]. *Journal of Recent Advances in Applied Sciences*, 31(1):1-9.
- Krishnamurthy, P., Qingsong, L., Kumar, P.P. (2018) Proteomics perspectives in postgenomic era for producing salinity stress-tolerant crops. In: *Salinity Responses and Tolerance in Plants*. 2:239-266. DOI:10.1007/978-3-319-90318-7\_10.
- Kumar, V., Khare, T., Sharma, M., Wani, S. H. (2017) ROS-induced signaling and gene expression in crops under salinity stress. In: Khan MIR, Khan NA (eds) *Reactive oxygen species and antioxidant systems in plants: role and regulation under abiotic stress*. Springer, Singapore, p. 159-184.
- Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H., Song, A. (2015) *Silicon in agriculture: From Theory to Practice*. Dordrecht: Springer, 10, 250p.
- Lopes Neto, J.J. Veras, K.S., Rosa, C.S., Silva, P.R., Luz, T.R.S.A., Diniz, J.S., Amaral, F.M.M., Sousa, I.H., Moraes, D.F.C. (2015) Estudo botânico, fitoquímico e avaliação de atividades biológicas do fruto de *Ananas comosus* var. *Comosus* (L.) Merrill (bromeliaceae). *Gaia Scientia*, 9(1):164-171.
- Ma, J.F., Mitani, N., Nagao, S., Konishi, S., Tamai, K., Iwashita, T., Yano, M. (2004) Characterization of the silicon uptake system and molecular mapping of the silicon transporter gene in rice. *Plant Physiology*, 136(9):3284-3289. DOI: 10.1104/pp.104.047365.
- Macedo, J.P.S., Cavalcante, L.F., Lobo, J.T., Pereira, M.B., Marcelino, A.D.A.L., Bezerra, F.T.C., Bezerra, M.A.F. (2019) Yield and Physical Quality of the Yellow Passion Fruit under Spacing within Plants and Water Salinity, *Journal of*

Experimental Agriculture International, 33(5):1-11. DOI: 10.9734/jeai/2019/v33i530153.

Maia, V. M., Pegoraro, R.F., Aspiazú, I., Oliveira, F.S., Nobre, D.A.C. (2019) Diagnosis and management of nutrient constraints in pineapple. *Fruit Crops: Diagnosis and Management of Nutrient Constraints*. Elsevier, Amsterdam, Chapter 50, p.739-760. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818732-6.00050-2>.

Malavolta, E. (1980) *Elementos de nutrição mineral de plantas*. Editora Agronômica CERES Ltda. São Paulo – SP, 251p.

Marafon, A.C., Endres, L. (2011) *Adubação silicatada em cana-de-açúcar*. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, p.46 (Documentos 307).

Matos, A.P., Junghans, D.T. Spironello, A. (2011) *Variedades de abacaxi resistentes à fusariose*. In *Embrapa Mandioca e Fruticultura-Artigo em anais de congresso*. In: semana internacional da fruticultura e agroindústria, agroflores. Fortaleza. *Frutal: anais*. Fortaleza: Fruta. CD-ROM, 1-6p.

Matos, A.P., Reinhardt, D.H., Sanches, N.F., Souza, F.S., Teixeira, F.A., Elias Júnior, J., Gomes, D.C. (2009) *Produção de Mudas Sadias de Abacaxi*. Circular Técnica, 89. Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical.

Mendes, L.S., Souza, C.H.E., Machado, V.J. (2011) *Adubação com silício: influência sobre o solo, planta, pragas e patógenos*. *Cerrado Agrociências*, 2:51-63.

Mendonça, V., Mendonça, L.F.M., Pereira, E.C., Leite, G.A., Costa, J.M., Medeiros, F.M.C. (2017) *The growth and nutrition of pineapple (Ananas comosus L.) plantlets under different water retention regimes and manure*. *African Journal of Agricultural Research*, 12(21):1852-1860. <https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11702>.

Menegale, M.L.C., Castro, G.S.A., Mancuso, M.A. (2015) *Silício: interação com o sistema solo-planta*. *Journal of Agronomic Sciences*, 4:435-454.

- Moradi, P., Vafaei, Y., Mozafari, A.A., Tahir, N.A. (2022) Nanoparticles and methyl jasmonate improve physiological response and increase expression of stress-related genes in strawberry cv. paros under salinity stress. *Silicon*, 14:10559-10569. <https://doi.org/10.1007/s12633-022-01791-8>.
- Munns, R., Tester, M. (2008) Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 9:651-681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>.
- Nawaz, K., Hussain, K., Majeed, A., Khan, F., Afghan, S., Ali, K. (2010) Fatality of salt stress to plants: Morphological, physiological and biochemical aspects. *African Journal of Biotechnology*, 9(34):5475-5480.
- Oliveira, A.L.P.C., Assis, J.G.A., Ceita, G., Palmeira, A.C.L., Guedes, M.L.S. (2004) Chromosome number for Bromeliaceae species occurring in Brazil. *Cytologia*, 69(2):161-166. <https://doi.org/10.1508/cytologia.69.161>.
- Oliveira-Cauduro, Y., Lopes, V.R., Bona, C.M., Alcantara, G.B., Biasi, L.A. (2016) Micropropagação de abacaxizeiro com enraizamento in vitro e ex vitro. *Plant Cell Culture & Micropropagation*, 12,(2):53-60.
- Paes, R.S., Moreira, S.C., Zappes, C.A. (2018) Conhecimento tradicional e o impacto da salinização em comunidades agrícolas no norte do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 49:167-182. <http://dx.doi.org/10.5380/dma.v49i0.54278>.
- Pedrotti, A., Chagas, R.M., Ramos, V.C., Prata, A. P. do N., Lucas, A.A.T., Santos, P.B. (2015). Causas e consequências do processo de salinização dos solos. *Revista Eletrônica Em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 19(2):1308-1324.
- Peña-Calzada, K., Olivera-Viciedo, D., Calero-Hurtado, A., Prado, R.D., Habermann, E., Tenesaca, L.F.L., Ajila, G., Oliveira, R., Rodriguez, J.C., Gratao, P.L. (2023) Silicon mitigates the negative impacts of salt stress in soybean plants. *Journal of*

the Science of Food and Agriculture, 103(9):4360-4370.  
<https://doi.org/10.1002/jsfa.12503>.

Per, T.S., Khan, N.A., Reddy, P.S, Masood, A., Hasanuzzaman, M., Khan, M.I.R., Anjum, N.A. (2017) Approaches in modulating proline metabolism in plants for salt and drought stress tolerance: phytohormones, mineral nutrients and transgenics. *Plant Physiology Biochemistry*, 115:126-140.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.03.018>.

Pirasteh-Anosheh, H., Emam, Y., Rousta, M.J., Ashraf, M. (2017) Salicylic acid induced salinity tolerance through manipulation of ion distribution rather than ion accumulation. *Journal of Plant Growth Regulation*, 36(1):227-239.  
<https://doi.org/10.1007/s00344-016-9633-y>.

Raven, J.A. (2001) Silicon transport at the cell and tissue level. In: Datnoff, L.E. et al. (Ed.). *Silicon in agriculture*. The Netherlands: Elsevier Science, 403p.

Reinhardt, D.H. (2000) A planta e o seu ciclo. In: Reinhardt, D. H., Souza, L.F.S., Cabral, J.R.S. (Org.) *Abacaxi e produção: aspectos técnicos*. Brasília: EMBRAPA, p. 13-14.

Reinhardt, D.H.R., Souza, L.F.S., Cunha, G.A.P. (2000) Exigências edafoclimáticas. In: Reinhardt, D.H., Souza, L.F.S., Cabral, J.R.S. (Ed.) *Abacaxi produção: aspectos técnicos*. Brasília: EMBRAPA, p.11-12.

Reinhardt, D.H., Bartholomew, D.P., Carvalho, A.C.P.P., Pádua, T.R.P., Junghans, D.T., Matos, A.P. (2018) Advances in pineapple plant propagation. *Revista Brasileira Fruticultura*, 40(6):01-22. <https://doi.org/10.1590/0100-29452018302>.

Reinhardt, D.H., Cunha, G.A.P., Souza, L.F.S. (2013) Clima e Solo. In: SANCHES, N. F.; MATOS, A.P. (Eds.). *Abacaxi: o produtor pergunta, a Embrapa responde*. Brasília: EMBRAPA, 196p.

- Richmond, K.E., Sussman M. (2003) Got silicon? The non-essential beneficial plant nutrient. *Current Opinion in Plant Biology*, 6(3):268-272. [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(03\)00041-4](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(03)00041-4).
- Sanchez-Guerrero, A., Fernández del-Saz, N., Florez-Sarasa, I., Ribas-Carbó, M., Ferni, A.R., Jiménez, A., Sevilla, F. (2019) Coordinated responses of mitochondrial antioxidative enzymes, respiratory pathways and metabolism in *Arabidopsis thaliana* thioredoxin *trxo1* mutants under salinity. *Environmental and Experimental Botany*, 162:212-222. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.02.026>.
- Santos, P.C., Freitas, S.J., Freitas, M.S.M., Sousa, L.B., Carvalho, A.J.C. (2011) Produção de mudas do tipo rebentão, utilizando coroas de três cultivares de abacaxi inoculadas com fungos micorrízicos. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 33(3):954-961. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452011005000091>.
- Santos, P.C., Silva, M.P.S., Freitas, S.J., Berilli, S.S., Altoé, J.A., Silva, A.A., Carvalho, A.J.C. (2014) Ácidos húmicos e brassinosteroide no crescimento e estado nutricional de rebentos de coroas de abacaxi. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 9(4):532-537. <https://doi.org/10.5039/agraria.v9i4a4425>.
- Saud, S., Li, X., Chen, Y., Zhang, L., Fahad, S., Hussain, S., Chen, Y. (2014) Silicon application increases drought tolerance of Kentucky bluegrass by improving plant water relations and morpho-physiological functions. *The Scientific World Journal*, 2014:1-10. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/368694>.
- Scherer, R.F., Garcia, A.C., Freitas, F.H.P., Dal Vesco, L.L., Steinmacher, D.A., Guerra, M.P. (2013) Nodule cluster cultures and temporary immersion bioreactors as a high performance micropropagation strategy in pineapple (*Ananas comosus* var. *comosus*). *Scientia Horticulturae*, 151:38-45. DOI: 10.1016/j.scienta.2012.11.027.
- Silva, R.L., Ferreira, C.F., Lêdo, C.A.S., Souza, E.H., Costa, M.A.P.C., Souza, F.V.D. (2016) Viability and genetic stability of pineapple germplasm after 10 years of in vitro

conservation. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 127(1):123-133. <https://doi.org/10.1007/s11240-016-1035-0>.

Silva, S.E.L., Souza, A.G.C., Berni, R.F., Souza, M.G. (2004) A Cultura do Abacaxizeiro no Amazonas. Circular técnica nº 21. ISSN 1517-2449. 6p. Manaus, AM.

Silva, S., Tassara, H. Abacaxi. (2001). In: Silva, S.; Tassara, H. *Frutas no Brasil*. 5. ed. São Paulo: Editora das Artes. p. 25-27.

Singh, M., Kumar, J., Singh, S., Singh, V.P., Prasad, S.M. (2015) Roles of osmoprotectants in improving salinity and drought tolerance in plants: A review. *Reviews. Environmental Science and Biotechnology*, 14:407-426. <https://doi.org/10.1007/s11157-015-9372-8>.

Souza, J.T., Trocoli, R.O., Monteiro, F.P. (2016) Plants from the Caatinga biome harbor endophytic *Trichoderma* species active in the biocontrol of pineapple fusariosis. *Biological Control*, 94:25-32. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2015.12.005>.

Souza, L.F.S., Reinhardt, D.H.R.C. (2009) Abacaxizeiro. In: Crisostomo, L. A., Naumov, A. (Org.). *Adubando para alta produtividade e qualidade: fruteiras tropicais do Brasil*. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical; Horgen: Instituto Internacional de Potassa, (IIP. Boletim, 18), p.182-205.

Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., Murphy, A. (2017) *Plant physiology and development*. 6nd ed. Porto Alegre, Artmed, 888 p.

Usman, I.S., Abdulmalik, M.M., Sani, L.A., Muhammad, A.N. (2013) Development of an efficient protocol for micropropagation of pineapple (*Ananas comosus* L. var. Smooth Cayenne). *African Journal of Agricultural Research*, 8(18):2053-2056. DOI: 10.5897/AJAR12.1763.

- Van Bockhaven, J., Estepe, K., Bauweraerts, I., Kikuchi, S., Asano, T., Hofte, M., De Vleeschauwer, D. (2015) Primary metabolism plays a central role in moulding silicon-inducible brown spot resistance in rice. *Molecular Plant Pathology*, 16(8):811-824. DOI: 10.1111/mpp.12236.
- Ventura, J.A., Costa, H., Caetano, L.C. (2009) Abacaxi 'Vitória': uma cultivar resistente à fusariose. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 31(4):632-637. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452009000400001>.
- Viana, E.S., Sasaki, F.F.C., Reis, R.C., Junghans, D.T., Guedes, I.S.A., Souza, E. (2020) Quality of fusariosis resistant pineapple FRF 632, Harvested at different maturity stages. *Revista Caatinga*, 33(2):541-549. <https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n226rc>.
- Wang, L., Li, Y., Jin, X., Liu, L., Dai, X., Liu, Y., Zhao, L., Zheng, P., Wang, X., Liu, Y., Zhao, L., Zheng, P., Wang, X., Liu, Y., Lin, D., Qin. (2020) Floral transcriptomes reveal gene networks in pineapple floral growth and fruit development. *Communications biology*, 3(500):1-15. <https://doi.org/10.1038/s42003-020-01235-2>.
- Zhang, J., Liu, J., Ming, R. (2014) Genomic analyses of the CAM plant pineapple. *Journal of Experimental Botany*, 65(13):01-10. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru101>.
- Zhang, Q., Dai, W. (2019) Plant response to salinity stress. In: Dai, W. (Ed.), *Stress Physiology of Woody Plants*. CRC Press, Boca Raton, p. 155-173.
- Zhu, Y., Gong, H. (2014). Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2):455-472. DOI: 10.1007/s13593-013-0194-1.

## APÊNDICE A

## ARTIGO 1

Tabela 1. Resumo da análise de variância (Quadrado médio) das variáveis de crescimento de mudas de duas cultivares de abacaxizeiro (BRS Imperial e Pérola) submetidas às concentrações crescentes de NaCl na solução nutritiva. Campos dos Goytacazes-RJ, 2023.

	<b>FV</b>	Bloco	Cult	Conc	Cult x Conc	<b>Resíduo</b>	<b>CV(%)</b>
	<b>GL</b>	3	1	4	4	27	
<b>Quadrado Médio</b>	Comprimento PA	7,15 <sup>ns</sup>	335,53*	13,68 <sup>ns</sup>	2,46 <sup>ns</sup>	3,57	6,87
	Comprimento RA	0,27 <sup>ns</sup>	258,12*	42,71*	35,95*	2,13	5,81
	Massa Fresca PA	69,54 <sup>ns</sup>	1903,30*	300,77 <sup>ns</sup>	60,17 <sup>ns</sup>	112,12	11,28
	Massa Fresca RA	22,64 <sup>ns</sup>	148,19*	18,38 <sup>ns</sup>	9,16 <sup>ns</sup>	10,44	15,83
	Massa Seca PA	0,48 <sup>ns</sup>	10,27*	2,63 <sup>ns</sup>	0,68 <sup>ns</sup>	1,33	9,55
	Massa Seca RA	0,11 <sup>ns</sup>	0,65*	0,09 <sup>ns</sup>	0,10 <sup>ns</sup>	0,07	14,10
	Área Foliar	6568,93 <sup>ns</sup>	306482,79*	7485,26 <sup>ns</sup>	4772,33 <sup>ns</sup>	3398,3	13,07
	Número de Folhas	6,03 <sup>ns</sup>	28,90*	4,98 <sup>ns</sup>	2,28 <sup>ns</sup>	3,18	7,15
	Diâmetro do Caule	2,31 <sup>ns</sup>	54,15*	0,49 <sup>ns</sup>	0,49 <sup>ns</sup>	1,45	5,63
	Diâmetro médio RA	0,01 <sup>ns</sup>	0,02*	0,02 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	0,01	19,10
	Área Superficial Total RA	1,20 <sup>ns</sup>	39,60*	1,75 <sup>ns</sup>	0,49 <sup>ns</sup>	1,07	19,05
	Volume Total RA	2,42 <sup>ns</sup>	83,38*	6,99 <sup>ns</sup>	1,95 <sup>ns</sup>	3,26	8,12

FV= fonte de variação, GL= grau de liberdade, Cult= cultivares, Conc= concentrações.

\*= significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F, ns= não significativo.

Tabela 2. Resumo da análise de variância (Quadrado médio) das variáveis bioquímicas de mudas de duas cultivares de abacaxizeiro (BRS Imperial e Pérola) submetidas às concentrações crescentes de NaCl na solução nutritiva. Campos dos Goytacazes-RJ, 2023.

	FV	Bloco	Cult	Conc	Cult x Conc	Resíduo	CV(%)
	GL	3	1	4	4	27	
<b>Quadrado Médio</b>	Prolina Livre PA	0,59*	8,64*	4,10 <sup>ns</sup>	0,41 <sup>ns</sup>	0,20	7,94
	Prolina Livre RA	0,004 <sup>ns</sup>	0,70*	0,48*	0,79*	0,13	14,05
	Glicina betaína PA	3,56 <sup>ns</sup>	32,27*	11,94 <sup>ns</sup>	102,43*	4,67	7,25
	Glicina betaína RA	0,86 <sup>ns</sup>	1504,16*	161,79*	70,61*	2,51	4,24
	Carboidratos solúveis PA	0,004*	0,004*	0,000 <sup>ns</sup>	0,001 <sup>ns</sup>	0,01	33,22
	Carboidratos solúveis RA	0,03 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>	0,05	41,36
	Sacarose PA	4,39 <sup>ns</sup>	192,88*	13,44*	6,84 <sup>ns</sup>	4,87	14,61
	Sacarose RA	0,04 <sup>ns</sup>	10,00*	1,42*	1,46*	0,04	20,31
	Nitrato PA	0,002 <sup>ns</sup>	0,02*	0,002 <sup>ns</sup>	0,003 <sup>ns</sup>	0,00	5,12
	Nitrato RA	0,001 <sup>ns</sup>	0,002 <sup>ns</sup>	0,000 <sup>ns</sup>	0,000 <sup>ns</sup>	0,00	3,97
	Aminoácidos solúveis PA	6743,05*	26058,68 <sup>ns</sup>	3714,29 <sup>ns</sup>	4037,28 <sup>ns</sup>	4098,45	21,96
	Aminoácidos solúveis RA	1488,61 <sup>ns</sup>	2640,98 <sup>ns</sup>	3353,41 <sup>ns</sup>	2686,68 <sup>ns</sup>	1813,09	42,03
	Proteínas solúveis PA	0,08 <sup>ns</sup>	0,001 <sup>ns</sup>	0,06 <sup>ns</sup>	0,20*	0,03	2,08
	Proteínas solúveis RA	0,13*	0,06 <sup>ns</sup>	0,06 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>	0,03	1,9

FV= fonte de variação, GL= grau de liberdade, Cult= cultivares, Conc= concentrações.

\*= significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F, ns= não significativo.

**APÊNDICE B**

## ARTIGO 2

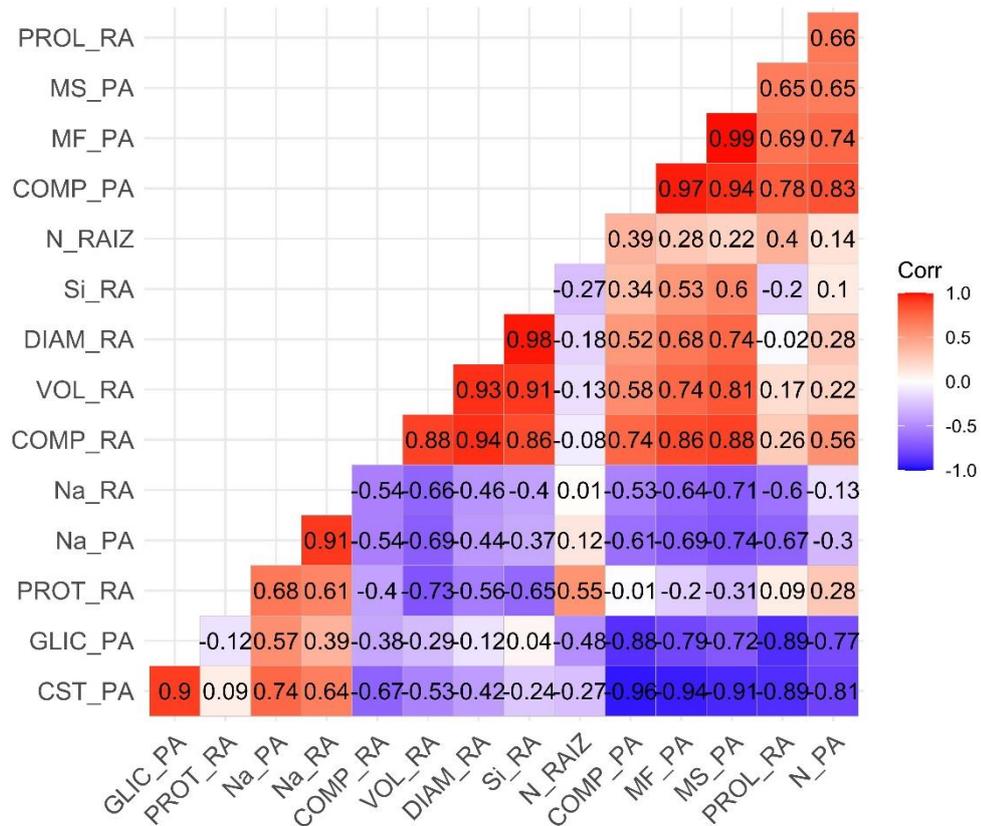


Figura 1. Correlação de Pearson entre as variáveis dos componentes principais (PCAs) das mudas de abacaxizeiro 'BRS Imperial' cultivadas em sistema hidropônico com uso de NaCl e Si. Prolina na raiz (PROL\_RA), massa seca da parte aérea (MS\_PA), massa fresca da parte aérea (MF\_PA), comprimento da parte aérea (COMP\_PA), N na raiz (N\_RAIZ), Si na raiz (SI\_RA), diâmetro da raiz (DIAM\_RA), volume da raiz (VOL\_RA), comprimento da raiz (COMP\_RA), Na na raiz (Na\_RA), Na na parte aérea (Na\_PA), proteínas na raiz (PROT\_RA), glicina na parte aérea (GLI\_PA), carboidratos solúveis totais na parte aérea (CST\_PA).