

**SILÍCIO NO MARACUJAZEIRO AZEDO: ASPECTOS  
MORFOLÓGICOS, FISIOLÓGICOS E NUTRICIONAIS**

**ROZANE FRANCI DE MORAES TAVARES**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY  
RIBEIRO**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ  
ABRIL - 2021**

**SILÍCIO NO MARACUJAZEIRO AZEDO: ASPECTOS  
MORFOLÓGICOS, FISIOLÓGICOS E NUTRICIONAIS**

**ROZANE FRANCI DE MORAES TAVARES**

“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 Doutor em Produção Vegetal”.

Prof. Almy Junior Cordeiro de Carvalho

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ  
ABRIL – 2021

SILÍCIO NO MARACUJAZEIRO AZEDO: ASPECTOS  
MORFOLÓGICOS, FISIOLÓGICOS E NUTRICIONAIS

**ROZANE FRANCI DE MORAES TAVARES**

“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 Doutor em Produção Vegetal”.

Aprovada em 02 de Abril de 2021

Comissão Examinadora:

---

Prof. Gabriel Ramatis Pugliese Andrade (D.Sc., Mineralogia de Solos) – UENF

---

Prof. Rogério Figueiredo Daher (D.Sc., Estatística Experimental) - UENF

---

Prof. Marco Antônio da Silva Vasconcellos (D.Sc., Fruticultura) – UFRRJ

---

Prof. Almy Junior Cordeiro de Carvalho (D.Sc., Fruticultura) – UENF  
(Orientador)

## SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	viii
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	4
2.1. Panorama e potencial econômico do Maracujazeiro azedo.....	4
2.2. Morfologia e Ecofisiologia do Maracujazeiro azedo. ....	8
2.3. Silício .....	11
2.3.1. Silício no Fertilizante.....	12
2.3.1.1 Silício na planta .....	14
2.4. Sistema Hidropônico.....	18
2.4.1. Solução nutritiva: um componente da hidroponia.....	20
2.5. Composição mineral .....	21
3. TRABALHOS .....	24
3.1. FONTES E CONCENTRAÇÕES DE SI MODULAM O CRESCIMENTO E A ADAPTAÇÃO ESTRUTURAL MORFOLÓGICA DE PLANTAS DE MARACUJAZEIRO AZEDO CULTIVADAS EM HIDROPONIA. 24	
3.2. APLICAÇÃO DE SI EM PLANTAS DE MARACUJAZEIRO AZEDO CULTIVADAS EM HIDROPONIA: RENDIMENTO QUÂNTICO, TROCAS GASOSAS E ABSORÇÃO. ....	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86

APÊNDICES .....	92
-----------------	----

**FICHA CATALOGRÁFICA**

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

T231

Tavares, Rozane Franci de Moraes.

Silício no Maracujazeiro Azedo : Aspectos Morfológicos, Fisiológicos e Nutricionais. /  
Rozane Franci de Moraes Tavares. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2021.

111 f. : il.

Inclui bibliografia.

Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense  
Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2021.

Orientador: Almy Junior Cordeiro de Carvalho.

1. Ácido silícico. 2. Fertilização. 3. Maracujá. 4. Nutrição de frutíferas. 5. Silício. I.  
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 630

## AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, por sempre ser minha base de confiança e gratidão, pois sem Ele nada seria possível. Por estar sempre ao meu lado, dando-me forças espirituais e físicas para concluir mais essa etapa.

Aos meus pais, Antônio e Rosana Tavares, meus grandes incentivadores, pois sempre estiveram presentes, mesmo a distância sendo longa, dando-me apoio, ouvindo-me nas horas que eu mais precisava durante todo o percurso da pós-graduação, sempre com muito carinho e amor, ensinando-me que a vida é um constante aprendizado, principalmente nas horas mais difíceis.

Ao meu marido, Dr. Alan Chrisleyr, pelo seu apoio, ajuda com a composição da tese, conversas e companheirismo durante todos os momentos dessa jornada. Principalmente por ser paciente e me compreender nos momentos de frustrações.

Aos meus irmãos e à minha cunhada: Alanne, Arthur, Fernanda, pelo companheirismo, amizade e apoio em nossas conversas, por sempre me fazerem rir nos momentos mais tristes em que me encontrava.

Aos meus sobrinhos Miguel e Pedro por me darem forças, alegrias e me fazerem rir, e ao me contarem o seu dia a dia, me deixavam leve e essa leveza e inocência que me faziam prosseguir com a pesquisa da tese.

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), pela oportunidade de realizar uma qualificação profissional a nível de doutor e pela concessão da bolsa e qualidade de estudo.

À CAPES e à FAPERJ, pelo financiamento concedido para a execução e o andamento da pesquisa proposta nesse trabalho.

Ao meu orientador e professor Dr. Almy Junior Cordeiro de Carvalho, por me orientar e me incentivar profissionalmente na vida acadêmica e na pesquisa. Além de sua confiança, amizade, compreensão, força e incentivo.

Ao grupo do LFIT do CCTA/UENF, amigos e companheiros de laboratório, Dr. Paulo Cesar, Dr<sup>a</sup>. Gabriella Linhares, Dr. Rômulo Beltrame, aos doutorandos Henrique, Jessica da Glória, Diego Corona, Késia, ao Ms. David Gomes, ao técnico do laboratório Detony Petry e aos alunos de iniciação científica, Nayara, Sasha, Adrielly, Dádiva Paula, Ygor e João Pedro.

À professora Dr.<sup>a</sup> Marta Simone Freitas, pela disponibilização do Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas para realização das análises de tecido vegetal.

Ao Eng. Químico, José Accácio da Silva, pelas instruções e acompanhamento das análises nutricionais, no setor de Nutrição Mineral de Plantas do Laboratório de Fitotecnia da UENF.

A todas as pessoas que direta e indiretamente contribuíram para a realização dessa etapa em minha vida.

## RESUMO

Tavares, Rozane Franci de Moraes. D.Sc. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Março de 2021. Silício no maracujazeiro azedo: aspectos morfológicos, fisiológicos e nutricionais. Orientador: Prof. Almy Junior Cordeiro de Carvalho.

Na agricultura atual, o Si foi reconhecido como um nutriente de grande relevância para uma série de culturas, desempenhando um papel no crescimento e desenvolvimento, principalmente das culturas agrícolas. A busca por tecnologias que possam garantir a qualidade e a produção da cultura do maracujazeiro azedo, no uso de elementos inorgânicos como é o caso do silício (Si), torna a planta mais resistente à ação de fungos e insetos, bem como a fatores abióticos do ambiente, uma alternativa que favoreça a rustificação dessa cultura antes e durante a sua adaptação ao campo. Assim, o objetivo da pesquisa foi avaliar a ação do Si por meio da utilização de diferentes fontes e concentração desse elemento no crescimento, fisiologia e nutrição das plantas de maracujazeiro azedo, a fim de verificar se os benefícios e as vantagens são realmente promovidos pelo micronutriente. Então, foi conduzido um experimento em sistema hidropônico com a espécie de estudo o maracujazeiro azedo, em casa de vegetação no campus da UENF. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, com os tratamentos dispostos em análise conjunta 6 x 2 x 3: seis concentrações de silício (Si) 0; 0,84; 1,68; 2,52; 3,36 e 4,20 g de Si por dm<sup>3</sup>; duas fontes comerciais de silício (Ácido silícico e Agrisil); e três períodos de avaliação nas plantas (115, 136 e 162 dias, iniciados após a germinação das sementes), com quatro blocos, dois vasos por

parcela e uma planta por vaso, compondo a unidade experimental, totalizando 288 vasos. No primeiro trabalho, o objetivo específico foi analisar a ação do elemento Si nas características biométricas e nas taxas de crescimento, nas adaptações estruturais foliares e na distribuição radicular. Observou-se que as concentrações de 0,84, 1,68 e 2,52 g de Si alteraram as adaptações estruturais foliares, ou seja, houve o aumento da sua espessura foliar, além de contribuir no crescimento e na permanência da área foliar das plantas de maracujazeiro azedo, favorecendo a taxa de crescimento dessas plantas. Houve o aumento na matéria seca das raízes até aos 136 dias, sendo que o ácido silícico promoveu acréscimos de 54,25%, enquanto o Agrisil proporcionou aumentos de 173 e 369% nas concentrações de 1,68 e 2,52 g de Si, respectivamente. A distribuição radicular das plantas não foi afetada pelo emprego de diferentes concentrações e fontes de Si, mantendo a média para todas as variáveis avaliadas. Com resultados obtidos para crescimento, absorção pelas raízes e modificações nas estruturas foliares das plantas de maracujazeiro azedo, infere-se que o uso do Si na fertilização dessa espécie frutífera é promissor ao seu cultivo. No segundo trabalho, o objetivo específico foi analisar as trocas gasosas e a fluorescência da clorofila, a absorção e translocação de Si das plantas de maracujazeiro azedo. As concentrações de 0,84 e 1,68 g de Si aumentaram a condutância estomática e transpiração, manteve a média na taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> e nas variáveis de fluorescência da clorofila. A partir da concentração de 1,68 g de Si, houve um incremento de 11% no teor de SiF nas plantas fertilizadas com o Ácido silícico. Em relação às plantas cultivadas com o Agrisil houve somente incrementos de 17% no teor de SiF a partir da concentração de 3,36 g de Si. Por fim, concluiu-se que a fertilização com o Si confere maior proteção ao mecanismo fotossintético das plantas de maracujazeiro a possível estresse do ambiente. O Si advindo do Ácido silícico é mais rapidamente disponibilizado, enquanto o Si do Agrisil é disponibilizado de forma mais lenta, sendo que o maior teor deste Si é acumulado nas raízes dessa espécie frutífera.

## ABSTRACT

Tavares, Rozane Franci de Moraes. P.h.D Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. March 2021. Silicon in sour passion fruit: Morphological, physiological and nutritional aspects. Advisor: Prof. Almy Junior Cordeiro de Carvalho.

In current agriculture, Si has been recognized as a nutrient of great relevance for several crops, playing a role in the growth and development of crops. The search for technologies that able to ensure the quality and production of the passion fruit crop, aims at the use of mineral elements, as is the case of silicon (Si) that makes the plant more resistant to the action of fungi and insects, as well as the abiotic factors of the environment, an alternative that favours the rustification of this crop before and during its adaptation to the field. Thus, the research aimed to evaluate the action of Si with different sources and concentration of this element in the growth, physiology and nutrition of sour passion fruit plants, to verify whether the benefits and advantages are promoted by the micronutrient. An experiment in the hydroponic system was conducted with the study species the sour passion fruit, in a greenhouse on the UENF campus. The experimental design was a randomized block, with the treatments arranged in a joint analysis 6 x 2 x 3: six silicon (Si) concentrations 0; 0.84; 1.68; 2.52; 3.36 and 4.20 g of Si.dm<sup>-3</sup>; two silicon commercial sources (Silicic acid and Agrisil); and three evaluation periods in the plants (115, 136 and 162 days, beginning after the germination of the seeds), with four blocks, two pots per plot and one plant per pot, composing the experimental unit, totalling

288 pots. In the first study, the specific aim was to analyze the action of the Si element on biometric characteristics and growth rates, leaf structural adaptations, and root distribution. It was observed that the Si concentrations of 0.84g, 1.68g and 2.52g altered the structural leaf adaptations, there was an increase in its leaf thickness, in addition to contributing to the growth and permanence of the leaf area of the sour passion fruit, favouring the growth rate of these plants. There was an increase in roots dry matter up to 136 days, silicic acid increased by 54.25%, while Agrisil provided increases of 173 and 369% in the Si concentrations of 1.68 and 2.52 g, respectively. The root distribution of the plants was not affected using different concentrations and sources of Si, maintaining the average for all variables evaluated. With results obtained for growth, roots absorption and changes in leaf structures of sour passion fruit, it appears that the use of Si in the fertilization of this fruit species is promising for its cultivation. In the second work, the specific aim was to analyze gas exchange and chlorophyll fluorescence, Si absorption and translocation of sour passion fruit. The Si concentrations of 0.84 and 1.68 g increased stomatal conductance and transpiration, maintain the average in the CO<sub>2</sub> assimilation rate and the chlorophyll fluorescence variables. From the Si concentration of 1.68 g, there was an increase of 11% in the SiF content in plants fertilized with silicic acid. Concerning plants grown with Agrisil occurred only 17% increments in the SiF content from the Si concentration of 3.36 g. Finally, we conclude that the introduction of fertilization with Si protected the photosynthetic mechanism of passion fruit to possible environmental stress. And that Si resulting from silicic acid is more readily available, while Si from Agrisil is made available more slowly, with the highest content of this Si being accumulated in the roots of this fruit species.

## 1. INTRODUÇÃO

A elevada demanda por mudas de qualidade de maracujazeiro azedo, ou plantas que consigam conviver com as mais variadas pragas e doenças que acometem essa cultura, tem exigido a busca por tecnologias que possam garantir a qualidade e a produção dessa espécie e o uso de sais minerais, que favorecem a rustificação dessas plantas antes e durante a sua adaptação ao campo, como é o caso do silício (Si) que torna a planta mais resistente à ação de fungos e insetos, bem como a fatores abióticos do ambiente. Desta forma, o desenvolvimento de estudos sobre os efeitos dos minerais na sua absorção e atuação nas plantas se torna fundamental, principalmente a sua influência nas questões fitossanitárias do maracujazeiro azedo (Korndorfer e Pereira, 2011; Queiroz et al., 2018).

Na agricultura atual, o Si foi reconhecido como um nutriente de grande relevância para uma série de culturas, entre elas as mais importantes são o arroz e a cana-de-açúcar, desempenhando um papel no crescimento e desenvolvimento dessas culturas. Também já foi observado que a absorção de Si por essas duas culturas é maior do que a absorção de nitrogênio (N) e potássio (K). A aplicação de Si tem a capacidade de potencializar a taxa ideal de N, aumentando, assim, a produtividade da cultura, além de promover folhas eretas, o que poderia explicar um aumento de 10% na fotossíntese. O Si é encontrado em todas as plantas cultivadas no solo, estando presente em todos os tecidos vegetais na proporção de 0,1 a 10% da matéria seca (Pati et al., 2016).

O Si está presente de forma abundante no solo de todo o globo terrestre, e isso traz vários benefícios para as culturas, uma vez que colabora no desenvolvimento da planta, mesmo sob o efeito de estresse ambiental (Sun et al., 2019). Esses benefícios têm sido associados com a acumulação de Si nas raízes das plantas, e com a sua habilidade de absorver esse nutriente. Alguns estudos apontam que o Si promove um efeito benéfico em plantas sob estresse, aumentando a capacidade de induzir sistemas antioxidantes vegetais que reforçam a integridade física da membrana e aumentam a absorção de nutrientes (Silva Junior et al., 2019).

Um aumento na produção de algumas culturas tem sido destaque mediante aplicação de Si, porém, esses aumentos podem ser explicados porque as concentrações elevadas de Si intercelular impulsionam as respostas de defesa basal a diversos estresses abióticos (seca de salinidade, metais pesados) e bióticos (pragas de insetos e patógenos de plantas), gerando uma maior produção em meio a instabilidade ambiental. Mesmo que haja um forte movimento a favor das aplicações de Si no solo na agricultura, a importância relativa de diversos fatores presentes no solo que delimitam a disponibilidade de Si não é bem embarcada e precisa de maior atenção (Haynes, 2019).

No Brasil, grande parte do Si utilizado em lavouras é proveniente de resíduos da extração mineral, mesmo que isso resulte em altas concentrações de metais pesados, o que restringe o uso desses materiais. Mesmo assim, o Si oriundo de resíduo tem se mostrado fontes desejáveis com grande valor econômico e agrônomo, apresentando cerca de 15-25% de Si total, como silicatos de Ca e Mg. A disponibilidade de Si presente nesses resíduos para utilização pela planta, depende do tamanho da partícula, sendo desejável partículas finas que liberam Si de forma mais eficaz. Já as partículas mais grossas liberam o Si de forma mais lenta, fazendo com que as aplicações de Si de resíduo mineral tenham efeito instantâneo e residual (Kingston, 2008; Liang et al., 2015; Korndörfer e Pereira, 2011; Haynes, 2019).

Por fim, o real papel desempenhado pelo Si na nutrição vegetal ainda é vasto, e é preciso ser melhor elucidado, embora sejam bastante descritos na literatura os benefícios atribuídos ao Si quanto ao desenvolvimento e crescimento de plantas, no entanto, nos processos fisiológicos precisa ser mais esclarecido. Além disso, o emprego de produto a base de Si acarreta questionamentos em

relação aos efeitos delegados nas plantas, e se tais efeitos são provenientes realmente desse micronutriente. Desta forma, estudos envolvendo a adoção isolada de Si e a realização de um comparativo dos efeitos entre fontes e concentrações ideais são necessários no que se refere a indução de resistência nas plantas.

Assim, o trabalho teve por objetivo geral avaliar a ação do Si por meio da utilização de diferentes fontes e concentração desse elemento no crescimento, fisiologia e nutrição das plantas de maracujazeiro azedo, a fim de verificar se os benefícios e as vantagens são realmente promovidos por esse micronutriente.

Os objetivos específicos foram: (I) analisar a ação do elemento Si, por meio de duas fontes comerciais, Agrisil e o Ácido silícico, em diferentes concentrações, nas características biométricas; (II) nas adaptações morfoestruturais foliares; (III) na distribuição radicular; (IV) analisar as trocas gasosas e a fluorescência da clorofila; (V) a absorção e translocação de Si das plantas de maracujazeiro azedo.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Panorama e potencial econômico do Maracujazeiro azedo.

A cultura do maracujazeiro vem ocupando um lugar de destaque na fruticultura tropical brasileira, uma atividade que se expandiu completamente nos últimos 30 anos. A produção dos frutos do maracujazeiro no Brasil é uma atividade de grande interesse em função do ciclo curto, rápido e alto retorno econômico e grande mercado consumidor, tanto para o mercado de frutas frescas quanto para o de indústrias de processamento, principalmente na forma de suco (Faleiro, 2018).

A passicultura, em sua maioria, é realizada por pequenos e médios produtores rurais, os quais destinam para o maracujazeiro azedo, uma área em torno de 0,5 a 20 hectares. O cultivo comercial da cultura é proveniente da agricultura familiar, que emprega, eventualmente, mão de obra temporária na época de polinização das flores e colheita dos frutos (Costa et al., 2018).

Segundo Moreira et al. (2012), a cultura do maracujazeiro, cultivada na escala de 1 ha e com aplicações manuais de adubos e defensivos agrícolas, é um investimento muito atrativo ao público da agricultura familiar, em função do uso intensivo de mão de obra e do capital da família empregado nessa atividade, resultando em uma renda média de R\$ 21 mil nos dois anos de produção.

Segundo o IBGE (2020), o agronegócio do maracujá amarelo no Brasil gerou mais de R\$ 1 bilhão de reais em 2019, sendo o valor de produção superior a 85% em relação ao ano de 2018. A quantidade produzida, em 2019, somou 593.429

mil toneladas de frutos numa área plantada de 41.584 mil hectares, com um rendimento médio de 14,27 t ha<sup>-1</sup> (Tabela 1). A região Nordeste tem liderado a produção brasileira nos últimos anos, sendo responsável por 64,5%, seguida pelas regiões Sudeste com 15,1%, Sul com 11,3%, Norte com 6,7% e Centro-Oeste com 6,7% (Tabela 1). Os principais estados produtores de frutos de maracujá são a Bahia, que representa 28,4% da produção nacional, seguido por Ceará (24,5%), Santa Catarina (7,6%), Minas Gerais (5,7%) e São Paulo (5,2%). Os outros estados somam 28,7% da produção (Tabela 2).

Em relação à produção mundial, o maracujá é cultivado, além do Brasil, Equador e Colômbia, no Peru, na África do Sul e na Austrália. No mercado internacional, o maracujá possui uma boa aceitação, sendo bastante apreciado por suas características organolépticas (Jiménez et al., 2011). Os principais mercados consumidores de suco de maracujá, com base em volume, são os Estados Unidos (75,4%), Holanda (18%), França (3,3%), Portugal (2%) e Canadá (0,7%) (Comexstat, 2019).

Tabela 1: Produção brasileira de frutos de maracujá por região em 2019.

Região	Área Colhida (ha)	Quantidade produzida (t)	Rendimento médio (t ha <sup>-1</sup> )
Norte	3.630	39.592	10,91
Nordeste	28.629	382.739	13,37
Sudeste	5.310	89.769	16,91
Sul	3.282	67.290	20,50
Centro-Oeste	733	14.039	19,15
Brasil	41.584	593.429	14,27

Fonte: IBGE – Produção Agrícola Municipal, 2019. Consultado em 23 de janeiro de 2021.

Tabela 2: Produção de frutos de maracujá por unidade da Federação em 2019.

Estados	Área Colhida (ha)	Quantidade produzida (t)	Rendimento médio (t ha <sup>-1</sup> )
Bahia	15.616	168.457	10,79
Ceará	6.225	145.102	23,31
Santa Catarina	1.891	44.934	23,76
Minas Gerais	2.167	33.765	15,58
São Paulo	1.870	30.809	16,48
Outros	13.815	170.362	12,33

Fonte: IBGE – Produção Agrícola Municipal, 2019. Consultado em 23 de janeiro de 2021.

O Brasil se destaca como o maior produtor e exportador de maracujá no mundo, apresentando grande importância social e econômica. No ano de 2019, segundo os dados do Comex stat (Estatística de comércio exterior), foram exportados cerca de 443.96 kg do fruto, resultando em um valor de US\$ 1.194 ao preço médio de US\$ 2.689,76 por tonelada de fruto. Dentre os países importadores, Portugal foi o que apresentou expressiva demanda pela fruta, importando 9.030 kg de frutos. O investimento na cultura é satisfatório devido ao mercado em ascensão, no entanto, devemos ter alguns cuidados, principalmente em relação à produção de frutos em possíveis áreas de cultivo com grande índice de doenças.

Quando se compara a produção de frutos do maracujazeiro ao longo das últimas décadas, percebe-se a evolução na área cultivada com consequente elevação da produção até o ano de 2010, no entanto, o sistema produtivo apresenta alguns entraves devido ao avanço da doença provocada pelo vírus *Cowpea aphid borne mosaic virus*, causador do “endurecimento dos frutos” do maracujazeiro, e isto tem provocado perdas à produção (Narita et al., 2012).

Desta forma, a utilização de sementes selecionadas e cultivares híbridas lançadas vem diversificando o cultivo e a produção de frutos no Brasil (Meletti et al., 2011). O melhoramento genético do maracujazeiro está diretamente relacionado à demanda do mercado, ao aumento do rendimento e ao desenvolvimento de cultivares que são resistentes a doenças (Gonçalves et al., 2009). Apesar do potencial econômico do maracujazeiro, o número de cultivares comerciais ainda é muito limitado, sendo as sementes obtidas, na maioria das vezes, de pomares comerciais (Vilela, 2013).

A exemplo de cultivares disponíveis no mercado temos a Amarelo e Sol disponibilizadas pela Feltrin Sementes Ltda; a BRS Rubi do Cerrado, BRS Gigante Amarelo e BRS Sol do Cerrado, lançadas pela Embrapa a partir do ano de 2008. O Instituto Agrônomo também mantém as cultivares IAC Paulista, IAC-273 - Monte Alegre, IAC-275 – Maravilha e IAC-277 – Jóia. Além dessas cultivares, a Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), lançou a cultivar UENF Rio Dourado (nº34378), com o objetivo de testar o potencial de várias populações e desenvolver uma cultivar adaptada comercialmente para as regiões norte e noroeste do Estado do Rio de Janeiro (Pio Viana et al, 2016). Todas essas cultivares estão registradas no RNC (2020) do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA

Algumas pesquisas conduzidas têm mostrado o potencial do maracujazeiro azedo (folha, fruto, casca e semente) para várias finalidades, sendo a ação antioxidante, a atividade biológica mais estudada dessa espécie (Zeraik et al., 2010). O maracujazeiro azedo possui um grande potencial de metabólitos secundários com atividades biológicas a ser explorado, visto que a espécie possui diferentes compostos bioativos que são formados ao longo do seu ciclo. As folhas, por exemplo, são utilizadas para subprodutos da indústria farmacêutica como tranquilizantes, sedativos, atividade ansiolítica, anti-inflamatória e antioxidante (Deng et al., 2010, Nascimento et al., 2020).

Os frutos, ainda, podem indicar potencial como alimento funcional, pois a atividade antioxidante em sucos é atribuída aos polifenóis presentes, principalmente, aos flavonoides. Os autores Zeraik e Yariwake (2010) identificaram a presença de substâncias polifenólicas na polpa de maracujá azedo pelo método de HPLC-UV/DAD. E quantificaram os flavonoides expressos como rutina (método padrão), como a isoorientina e isovitexina.

Além disso, os subprodutos da produção de suco de maracujá, como as cascas e as sementes, podem ser processados e utilizados na alimentação humana, como fonte de fibras solúveis, principalmente a pectina, que é benéfica ao ser humano (Zeraik et al., 2010). A utilização das cascas e sementes como alimentos funcionais se tornou fundamental, pois além de caracterizar algo importante para a saúde humana, beneficiou também o meio ambiente, pois os subprodutos produzidos dessas indústrias de suco produzidos correspondem cerca de 65 a 70% do peso dos frutos, tornando-se, assim, um grande problema de resíduo agroindustrial (Oliveira et al., 2002).

Diante do exposto, a passicultura no Brasil detém um espaço enorme para a expansão da cultura do maracujazeiro, tanto da espécie *Passiflora edulis* Sims como de outras do gênero *Passiflora*, principalmente, para aumentar a competitividade do país no mercado internacional com a exportação de suco concentrado, produtos agroindustriais e frutas frescas.

## 2.2. Morfologia e Ecofisiologia do Maracujazeiro azedo.

O maracujazeiro (*Passiflora* spp.) pertence à família Passifloraceae, (Cronquist, 1981), a qual compreende 20 gêneros e cerca de 600 espécies distribuídas nas regiões tropicais e subtropicais do mundo (Bernacci et al., 2005). *Passiflora* é o maior gênero dentro desta família, compreendendo cerca de 450 espécies. A maioria das espécies são originárias da América Tropical, sendo o Brasil o maior centro de diversidade genética (Faleiro et al., 2008).

A *Passiflora edulis* Sims, mais conhecida como maracujazeiro azedo, é a cultura com maior expressão econômica no Brasil, representa cerca de 95% de área cultivada em pomares comerciais. Além do Brasil, o maracujazeiro azedo é cultivado em países como Austrália, Fiji e Srilanka, que são regiões de baixas altitudes e temperaturas elevadas (Manica e Oliveira Jr, 2005; Meletti, 2011)

As plantas de maracujazeiro azedo são raramente de hábito arbustivo ou arbóreo, mas geralmente trepadeiras herbáceas ou lenhosas, que se prendem aos suportes, utilizando-se de gavinhas desenvolvidas, principalmente nas axilas das folhas (Bruckner e Picanço, 2001).

A raiz é do tipo axial ou pivotante, com maior concentração de raiz nos primeiros 30 cm de profundidade, ou seja, mais de 50% das raízes encontram-se na camada superficial do solo, enquanto 60 a 80% localizam-se a menos de 50 cm (São José, 1994). O estudo realizado por Freitas et al. (2009) com maracujazeiro azedo fertirrigado mostrou que 97,38 a 99,4% do sistema radicial estão concentrados na camada de 0 a 30 cm de profundidade.

O caule se apresenta glabro ou piloso, sendo este lenhoso na base e bastante lignificado, reduzindo o teor de lignina conforme se aproxima do ápice, e com formato cilíndrico ou ligeiramente anguloso, quando jovem. Os ramos são de coloração verde, variando um pouco a tonalidade, semi-flexíveis e trepadores (São José, 1994).

As folhas são simples, alternadas, trilobadas, exceto quando jovens, que são inteiras ou bilobadas, de base cordada, ápice acuminado e margem serrilhada. Encontram-se, nos bordos, glândulas oval-elípticas. Além disso, apresentam três nervações mais desenvolvidas partindo da região basal da lâmina, ou seja, nervação palminérvea. O tamanho da folha varia de 7 a 12 cm de comprimento por 11 a 13 cm de largura. O pecíolo, de 2 a 3 cm de comprimento, cerca de 1 mm de

diâmetro, é comumente dotado de glândulas nectaríferas ocelares no ápice, próximo ao limbo foliar (Carvalho-Okano e Vieira, 2001; Beraldo e Kato, 2010).

As flores são hermafroditas, axilares e solitárias, geralmente radiadas, possuem cerca de 7 cm de diâmetro com cinco sépalas de coloração verde na parte externa e branca internamente, livres e oblongas; com cinco pétalas livres, brancas. A corona é formada por vários elementos filamentosos brancos com coloração púrpura na base. O androceu possui cinco estames com filetes presos nos dorsos de grandes anteras. O gineceu é tricarpelar, com um estigma acoplado em cada estilete bem definido ligado a um ovário súpero, globoso, unilocular, placentação parietal, pluriovular (Carvalho-Okano e Vieira, 2001; Souza e Pereira, 2011).

A abertura das flores do maracujazeiro é por volta do meio dia com o fechamento às vinte horas, aproximadamente, é rápida e sincronizada. Uma vez fecundado os óvulos, ocorre o desenvolvimento dos frutos, ao invés disso, as flores murcham e caem (São José, 1994). Além disso, as flores apresentam uma particularidade em relação à curvatura do estilete, onde os mesmos podem ser totalmente curvos (TC), parcialmente curvos (PC) ou ainda ser sem curvatura (SC), com a possibilidade de os três tipos ocorrerem em uma mesma planta (Ruggiero, 1980).

O fruto é classificado como sendo uma baga globosa, apresentando 5 a 7,5 cm de diâmetro e de coloração amarelo canário, quando maduro. A polpa é amarelo-laranjada, tendo em média de duzentas a trezentas sementes por fruto, que são comprimidas lateralmente, reticuladas, pretas e cobertas por arilo saciforme, suculento de origem funicular (Carvalho-Okano e Vieira, 2001).

O maracujazeiro azedo é uma planta alógama devido à sua morfologia floral, uma vez que suas anteras se posicionam abaixo dos estigmas, e possui grão de pólen pesado e pegajoso, isso dificulta a polinização anemófila, sendo então polinizadas por insetos, principalmente abelhas do tipo mamangavas. Essa alogamia é ressaltada pela autoincompatibilidade, em que o pólen de uma planta é incapaz de fertilizar as flores da mesma planta, e diferentes plantas podem ou não serem compatíveis entre si, ou seja, a fertilização da espécie requer a presença de genótipos diferentes (Bruckner et al., 1995).

A espécie desenvolve-se bem em regiões de clima tropical e subtropical, com altitudes entre 100 a 900 m, e a temperatura entre 20 e 32°C é considerada como a mais favorável ao crescimento da planta (Gazel Filho e Nascimento, 1998),

pois o florescimento ocorre em dias longos. De acordo com Bruckner e Picanço (2001), o florescimento do maracujazeiro amarelo não ocorre em dias com fotoperíodo inferior a 11 horas de luz, sendo então considerada uma planta de “dias longos”.

O regime pluviométrico considerado ideal para a espécie varia entre 700 - 1800 mm/ano. Em regiões com chuvas intensas e frequentes no período de floração dificultam a polinização, pois o grão de pólen estoura em contato com a umidade, e em secas prolongadas causam a queda de frutos (Gazel Filho e Nascimento, 1998). A planta se desenvolve bem em diferentes tipos de solo (arenosos ou levemente argilosos), desde que sejam profundos, férteis, com boa drenagem e pH entre 5,0 a 6,0 (Ruggiero et al., 1996).

A propagação da espécie no Brasil para fins comerciais é, predominantemente, realizada por meio de sementes. Entretanto, pode ser propagada vegetativamente através da enxertia ou estaquia, as quais são utilizadas para a manutenção dos materiais genéticos com características agrônômicas favoráveis à multiplicação de plantas produtivas e tolerantes/resistentes a pragas e doenças. Este método de propagação é mais utilizado em programas de melhoramento genético da espécie, pois para fins comerciais, o custo de produção e tempo requerido para a formação das plantas é elevado (Lima et al., 2011).

O plantio do maracujazeiro azedo deve ser realizado no início das chuvas ou em regiões que seja possível instalar os sistemas de irrigação. Desta forma, a muda deve ser plantada em covas de 40 cm x 40 cm x 40 cm. Cada cova deve ser feita conforme a análise de solo e as exigências nutricionais da cultura. O sistema de condução é o de espaldeira vertical ou cerca utilizando-se de mourões com 2,5 m de comprimento, distanciados entre si por 4 a 6 m, e fios de arame liso (Nº12).

O espaçamento entre plantas varia de 3,0 x 6,0 m, 3,0 x 5,0 m e 2,0 x 5,0 m, até o adensamento de 1,25 m x 3,5 m. A haste única ou principal da planta deverá ser conduzida até atingir o arame, quando terá seu broto terminal eliminado para favorecer a emissão de brotos laterais, os quais serão conduzidos um para cada lado do arame. Quando os brotos estiverem próximo de tocar na planta seguinte, é feita outra despona, para forçar o desenvolvimento das gemas que formarão os ramos terciários ou produtivos (Gazel Filho e Nascimento, 1998).

A haste única do maracujazeiro é conduzida, ainda, por alguns produtores, sem que haja a poda do broto terminal, sendo esta haste conduzida para um lado

e a gema lateral que está em desenvolvimento para o outro. A poda é evitada por alguns produtores para que não haja a disseminação de doenças, pois é uma porta de entrada agravante de moléstias potencialmente graves para a cultura do maracujazeiro.

### 2.3. Silício

O Silício (Si) é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre, correspondendo aproximadamente 28%, estando logo após o oxigênio. O quartzo, formado por dióxido de Si ( $\text{SiO}_2$ ), é o mineral mais abundante nos solos, constituindo a base da estrutura da maioria dos argilominerais. Os solos brasileiros, devido ao grau de intemperismo dos mesmos, detêm em torno de 5 a 40% de Si em suas composições. Os solos jovens, como os Cambissolos, apresentam maiores teores desse elemento em relação aos solos mais intemperizados, como os Latossolos (Menegale et al., 2015).

Em solos tropicais, sujeitos a maiores taxas de intemperização, o Si é encontrado basicamente na forma de opala e quartzo ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) e outras formas não disponíveis às plantas (Barbosa Filho et al., 2001). Em regiões temperadas, os teores de Si excedem os dos sesquióxidos de ferro e alumínio. A capacidade do solo liberar o Si para a solução é influenciada, além do intemperismo, pela quantidade desses minerais presentes no solo, mostrando que a quantidade de Si disponível é diretamente dependente da estabilidade dos minerais da fase sólida (Foy, 1992).

Exceto em solos orgânicos (Organossolos), a maioria dos solos minerais são compostos de areias, principalmente  $\text{SiO}_2$ , vários minerais primários (por exemplo, olivina, augita, hornblenda, quartzo, feldspato-ortoclase, plagioclásio, albita e mica) e de silicatos secundários (minerais de argila como illita, vermiculita, montmorilonita, clorita e caulinita) e minerais contendo Si amorfo (não cristalino), como alofona e opala. Esses silicatos são apenas moderadamente solúveis e biogeoquimicamente inertes (Liang et al., 2015).

O ácido monossilícico ou ácido ortossilícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) é a única forma de Si solúvel em água, enquanto o ácido polisilícico (ácido silícico polimerizado) é apenas parcialmente solúvel em água no solo. O Si solúvel em água está presente na

solução do solo, e pode ser adsorvido nas superfícies coloidais do solo contendo argila, matéria orgânica e complexo orgânico-inorgânico (Liang et al., 2015).

Considerando a susceptibilidade de lixiviação do Si, tem-se que ele é um dos elementos mais facilmente lixiviáveis no perfil do solo. Em solos tropicais e subtropicais, o micronutriente possui baixo efeito agregante no solo, o que facilita o seu deslocamento ao longo do perfil, evidenciando baixos teores de Si trocável, devido à dessilicificação (perda de Si) (Menegale et al., 2015)

De maneira geral, as plantas terrestres contêm Si em quantidades comparáveis aos de macronutrientes, variando de 0,1 a 10%, colocando-se como um constituinte mineral majoritário, principalmente para culturas como o arroz e a cana-de-açúcar, nas quais o teor de silício pode se igualar ou exceder ao de nitrogênio (Epstein e Bloom, 2006). As culturas que podem acumular o Si tendem a ter diversos benefícios, por exemplo, serem resistentes ou tolerantes a fatores bióticos e abióticos, como estresse hídrico, ataques de pragas ou patógenos (Savant et al., 1999).

### 2.3.1. Silício no Fertilizante

A maioria dos agricultores e técnicos ainda desconhecem as vantagens do uso de fontes silicatadas nas lavouras comerciais. Os chineses, há mais de 2.000 anos, já utilizavam as cinzas da palha de arroz ou da cevada misturadas com esterco para fertilizar o solo. Considera-se que as cinzas dos vegetais, como a do arroz, seriam o primeiro fertilizante mineral complexo fornecedor de Si, pois acumulam quantidades significativas desse elemento (Lima Filho, 2008).

Pesquisas pioneiras no século XIX, como o de Justius von Liebig (1803-1873), Dmitry Mendeleev (1834-1907), John Bennet Lawes (1814-1900) e Daniel Hall (1864-1942) sobre os fertilizantes silicatados, já prediziam o papel que o Si desempenharia na agricultura. Todavia, nutricionistas e fisiologistas de plantas não davam importância para este elemento, podendo ser pela onipresença e abundância do mesmo na crosta terrestre, assim, crendo na ausência de carências nas plantas (Lima Filho, 2009).

A adição de materiais silicatados em áreas agricultáveis começou no Japão em meados de 1950 e passou a ser comumente utilizado em outros países como a China, Coreia do Sul, Coreia do Norte, Taiwan, Tailândia, Malásia, Indonésia, Sri Lanka, Índia, Paquistão e EUA (Lima filho, 2009; Liang et al., 2015). A exemplo de

testes de campo no Japão, temos o estudo de Ma e Takahashi (2002) utilizando a fertilização com Si (silicato de sódio) no crescimento e na produção de arroz. Os resultados mostraram um ligeiro aumento no número de panículas, e de 17% na produção.

O Si disponível na solução do solo é resultado da decomposição de resíduos vegetais, da dissociação do ácido silícico polimérico, da liberação de Si dos óxidos e hidróxidos de ferro e Alumínio, e da dissolução de minerais cristalinos e não cristalinos (Jones e Handreck, 1967). E quanto maior o teor de argila na composição do solo, maior o teor de Si disponível (Korndörfer et al., 2007).

Os silicatos são as principais fontes de Si para os solos e para as plantas, e podemos fornecer o nutriente a partir da adição de fertilizantes, como os silicatos de cálcio, de magnésio, de potássio, termofosfato, escórias de siderurgia, wollastonita e ainda por meio da água de irrigação (Menegale et al., 2015).

Os fertilizantes silicatados apresentam efeito corretivo no solo, onde estes possuem a capacidade de neutralizar a acidez do solo e produzir o ácido monossilícico, que é a principal forma de Si absorvida pelas plantas. Deste modo, com a aplicação do Si no solo, o pH aumenta e os teores de  $Al^{+3}$  diminuem, devido às reações dos ânions  $SiO^{-2}$  com os prótons  $H^{+}$  (Korndörfer et al., 2007).

Quando o solo apresenta valores inferiores a  $20 \text{ mg dm}^{-3}$  de Si (silício extraído pela metodologia de ácido acético  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ) ou, ainda, de 6 a  $8 \text{ mg dm}^{-3}$  (extraído em  $CaCl_2 \text{ } 0,05 \text{ mol L}^{-1}$ ), de modo geral, apresentam necessidade de adubação contendo esse micronutriente. E de acordo com Korndörfer et al. (1999), estes tipos de solos apresentam boa resposta à aplicação de silício. No entanto, quando dotarem teores acima dos descritos, as repostas tendem a ser mais discretas.

No Brasil, o interesse na adubação silicatada tem aumentado bastante, devido à maior disponibilidade de fontes comerciais de Si atualmente no país, o que não ocorria há alguns anos. As fontes disponíveis são subprodutos provenientes da produção de ferro e aço de indústria siderúrgica, e são conhecidas como escórias (Lima Filho, 2008).

Essas escórias que são, principalmente, silicatos de cálcio e magnésio, após uma minuciosa avaliação no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, se aptam para o uso agrícola, pode-se utilizá-las como corretivos do solo, podendo substituir o calcário devido à sua basicidade, além de serem

fontes de Si, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, e de outros nutrientes em menores quantidades, como o Fe, Mn, Cu, Co, Mo, Zn e B (Reis et al., 2007).

Além das escórias de siderurgia, atualmente, há outras fontes comerciais de silicatos disponíveis no mercado nacional, incluindo soluções fluídas e rochas silicatadas, dentre as quais podem ser citadas: Silifertil® (Silifertil Ambiental Ltda), Siligran® (Fertion indústria de Fertilizantes Ltda), Termofosfato Yoorin® (Yoorin Fertilizantes Ltda), Ekosil® (Yoorin Fertilizantes Ltda), Siligesso® (Agronelli Insumos Agrícolas Ltda), Agrosilício® (Harsco Corporation), Sili-K® (Unaprosil Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda), Agrisil® (EcolMax Comércio e Distribuição de Insumos Agropecuários Ltda) e Sifol® (Wox Agrociência Comercial Ltda).

Por mais que existam alguns produtos contendo silício no mercado nacional, os fertilizantes silicatados ainda são pouco utilizados na agricultura, pois a maioria da oferta do produto concentra-se na região sudeste, o que dificulta a disponibilidade dos fertilizantes silicatados para as outras regiões do Brasil, além de o custo ser onerado com as despesas de transporte. Além disso, a falta de conhecimento sobre o uso e a importância do Si por parte dos técnicos e agricultores contribuirão nesse contexto (Marafon e Endres, 2011).

Cientistas do século XX comprovam os benefícios advindos do uso de Fertilizantes silicatados, como fertilizantes via solo ou foliares, bem como indutores abióticos de resistência sistêmica às pragas e doenças. De acordo com Rodrigues e Datnoff (2015), a hipótese da resistência mecânica está relacionada com a taxa de Si e o número de células silicificadas que são formadas na epiderme, enquanto estudos bioquímicos relacionam a resistência promovida por meio da capacidade antioxidante enzimática (Yin et al., 2014).

#### 2.3.1.1 Silício na planta

A concentração de Si varia de espécie para espécie. As monocotiledôneas são plantas ricas em Si, especialmente as da família Cyperaceae e Gramineae, enquanto as dicotiledôneas são consideradas mais pobres. Contudo, há exceções, como algumas plantas da família Fabaceae (ervilha), Curcubitaceae (pepino), Rosales (olmo) e Asteraceae (girassol) (Guntzer et al., 2012). Para Hodson et al. (2005), a concentração de Si nas plantas depende mais da sua posição filogenética

do que do ambiente em que está inserida, ou seja, da concentração de Si no solo ou na solução.

Ma e Yamaji (2002) apontam que os aspectos ambientais não interferem no acúmulo de Si nas plantas, pois o elemento é abundante em quase todos os solos. Os mesmos autores observam que as plantas que acumulam Si geralmente apresentam baixas concentrações de cálcio e vice-versa. Eles propõem, ainda, critérios para diferenciar plantas não acumuladoras das acumuladoras de Si: as espécies acumuladoras têm uma concentração de Si acima de 1%, e a razão  $[Si]/[Ca]$  tem que ser maior que 1; as espécies não acumuladoras têm uma concentração abaixo de 0,5%, e a razão  $[Si]/[Ca]$  é menor que 0,5; as plantas que não atendem esses critérios são chamadas de intermediárias.

As raízes das plantas absorvem o ácido silícico da solução do solo, que é comumente encontrado em concentrações que variam de 0,1 a 0,6 mM nos níveis de pH encontrados na maioria dos solos agrícolas (Epstein e Bloom, 2006). Takahashi et al. (1990) propuseram três possíveis tipos de absorção de Si em plantas superiores em relação à absorção de água: o ativo, em que a absorção de Si é mais rápida e mais alta do que a absorção de outros elementos inorgânicos presentes na água; o passivo, a absorção é similar ou menor do que de outros elementos inorgânicos presentes na água.

A maioria das plantas dicotiledôneas absorvem o Si passivamente, como o pepino, o melão, o morango e a soja. Outras como as leguminosas excluem o Si da absorção (Liang et al., 2015), enquanto em plantas monocotiledôneas, como o arroz, um típico acumulador de Si, a absorção e o transporte é um processo ativo (Ma e Yamaji, 2015).

Alguns transportadores são requeridos para a absorção, translocação e distribuição do Si. Os genes transportadores de Si (Lsi1, Lsi2 e Lsi6) foram, primeiramente, identificados em plantas monocotiledôneas, especificamente nas raízes de plantas de arroz. São genes específicos em sintetizar proteínas de membranas que atuam no mecanismo de absorção do Si, e são dependentes de energia (Ma et al., 2006).

O Lsi1 (low silicon rice 1) é um transportador que facilita o transporte passivo bidirecional de Si entre a membrana plasmática das células da endoderme e exoderme das raízes e a solução externa do solo (aploplasto). Ele funciona como um transportador influxo nas raízes das plantas. Esse transportador pertence a uma

subfamília de proteínas NIP III (nodulin-26 intrinsic protein III), com base nas regiões das aquaporinas típicas, conhecidas como aquaporinas-like (Ma e Yamaji, 2008). Foram identificados seus homólogos em cevada (*Hordeum vulgare*; HvLsi1), trigo (*TaLsi1*) e milho (*Zea mays*; ZmLsi1, ZmLsi6) (Chiba et al., 2009; Mitani et al., 2009; Montpetit et al., 2012).

O transportador efluxo de Si, o Lsi2 é o responsável pelo transporte ativo de Si para fora da célula, em direção à região central da raiz, assim, mantém uma baixa concentração de Si nas células da endoderme e exoderme. O Lsi2 pertence a uma família de transportadores de ânions putativos não caracterizados, é impulsionado por um gradiente de próton e não mostra nenhuma semelhança com o transportador Lsi1. O funcionamento dos transportadores Lsi1 e Lsi2 produz um fluxo eficaz de Si na exoderme e endoderme para sobrepor a barreira de estrias de Caspari (Figura 1) (Ma et al., 2006; Ma e Yamaji, 2008).

Por outro lado, o transportador Lsi6 foi identificado com maiores atividades nas células do parênquima do xilema de folhas e nós das plantas de arroz. O Lsi6 é expresso tanto na parte aérea quanto nas raízes, em contraste com o Lsi1 e Lsi2 que são codificados somente nas raízes. Esse transportador pertence à mesma família de aquaporinas, mas ao grupo NIP II, considerado como um homólogo do Lsi1, e é responsável pelo transporte do ácido monossilícico do xilema para as células do parênquima do xilema (Figura 1) (Yamaji et al., 2008).

O Si transportado via Lsi1 e Lsi2 para a região central das raízes é, então, translocado pelo fluxo transpiratório para o xilema da planta. De todo o Si absorvido pelas raízes, 90% é translocado para a parte aérea, na forma de ácido monossilícico. Finalmente, é depositado como um polímero de sílica amorfa hidratada na célula do lúmen, nos espaços intercelulares e na parede celular, formando uma dupla camada de sílica-cutícula. As partículas sólidas que são depositadas na camada intracelular sob a cutícula são conhecidas como fitólitos (Ma e Takahashi, 2002; Haynes, 2019).

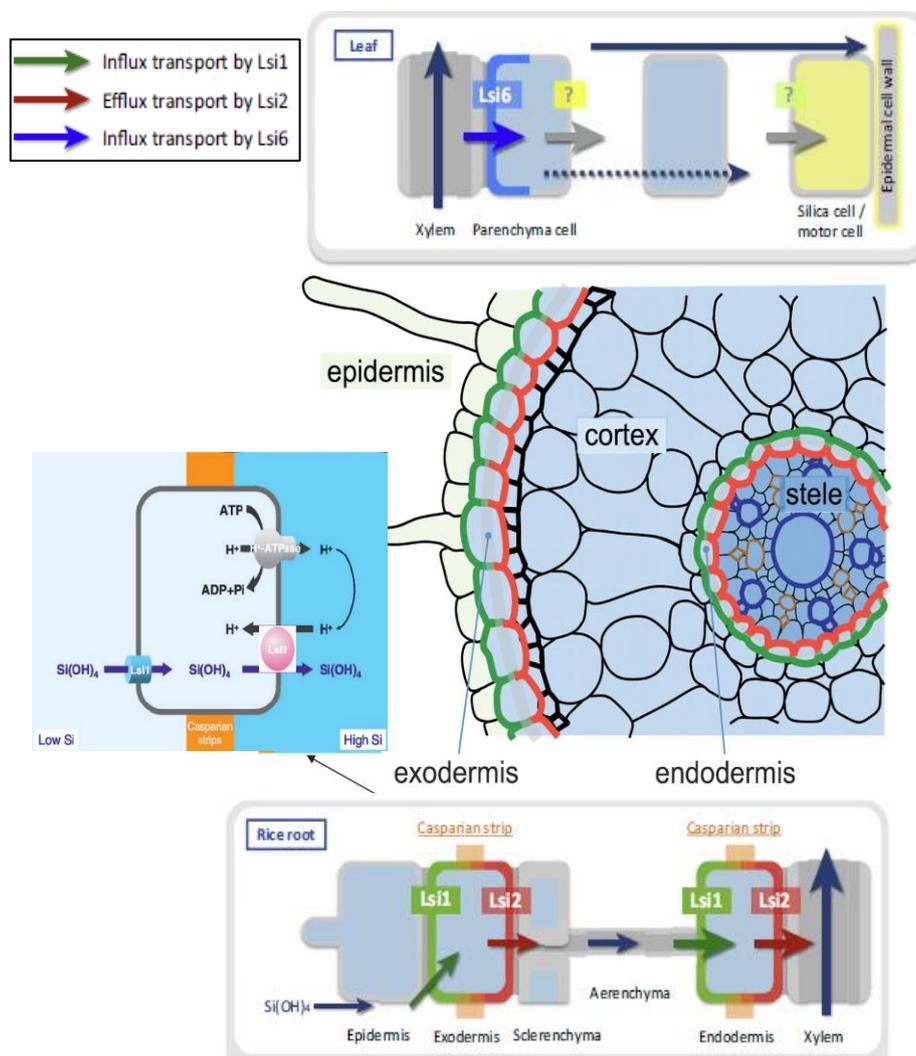


Figura 1. Transporte do ácido monossilícico pelos transportadores Lsi1 e Lsi2, que estão localizados no lado distal e proximal das raízes de plantas de arroz, atuando nas membranas plasmáticas da célula da endoderme e exoderme (C.S – Estrias de Caspari). Nas folhas, o Si é carregado pelo Lsi6 localizado nas células do parênquima do xilema (Adaptado de Ma e Yamaji, 2008; Ma et al., 2015).

Os benefícios do Si para as plantas são bastante reconhecidos agora. Experimentos recentes demonstram que o Si exibe efeitos extraordinários no crescimento e desenvolvimento das plantas, resultados inigualáveis para um nutriente vegetal não essencial (Frew et al., 2018).

Pesquisas sobre os efeitos do Si na resistência a estresses abióticos, como estresses promovidos pela salinização, toxicidade de metais pesados, temperatura, déficit hídrico, ou na resistência a estresses bióticos, como patógenos e pragas de plantas (Cooke e Leishman, 2016), melhoram o conhecimento sobre os impactos da aplicação de Si nas plantas a nível molecular (Ma e Yamaji, 2015), fisiológico (Costa et al., 2018) e ecológico (Frew et al., 2018).

Por exemplo, alguns estudos reportam que o Si promove mecanismos que aliviam o estresse abiótico em plantas superiores (Liang et al., 2007). Zhu et al. (2019) inferem que a dinâmica transcriptômica promove uma visão sobre os mecanismos mediados pelo Si no alívio do estresse salino em plantas de pepino. Recentemente, Gou et al. (2020) observam que o Si melhora o crescimento do pepino sob estresse mediado por nitrato e, ainda, aumenta a assimilação de nitrogênio e a síntese de clorofila.

O estudo de Rodrigues e Datnoff (2015) reporta que o Si é efetivo no controle do brusone no arroz e do oídio em espécies de plantas monocotiledôneas e dicotiledôneas. Portanto, a aplicação de Si tem sido considerada como um tratamento eficaz para alcançar resistência a doenças de amplo espectro, além de promover resistência ou tolerância aos fatores abióticos, por meio do aumento da atividade oxidante (Ma e Yamaji, 2015). Como o Si atua no mecanismo de defesa e no crescimento, fisiologia e nutrição do maracujazeiro azedo ainda precisa ser melhor investigado.

#### 2.4. Sistema Hidropônico

Existe uma diversidade de meios utilizados para o cultivo de plantas, seja em soluções salinas, utilizadas por plantas desenvolvidas em oceano, ou em água pura, para plantas de lagos de bacias hidrográficas fechadas ou, ainda, no solo, principal meio de cultivo, contudo este meio é complexo e heterogêneo. Todavia, quando se almeja o controle de variáveis essenciais para a experimentação, com a exigência da presença ou não do nutriente em específico, o emprego do solo não é indicado. Logo, vários pesquisadores no século XIX, abordaram essa problemática e iniciaram o cultivo de plantas em solução, técnica conhecida como hidroponia. Nesse cultivo, o solo não é utilizado, as plantas são imersas em

solução nutritiva dotada de sais inorgânicos, os quais estão prontamente disponíveis para estas (Epstein e Bloom, 2006; Taiz e Zeiger, 2013).

Para fins comerciais, são utilizados meios artificiais mais simples, que consistem no emprego de soluções nutritivas arejadas contendo macro e micronutrientes essenciais para o crescimento da planta. Nesses casos, utilizam-se materiais de suporte como: areia ou pedregulho, perlita, vermiculita, argila expandida, ágar, lã de rocha, espuma, turfa, cortiça, serragem, fibra de coco e gel hidrófilo. Por meio desses suportes, as soluções circulam, e as soluções velhas são retiradas por lixiviação. Mas, com a utilização de meios sólidos, deve-se atentar para o risco de contaminação. Contudo, estudos devem ser aprimorados, já que não existe uma solução nutritiva ideal para todas as espécies vegetais e condições de cultivo, uma vez que a absorção de nutrientes sofre interferência do meio, da planta e da concentração dos nutrientes na solução (Epstein e Bloom, 2006; Franco e Prado, 2006).

De acordo com Faquin e Furlani (1999), a hidroponia é uma técnica de cultivo protegido e detém diversas vantagens sobre a composição e quantidade de nutrientes ofertados à planta, o que permite precocidade na colheita; homogeneidade de oferta e qualidade dos produtos; diminuição do consumo de água e fertilizantes, menor incidência de pragas e doenças que, conseqüentemente, reduz a utilização de agrotóxicos e um elevado retorno econômico ao investidor nesse sistema de cultivo.

Apesar deste sistema apresentar diversas vantagens, o seu alto custo de implantação, a exigência de conhecimentos técnicos específicos do sistema e o alto grau de tecnologia, dependência de energia elétrica ou de sistema alternativo, e elevado risco de contaminação, entre outros, advindos da própria solução nutritiva, podem constituir uma série de desvantagens no emprego dessa tecnologia (Martinez e Silva Filho, 2006).

Os sistemas de cultivo mais utilizados na hidroponia são o floating ou DFT Nutrient Film Technique ou NFT e a aeroponia, os quais proporcionam maior estabilidade da temperatura adequada e oxigenação na solução nutritiva. Além desses, o sistema hidropônico pode ser cultivado em substrato inerte, como a areia e, para isto, deve-se atentar para o diâmetro das partículas, que devem variar entre 0,6 e 2 mm, pois as partículas muito finas prejudicam a drenagem e aeração, enquanto as grossas, a retenção de umidade é deficiente. Neste tipo de cultivo, a

solução nutritiva é sempre renovada, mantendo a planta sempre bem nutrida, dificultando a disseminação de doenças, caso ocorram. E as desvantagens se concentram no alto custo inicial do empreendimento e no risco de contaminação do meio (Martinez e Silva Filho, 2006).

A hidroponia é uma ferramenta poderosa na preservação e na eficiência do uso da água, é uma técnica que representa uma economia de dez vezes menos, quando comparado ao sistema convencional de produção e, ainda, garante qualidade e confiança no consumo, favorecendo o bem-estar do consumidor (Presotto, 2015).

#### 2.4.1. Solução nutritiva: um componente da hidroponia

Os estudos das partes constituintes das plantas levaram a descoberta dos elementos essenciais para estas, tornando, portanto, a nutrição mineral da planta à base da hidroponia. Sendo assim, o manejo nutricional por meio do manuseio de solução nutritiva, é a chave para o sucesso do cultivo hidropônico (Resh, 2004).

Uma solução nutritiva pode ser definida como um sistema homogêneo, onde os sais fertilizantes que fornecerão os nutrientes necessários às plantas estão dispersos, na forma iônica e aniônica e em quantidades adequadas. Além disso, a solução nutritiva deve conter oxigênio e temperatura adequados à absorção dos nutrientes pelas raízes das plantas (Cometti et al., 2006).

No entanto, somente a partir de 1933 houve preocupação com o preparo de uma solução contendo micronutrientes. Em 1950, em seu experimento pioneiro, Hoagland e Arnon formularam uma solução nutritiva completa, baseada na composição elementar de plantas de tomate cultivadas em vasos de 18L com solução nutritiva. No ano de 1957, essa solução sofreu uma pequena adaptação por Johnson et al. (1957), na relação nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ):amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), que passou a ser de 7:1, para manter o pH mais próximo de cinco. A partir da solução de Hoagland e Arnon, muitas outras foram desenvolvidas, mas a tradicional solução “Hoagland” permanece como a mais utilizada, por atender adequadamente às necessidades das culturas (Comentti et al., 2006).

A partir da solução de “Hoagland”, diversas soluções nutritivas têm sido propostas, havendo diferenças em relação às concentrações de macro e micronutrientes, e é bem comum encontrar em artigos científicos a “solução

nutritiva modificada de Hoagland”, sendo que esta solução constitui a base de numerosas soluções nutritivas comerciais. Além disso, não existe uma solução nutritiva ideal para todas as culturas, cada espécie vegetal tem um potencial de exigência nutricional. A composição da solução nutritiva varia com o estágio fenológico da espécie, época do ano, fatores ambientais e partes da planta colhida, bem como os aspectos intrínsecos à solução que possam alterar a sua composição, como o pH, a força iônica, a temperatura e a presença de moléculas orgânicas (Comentti et al., 2006; Presotto, 2015).

Atualmente, a produção hidropônica se concentra em hortaliças, principalmente, sendo empregada na cultura da alface (Luz, 2006), no entanto, há relatos na literatura de autores utilizando o sistema para culturas frutíferas, como Mendonça et al. (1999) que estudaram as respostas de mudas de maracujazeiro amarelo cultivadas em material inerte com solução nutritiva, em diferentes níveis de alumínio.

## 2.5. Composição mineral

A nutrição mineral é um dos aspectos mais importantes para a maioria das culturas. As plantas requerem 14 elementos inorgânicos, incluindo seis macronutrientes e oito micronutrientes (Marschner, 2012). Estes elementos são absorvidos da solução do solo pelas raízes e, subsequente, translocado para a parte aérea das plantas. Existem três rotas para o transporte radicular, as vias apoplásticas, simplásticas e as transmembranas (Che et al., 2018).

De acordo com Broschat e Meerow (2000), a chegada dos nutrientes à superfície radicular apenas garante a sua disponibilidade para as plantas, todavia sua absorção vai depender do contato deles com as membranas das células das raízes e da espécie iônica presente na rizosfera. Assim, os elementos minerais essenciais à planta devem estar na forma iônica solúvel em água para serem absorvidos pelas raízes, no caso do Si, é na forma de ácido monossilícico.

O mecanismo de movimento do nutriente no solo para a planta depende da espécie iônica envolvida, do genótipo da planta, da densidade de raízes e do fluxo de água na planta. De modo geral, o fluxo de massa é o maior contribuinte para o suprimento de cálcio, magnésio, nitrogênio, enxofre e Si, enquanto a difusão é mais importante para o potássio, fósforo e micronutrientes (Marschner, 1995).

A aplicação de fertilizantes ricos em Si influencia na dinâmica de diferentes elementos nutricionais presentes no solo. O aumento da concentração de íons de ácido silícico na solução do solo leva à formação de complexos com metais pesados no solo e à competição com outros íons por sítios de adsorção (Rodrigues e Datnoff, 2015).

Ainda não se constatou efeito tóxico do Si no solo e na planta, não havendo, portanto, limites técnicos para a aplicação desse insumo. O limite acontece quando se levam em conta o efeito corretivo dos silicatos e a relação custo/benefício, isto é, doses excessivas de silicato podem provocar aumentos de pH acima de valores desejados, podendo causar desequilíbrios nutricionais, principalmente deficiências de micronutrientes (Cu, Fe, Zn e Mn) e P, devido às reações de insolubilização (Reis et al., 2007)

No sistema solo, a relação entre o íon fosfato e o ácido silícico é antagônica, a quantidade de fosfato que é liberada no solo aumenta com a elevação da concentração de Si. A reação antagônica entre os íons fosfato e o Si é explicada pela forte competição por sítios de sorção específicos. Por exemplo, a fertilização com o Si libera uma quantidade de ácido silícico na solução do solo, na qual os íons de Si são adsorvidos aos colóides ocupando as cargas negativas e, assim, os íons fosfatos levemente solúveis são disponibilizados e os elementos como  $Al^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  e  $Mg^{2+}$  são adsorvidos pela dessorção do ânion fosfato (Rodrigues e Datnoff, 2015).

Para Jones e Handreck (1967), a competição é mais um efeito de longo prazo do ácido silícico, por exemplo, a gibbsita, quando silicificada pelo processo de intemperização em caulinita, tem afinidade reduzida para os íons fosfatos. Os autores relatam que para a competição a curto prazo entre o ácido silícico e o fosfato pelos locais de adsorção tem uma contribuição mínima, ou praticamente nenhuma, para as concentrações na solução do solo.

Owino-Gerroh e Gascho (2004) indicam que a alta capacidade de sorção dos íons de P em um solo com pH baixo diminuiu com a aplicação de Si solúvel. Esse resultado é atribuído ao aumento de pH promovido pelo silicato de cálcio aplicado no solo, que foi convertido a ácido silícico amorfo ( $H_4SiO_3$ ). Em pH baixo, a carga negativa da superfície do ácido silícico é menor do que a carga do ânion fosfato. Desta maneira, o P é preferencialmente adsorvido nos sítios de ligação do solo. Com o aumento do pH provocado pelo silicato aplicado, os íons de Si e P

ficam presentes na solução, então o ácido silícico amorfo por ter carga menor do que o fosfato é preferencialmente adsorvido ao invés dos íons fosfato, tornando o P mais disponível, aumentando a absorção e utilização desse elemento.

Jones e Handreck (1967) fazem as seguintes proposições: que o aumento da alcalinidade é causado pelo aumento na concentração de ácido monossilícico e libera os íons fosfato a partir da dissolução dos óxidos e hidróxidos de Fe e Al, além disso, o ácido monossilícico diminui a atividade de íons de Al em solução, evitando que esses íons precipitem os íons fosfato.

A aplicação de fertilizantes ou escórias contendo Si resulta em um aumento de pH do solo, o que diminui a fitodisponibilidade em 60% de metais pesados que estão presentes no solo, como Cd, Cu, Pb e Zn e, eventualmente, reduz a absorção desses metais pelas plantas agrícolas (Chen et al., 2000). Em estudos conduzidos por Tokunada (1991), as perdas por lixiviação de K solúvel e outros nutrientes móveis no horizonte superficial do solo foram reduzidas por causa da fertilização com silicato. O silicato de K utilizado no experimento aumentou ligeiramente o pH e a condutividade elétrica do solo.

Ma e Takahashi (2002) reportam que o aumento da absorção de P na presença de Si em plantas de arroz, foi devido ao aumento da taxa transpiratória quando os níveis de P estavam baixos. Os autores afirmam que o Si melhorou a utilização interna de P e a redução de Mn e Fe na presença de Si, assim, a melhoria nas razões P:Mn e P:Fe.

Os mecanismos potenciais que o Si possui tanto em relação ao solo quanto as plantas precisam ser melhor exploradas, principalmente em relação à nutrição das plantas do gênero *Passiflora*. Estudos sobre a absorção, translocação desse micronutriente pode contribuir para a resistência ou tolerância das plantas de maracujazeiro.

### 3. TRABALHOS

#### 3.1. FONTES E CONCENTRAÇÕES DE SI MODULAM O CRESCIMENTO E A ADAPTAÇÃO ESTRUTURAL MORFOLÓGICA DE PLANTAS DE MARACUJAZEIRO AZEDO CULTIVADAS EM HIDROPONIA.

**Resumo:** O Si é o segundo elemento mineral mais abundante na crosta terrestre, quando é absorvido pelas plantas aumenta a rigidez das células epidérmicas, deixando-as mais espessas e com maior grau de silicificação, formando uma barreira mecânica que detém funções de limitar a perda de água e dificultar a penetração de hifas fúngicas, bem como o ataque de insetos. O maracujazeiro azedo é uma fruteira tropical nativa do Brasil, sendo destaque nas últimas décadas no agronegócio de produção de frutas e contribuindo para o desenvolvimento do setor agrícola. O objetivo do trabalho foi analisar a ação do elemento Si, por meio de duas fontes comerciais, Agrisil e o Ácido silícico, em diferentes concentrações, no crescimento vegetativo, nas adaptações estruturais das folhas e na distribuição radicular de plantas de maracujazeiro azedo. Os tratamentos consistiram em seis concentrações de silício mais o tratamento controle (0; 0,84; 1,68; 2,52; 3,36 e 4,20 g de Si.dm<sup>-3</sup>), duas fontes comerciais de silício, Ácido silícico e Agrisil, e três períodos de avaliação aos 115, 136 e 162 dias após a semeadura. As plantas foram submetidas a análises biométricas, adaptações estruturais foliares, de taxa de crescimento e morfológicas da raiz. A fertilização com Si promoveu uma resposta

positiva ao maracujazeiro azedo em relação ao âmbito de crescimento e nas adaptações morfológicas das folhas. As concentrações de 0,84; 1,68 e 2,52 g de Si proporcionam o melhor crescimento, absorção pelas raízes e modificações nas estruturas foliares das plantas de maracujazeiro azedo.

**Palavras-Chave:** Adubação, Maracujá, Silício.

#### SI SOURCES AND CONCENTRATIONS MODULATE THE GROWTH AND MORPHOLOGICAL STRUCTURAL ADAPTATION OF SOUR PASSION FRUIT CULTIVATED IN HYDROPONICS.

**Abstract:** Si is the second most abundant mineral element in the earth's crust, this element when absorbed by plants increases the rigidity of epidermal cells, making them thicker and with a higher degree of silicification, forming a mechanical barrier that has functions to limit the loss of water and impede the penetration by fungi, as well as the pest damage. The sour passion fruit is a tropical fruit native to Brazil, having been highlighted in the last decades in the agribusiness of fruit production and contributing to the development of the agricultural sector. The work aimed to analyze the action of the Si element, through two commercial sources, Agrisil and Silicic acid, in different concentrations, in the vegetative growth, in the leaf's structural adaptations and the root distribution of sour passion fruit plants. The treatments consisted of six silicon concentrations (0; 0.84; 1.68; 2.52; 3.36 and 4.20 g of silicon.dm<sup>-3</sup>), two silicon commercial sources, Acid silicic and Agrisil, and three evaluation periods at 115, 136 and 162 days after sowing. The plants were subjected to biometric analysis, structural leaf adaptations, growth rate and root morphology. The Si fertilization promoted a positive response to the sour passion fruit concerning the growing range and in the morphological adaptations of the leaves. Concentrations of 0.84; 1.68 and 2.52 g of Si provide the best growth, absorption by the roots and changes in the leaf structures of sour passion fruit plants.

**Key words:** Fertilization, Passion fruit, Silicon.

## INTRODUÇÃO

O maracujazeiro-azedo (*Passiflora edulis* Sims) é uma fruteira tropical nativa do Brasil, cujo cultivo tem evoluído bastante nos últimos 40 anos no país, crescimento significativo ao se considerar que o país é o maior produtor mundial da cultura (Meletti, 2011). É a espécie de maracujazeiro mais cultivada devido à qualidade de seus frutos e à resistência a pragas, destacando-se no setor de produção de frutas e contribuindo para o desenvolvimento do setor agrícola (Zeraik et al., 2010; Dias et al., 2011).

As raízes do maracujazeiro azedo são consideradas acumuladoras intermediárias de Si (Costa et al., 2016). Em pesquisa recente realizada por Linhares et al. (2019) com cinco fontes de Si na absorção, translocação e caracterização fisiológica de maracujazeiro-azedo, pôde-se constatar que 43,48% do Si absorvido pelas plantas na fonte ácido silícico fica retido nas raízes, enquanto 56,52% é translocado para a parte aérea (folha + caule). Contudo, os mecanismos subjacentes aos efeitos do Si, especialmente, no que diz respeito às concentrações de Si que melhoram as características morfológicas e anatômicas da parte aérea e raiz, ainda não são claros para as espécies dicotiledôneas e para a cultura do maracujazeiro.

O Si é o segundo elemento mineral mais abundante do solo, e está em quantidades inferiores apenas à de oxigênio, e compreende cerca de 28% da crosta terrestre, uma vez que a maioria dos solos são predominantemente compostos por silicatos e aluminossilicatos. Na solução do solo, o Si está na forma de ácido silícico, e em concentrações que variam de 0,1 a 0,6 mM, a qual está na ordem de 100 a 1.000 vezes maior que a do fosfato (Epstein e Bloom, 2006, Yin et al., 2013). Embora o Si não seja reconhecido como um elemento essencial ao crescimento das plantas, contudo, é um micronutriente que exerce efeito benéfico no crescimento e produtividade das mesmas (Ma e Yamaji, 2015).

Ao longo da última década estudos focaram em uma melhor compreensão do mecanismo envolvendo os efeitos do Si na produtividade e qualidade das culturas agrícolas, no alívio de várias formas de estresse (Zhu et al., 2019), na forma de absorção, transporte e acumulação de Si (Ma e Yamaji, 2006; Ma e Yamaji, 2008; Ma e Yamaji, 2015), na biogeoquímica e biodisponibilidade (Liang et

al., 2015), e nos métodos analíticos de Si no solo, na planta e no fertilizante (Kondörfer e Pereira, 2011).

O aumento na produtividade das plantas ocorre devido às concentrações elevadas de Si intercelular acelerarem/intensificarem as respostas de defesa basal de uma série de estresses abióticos (salinidade, falta de água, metais pesados) e bióticos (pragas e patógenos), resultando no aumento da resistência/tolerância das plantas a tais estresses (Haynes, 2019). Esse elemento atua no crescimento e na produtividade das plantas, principalmente quando estão sob algum tipo de estresse, como por exemplo, o crescimento e a estabilidade genética do maracujazeiro-azedo são preservados em plantas fertilizadas com Si (Costa et al., 2016). Liang et al. (2007) reportam que o Si aumenta a atividade radicular, permitindo maior absorção de nutrientes.

Os efeitos benéficos do Si podem ser observados em vários estudos em relação à tolerância das plantas ao estresse, como a tolerância ao estresse salino em plantas de pepino (Wang et al., 2015), ou mediando o estresse hídrico em trigo (Ahmed et al., 2015), ou ainda, o Si mediando a resistência/tolerância ao estresse salino e hídrico das plantas de sorgo, induzindo os níveis de poliaminas e reduzindo a do ácido 1-aminopropano-1-carboxílico (ACC, o precursor do etileno) (Yin et al., 2014; Yin et al., 2016). Além disso, o Si estimula o mecanismo natural de defesa das plantas, induzindo a produção dos flavonoides e fitoalexinas em pepino (Fawer et al., 1998). O modo como o Si atua no mecanismo de defesa das plantas, conferindo resistência ou tolerância, ainda precisa ser melhor investigado, principalmente em plantas dicotiledôneas, a exemplo do maracujazeiro-azedo.

Diante do exposto, o presente trabalho teve por objetivo analisar a ação do elemento Si, por meio de duas fontes comerciais, Agrisil e o Ácido silícico, em diferentes concentrações, no crescimento vegetativo, na anatomia e na distribuição radicular de plantas de maracujazeiro-azedo.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação no *Campus* da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, localizada 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). O delineamento experimental foi o de

blocos ao acaso, com os tratamentos dispostos em análise conjunta 6 x 2 x 3, sendo as plantas submetidas a seis concentrações de silício correspondendo a 0; 0,84; 1,68; 2,52; 3,36 e 4,20 g de silício.dm<sup>-3</sup>, duas fontes comerciais de silício, Ácido silícico e Agrisil, e três períodos de avaliação nas plantas (115, 136 e 162 dias, iniciados após a germinação das sementes), com quatro blocos, dois vasos por parcela e uma planta por vaso compondo a unidade experimental, totalizando 288 vasos.

Durante a condução do experimento, a casa de vegetação foi equipada com um datalogger Hobo modelo U23-001 Pro v2 Onset® para obtenção diária da temperatura e da umidade relativa do ar. As leituras obtidas durante o período experimental estão apresentadas na Figura 1.

As sementes de maracujazeiro-azedo foram obtidas por meio do Laboratório de Melhoramento Genético Vegetal (LMGV) da UENF, sendo utilizadas sementes da cultivar “Rio Dourado” (*Passiflora edulis* Sims). Para o processo de germinação, as sementes foram semeadas diretamente em vasos de polietileno preto com capacidade volumétrica de 5 dm<sup>3</sup>, preenchidos com o substrato areia de rio, lavada devidamente em água corrente e, em seguida, em água deionizada. A areia foi escolhida como substrato por ser inerte quanto ao fornecimento de nutrientes, ter pH neutro, por apresentar retenção de água e porosidade adequadas para a oxigenação das raízes e oferecer sustentação para as plantas e proteção às raízes aos danos físicos.

Na fase inicial, a irrigação foi feita diariamente buscando-se manter a umidade do substrato em todos os vasos próxima a 70% da capacidade de água disponível. As plântulas foram irrigadas a cada dia com 200 ml, alternadamente, com água e solução nutritiva completa, adaptada para a cultura do maracujazeiro com ¼ da força durante 15 dias. Após esse período, foram irrigadas a cada dois dias, com 200 ml de solução nutritiva completa com ½ força. Após 22 dias e até o final do experimento, as plantas foram irrigadas durante cinco dias consecutivos com solução nutritiva completa com 100% da força, conforme a necessidade da planta ao longo do dia, tendo em média 450 ml vaso<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, sendo o pH da solução sempre ajustado para 5,4 (Tabela 1), e a cada dois dias irrigadas com água deionizada para que não houvesse salinização do meio.

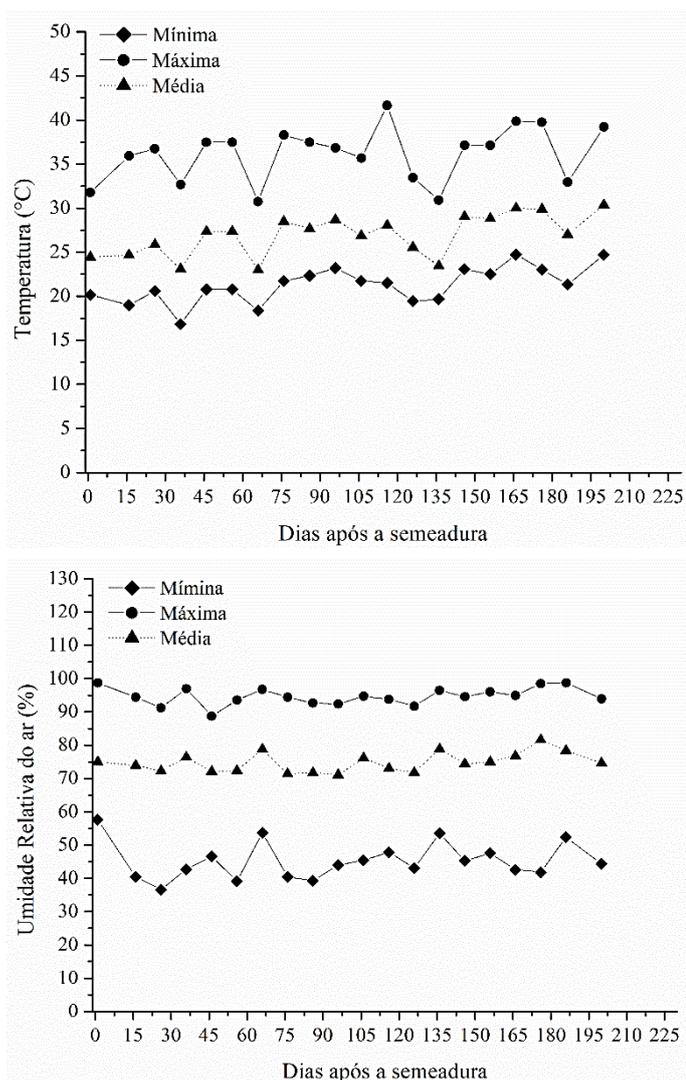


Figura 2. Monitoramento da Temperatura, em °C, e da Umidade relativa do ar em %, durante o cultivo das plantas de maracujazeiro azedo, em Hidroponia, em Casa de Vegetação. Campos dos Goytacazes. 2019.

Tabela 1: Composição da solução nutritiva completa 'Hoagland' modificada, utilizada no experimento do maracujazeiro azedo-Hidroponia, em concentrações de silício. Campos dos Goytacazes, RJ. 2019.

Solução estoque	Completo (ml L <sup>-1</sup> )
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 4H <sub>2</sub> O (2 mol L <sup>-1</sup> )	1,5
KNO <sub>3</sub> (2 mol L <sup>-1</sup> )	2,0
MAP (1 mol L <sup>-1</sup> )	0,5
MgSO <sub>4</sub> (1 mol L <sup>-1</sup> )	2,0
FeEDTA (25 g L <sup>-1</sup> )	1,0
MICRO*	1,0
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> (25mM)	1,0
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (1 mol L <sup>-1</sup> )	0,5

\* Micro: ZnSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O-578 mg L<sup>-1</sup>, CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O-0,125 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>

As fontes comerciais utilizadas para a composição dos tratamentos foram o ácido silício  $\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  PA. MERCK® (99,0 – 100,5 % de  $\text{SiO}_2$  disponível) e Agrisil Agrobiológica® (98% de  $\text{SiO}_2$  disponível). Antes do início do experimento foi feita a análise química do fertilizante comercial Agrisil, e a composição química do Ácido silício foi elaborada de acordo com as informações do fabricante do produto (Tabela 2). A aplicação dos tratamentos fontes e concentrações de silício foi iniciada ao 23º dia após a germinação, e foram realizadas a cada 15 dias. As concentrações de Si, 0,84; 1,68; 2,52; 3,36 e 4,20 g e mais o tratamento controle (sem adição de Si) foram calculadas conforme a capacidade do vaso de 5 dm<sup>3</sup> e parceladas em 12 aplicações (Tabela 3).

Tabela 2. Análise química dos fertilizantes comerciais Agrisil e Ácido silício utilizados no experimento do maracujazeiro azedo-Hidroponia, em diferentes concentrações de silício. Campos dos Goytacazes, RJ. 2020

Fert.	Ca	Mg	K	P	S	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Zn	Cl
	----- g Kg <sup>-1</sup> -----						----- mg g <sup>-1</sup> -----			-----			
Agrisil	1,39	0,44	1,23	1,28	0,23	29,35	1,64	1372	2,19	0,83	0,84	28,3	-
Ác. Si.	----- % -----		-----		-----		----- % -----		-----				
Ác. Si.	-	-	-	-	-	-	-	0,03	-	-	-	-	0,05

Tabela 3. Quantidade de silício aplicado no substrato, em experimento de maracujazeiro azedo, cultivado em Hidroponia, Casa de vegetação. Campos dos Goytacazes, RJ. 2019.

Concentrações de Si (mM mL <sup>-1</sup> )	Primeira aplicação		Segunda aplicação		12ª aplicação		Total de Si aplicado (g)
	Si (mg)	Si (mg dm <sup>-3</sup> )	Si (mg)	Si (mg dm <sup>-3</sup> )	Si (mg)	Si (mg dm <sup>-3</sup> )	
0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	14	70	14	70	14	70	0,84
1,0	28	140	28	140	28	140	1,68
1,5	42	210	42	210	42	210	2,52
2,0	56	280	56	280	56	280	3,36
2,5	70	350	70	350	70	350	4,20

A solução de Si foi preparada por meio de adição de  $\text{SiO}_2$  de cada fonte em água desionizada, e aplicadas em um volume de 250 ml dm<sup>-3</sup>, diretamente no substrato areia ao redor do caule das plantas. As equações 1 e 2 representam os cálculos de adição de  $\text{SiO}_2$  disponível nas plantas, em que  $\text{CF}_1$  é a concentração da fonte Ácido silício;  $\text{C}_x$  é a concentração de silício em mg dm<sup>-3</sup>;  $\text{CF}_2$  é a

concentração da fonte Agrisil; PMA<sub>s</sub> é o peso molecular do Ácido silícico = 46,75; e o PMA<sub>g</sub> é o peso molecular Agrisil = 45,85.

$$C_{F1} = \frac{100 * C_X}{PMA_s} \quad (1)$$

$$C_{F2} = \frac{100 * C_x}{PMA_g} \quad (2)$$

As fontes de silício foram analisadas quanto à composição mineral pela técnica de difração de raios-X (DRX) por Linhares et al., (2020) (dados não publicados), técnica que possibilita a detecção de fases cristalinas nas amostras por meio da determinação dos diversos espaçamentos atômicos da rede cristalina dos minerais (Figura 3 e 4). Os fertilizantes foram estudados na forma de pó, após moagem e peneiramento (malha < 0,053 mm), por meio de montagens não orientadas, confeccionadas em porta amostra metálico de formato côncavo. As leituras foram efetuadas em um equipamento de difratômetro Rigaku Miniflex II, operado sob tensão de 30 kV, corrente de 10 mA e fonte de radiação CuK $\theta$  ( $\theta = 1.5418 \text{ \AA}$ ;  $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ) e nas seguintes condições experimentais: intervalo de leitura de 3 a 50° 2 $\theta$ , passo de 0,02° 2 $\theta$ , velocidade de escaneamento de 1s/passos, fendas Soller de 5,5 e 2,5° e fenda divergente de 1mm.

Os padrões de DRX foram estudados no software Match! 3.0 (Crystal Impact GbR®), para a identificação das fases presentes. Essa identificação se dá pela aplicação da lei de Bragg (eq. 1), que relaciona o ângulo onde máximos construtivos estão presentes difratados (na forma de picos distintos de energia) com o espaçamento atômico da estrutura das fases cristalinas (Hammond, 1997):

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (\text{Eq. 1}),$$

rescrita como

$$d = \frac{n\lambda}{\sin \theta}$$

n = número inteiro de comprimentos de onda

$\lambda$  = comprimento de onda usado na difração, em  $\text{\AA}$

$\theta$  = ângulo de máximo da difração (detectado no máximo de cada pico)

d = espaçamento atômico, em  $\text{\AA}$

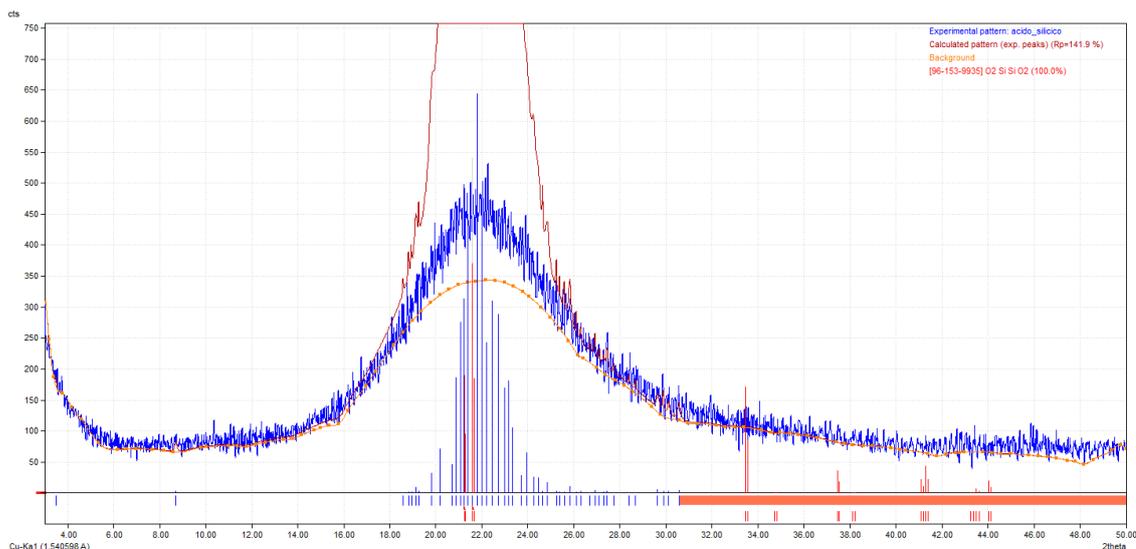


Figura 3: Padrão de DRX do ácido silícico. O eixo x corresponde à posição dos ângulos  $2\theta$ . O eixo y corresponde à intensidade em cps (contagens por segundo). A linha azul demonstra o padrão experimental, a linha laranja o padrão calculado de ajuste (desconsiderado neste trabalho) e a legenda superior (à direita) indica as fases identificadas. As barras vermelhas indicam os picos de algum polimorfo do  $\text{SiO}_2$  que coincidem com os picos do padrão (Linhares et. al., 2020 (dados não publicados)).

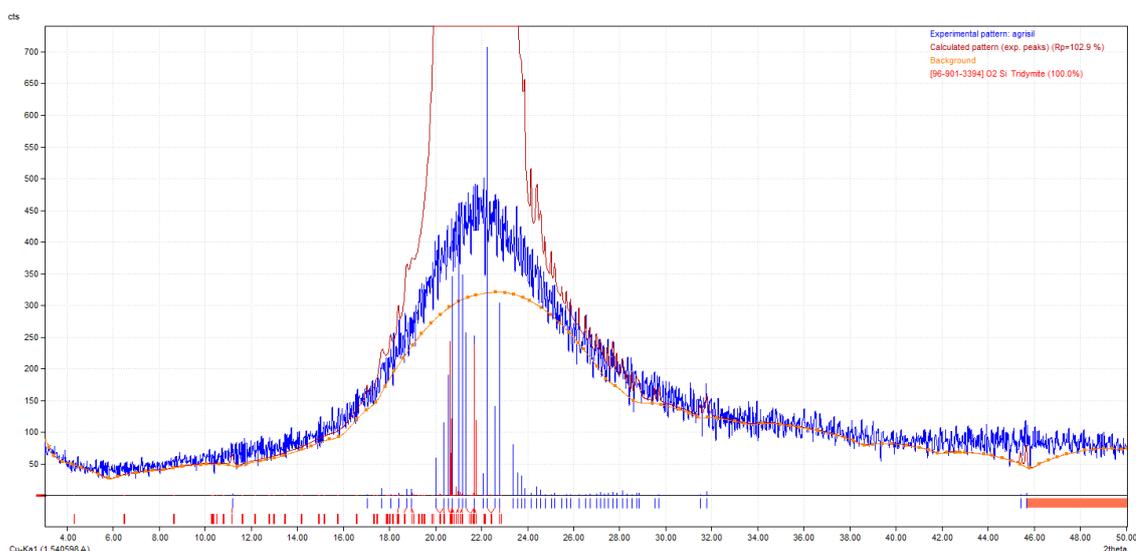


Figura 4: Padrão de DRX do produto Agrisil. O eixo x corresponde à posição dos ângulos  $2\theta$ . O eixo y corresponde à intensidade em cps (contagens por segundo). A linha azul demonstra o padrão experimental, a linha laranja o padrão calculado de ajuste (desconsiderado neste trabalho) e a legenda superior (à direita) indica as fases identificadas. As barras vermelhas ao longo do eixo x indicam os picos de tridymite que coincidem com os picos do padrão (Linhares, 2020).

Aos 115, 136 e 162 dias após o início da aplicação dos tratamentos fontes e concentração de silício, foram avaliados as análises: biométricas, adaptações estruturais foliares e de taxa de crescimento das plantas. Em cada período foram avaliadas 96 plantas no total, sendo mensurado o comprimento do ramo principal (CRP, em cm), correspondendo à distância desde o colo da planta até a inserção da folha mais jovem, utilizando-se uma trena graduada em cm e polegadas; o diâmetro médio (DRP, em mm), sendo determinado a dois centímetros do substrato por meio de leituras em paquímetro digital; o número de folhas (NF), contado desde a folha basal até a última folha completamente expandida; e a área foliar (AF, em  $\text{cm}^2$ ) do ramo principal, determinada em um medidor de bancada modelo LI -3100 LICOR (Lincoln, NE, USA).

As análises de adaptações estruturais foliares, massa foliar específica (MFE, em  $\text{g cm}^{-2}$ ) e o grau de suculência ( $\text{g cm}^{-2}$ ) foram realizadas nas 3ª e 5ª folhas das plantas, sendo retirados cinco discos do terço mediano de cada folha, de  $\pm 1,60$  cm de diâmetro. Os discos foliares foram embebidos em água desionizada por 24h em placas de petri individuais. Após este período, os discos foram pesados em balança digital com precisão de 0,0001g para obter a massa fresca em saturação do material.

Posteriormente, os discos foram colocados em estufa com circulação de ar forçada a  $65^\circ\text{C}$  por 72h para a obtenção da massa seca do disco. O Grau de suculência (GS) foi calculado a partir da relação conteúdo de água (massa fresca em saturação (g) - peso seco (g)) e a área foliar do disco ( $\text{cm}^2$ ). A MFE foi determinada pela razão entre a massa de matéria dos discos foliares (total de 10 discos) e a respectiva área foliar do disco, de  $2 \text{ cm}^2$ . Além dessas variáveis, foi calculada a área foliar específica (AFE, em  $\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$ ) por meio da relação entre a AF/MSF.

As plantas em cada período foram cortadas e separadas entre parte aérea e raiz. A parte aérea foi segmentada em folha e caule, sendo determinadas: a massa seca das folhas (MSF) e do caule (MSC), a massa seca da parte aérea (MSPA) obtida pela soma da MSF e MSC e a massa seca das raízes (MSR). Os segmentos folhas, caule e raiz foram acondicionados em papel tipo Kraft e colocados em estufa com circulação de ar forçada a  $65^\circ\text{C} \pm 2^\circ$  por 72 horas para a determinação da matéria seca.

A taxa de crescimento relativo (TCR), a taxa de crescimento relativo foliar (TCRF), a razão da área foliar (RAF), a razão da massa foliar (RMF) e a taxa de assimilação líquida (TAL) foram calculados, segundo Peixoto et al (2004), a partir das fórmulas:  $TCR = [(\ln M_2 - \ln M_1) / (t_2 - t_1)]$ ;  $TCRF = [(\ln F_2 - \ln F_1) / (t_2 - t_1)]$ ;  $RAF = [(AF_1 + AF_2) / (M_2 + M_1)]$ ;  $RMF = MSF / MSP$ ;  $TAL = [(M_2 - M_1) / (T_2 - T_1)] * [(\ln AF_2 - \ln AF_1) / (AF_2 - AF_1)]$ ; onde  $M_1$  é a massa seca total das plantas após 115 dias de crescimento nos diferentes tratamentos (coleta 1) e  $M_2$  é a massa seca total das plantas após 136 dias de crescimento nos diferentes tratamentos (coleta 2),  $T_2 - T_1$  é o intervalo de tempo entre as coletas 1 e 2; e  $AF_1$  e  $AF_2$  é a área foliar das plantas nas coletas 1 e 2, respectivamente.

Para as análises morfológicas das raízes foram avaliados somente os períodos de 115 e 136 dias, para a quantificação do comprimento (CR, em cm), diâmetro (DR, em mm), volume (VR, em  $cm^3$ ) e área superficial (ASR, em  $cm^2$ ) radicular, raízes finas e raízes grossas. Para as medidas de CR, DR, VR e ASR, o sistema radicular foi lavado em água corrente com auxílio de peneiras com malha de 2 mm e pinças para a retenção das raízes. Após a lavagem, foram acondicionadas em sacos plásticos contendo álcool 70% e levadas a uma geladeira com temperatura em torno de 10°C.

Para o escaneamento, as raízes foram distribuídas na superfície de uma cubeta acrílica com dimensões de 30 cm de largura e 40 cm de comprimento, contendo água desionizada, acoplada a um scanner profissional Epson Expression 10000XL, sendo as imagens capturadas com uma resolução de 400 dpi e analisadas utilizando o software WinRhizo Pro 2012b (Régent Instr. CNC.), em computador conectado ao scanner. Para a análise das imagens das raízes pelo software, os dados foram separados em duas classes de diâmetro: classe 1 (diâmetro  $\leq 1,0$  mm), classificadas como raízes finas e a classe 2 (diâmetro  $> 1,0$  mm), raízes grossas.

Os dados foram submetidos à ANOVA para a comparação dos tratamentos pelo software estatístico SISVAR® 5.6. Para os dados quantitativos utilizou-se a análise de regressão, com teste F significativo da análise de variância da regressão a 5% de probabilidade.

## RESULTADOS

Pela análise de variância houve interação significativa ( $p < 0.05$ ) entre as concentrações e as fontes de Si para o CRP, DRP, TCR, TCRF, RAF, RMF. Houve a interação entre as concentrações, fontes de Si e o período de aplicação dos tratamentos, correspondente às variáveis MSF, MSPA, MSR, AFE, MFE ( $p < 0.05$ ). Com relação às variáveis NF, AF, TAL, suculência, CRT, AST, DMR, VR, raízes finas e grossas não houve interação entre os tratamentos a 5% de probabilidade.

O CRP e o DRP obtiveram respostas semelhantes entre as concentrações de Si para o fertilizante Ácido silícico, tendo em média o CRP em 124,89 cm e DRP em torno de 4,39 mm. Para o fertilizante Agrisil verificou-se regressão quadrática para ambos, o CRP e DRP, obtendo valores máximos estimados, respectivamente, de 131,0 cm (em 2,35 g de Si) e de 4,44 mm (em 1,86 g de Si). As concentrações de 1,68 e 2,52 g de Si incrementaram o CRP em 11,06 e 11,96% e o DRP em 3,92 e 3,45% em relação ao controle (Figura 5a e 5b). O NF e o AF não apresentaram diferenças significativas relacionadas entre as concentrações e a fontes de Si, mostrando resposta semelhante das plantas em relação aos tratamentos, observando-se em média 16 folhas planta<sup>-1</sup> e AF igual a 881,09 cm<sup>2</sup> (Figura 5c e 5d).

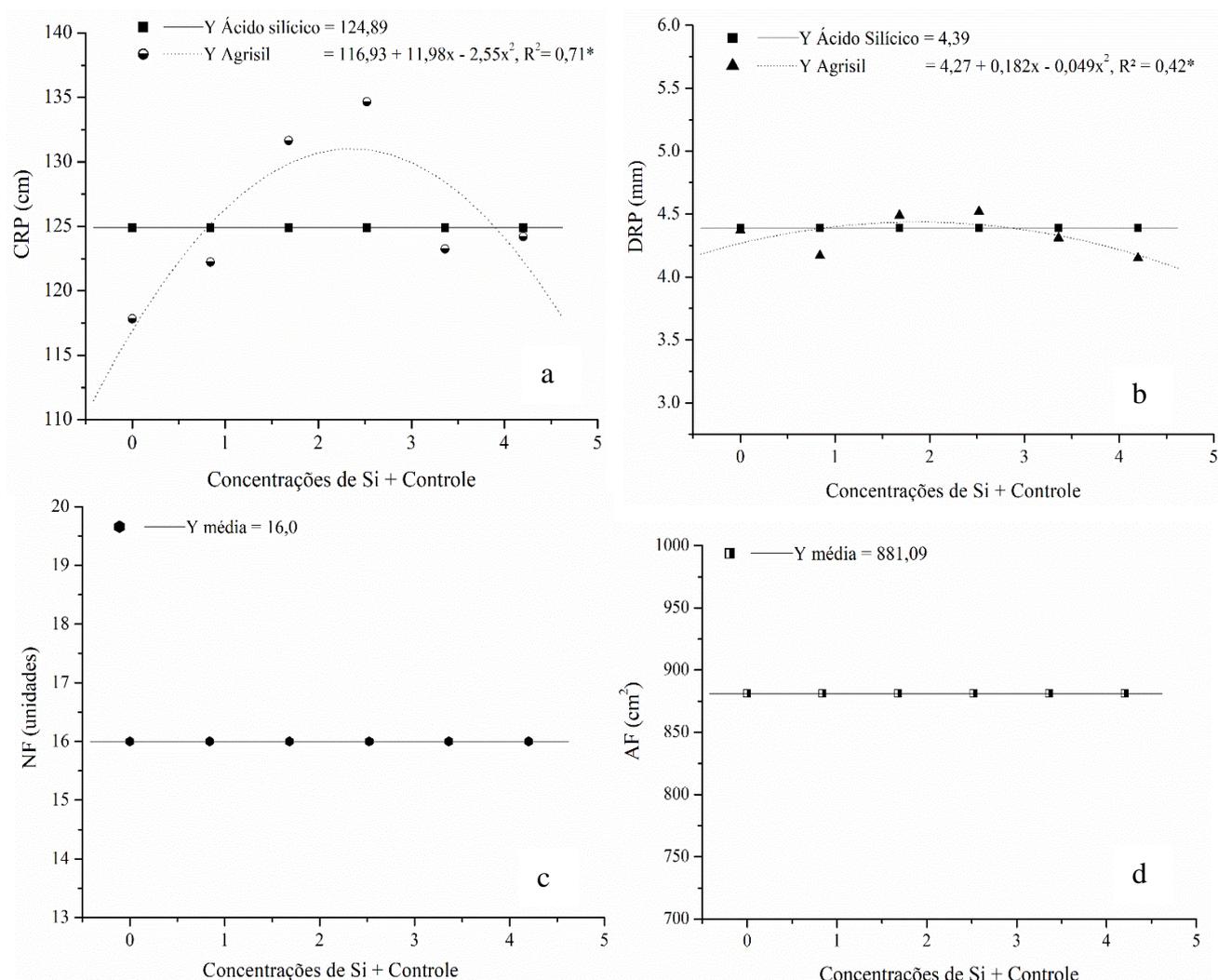


Figura 5: Comprimento (CRP) [a] e diâmetro médio do ramo do principal (DRP) [b] (média das três épocas de aplicação dos tratamentos); Número de folhas (NF) [c] e Área foliar do ramo do principal (AF) [d] (média dos três períodos de aplicação dos tratamentos e médias das duas fontes de silício) de maracujazeiro azedo, em função das concentrações de silício aplicadas em plantas cultivadas em hidroponia, casa de vegetação, após 165 dias de sementeiras. Obs: Regressão ( $\alpha = 0,05$ ) Concentrações de Si + Controle (g dm<sup>-3</sup>): 0 (sem aplicação de Si); 1 = 0,84 g ; 2 = 1,68 g; 3 = 2,52 g; 4 = 3,36; 5 = 4,20 g.

Para as variáveis MSF e MSPA, a resposta do Ácido Silícico foi semelhante para todos os períodos de aplicação dos tratamentos, 115;136 e 162 dias, tendo em média, respectivamente, 2,52; 3,91 e 9,39 g para MSF e 4,16; 7,32 e 20,24 g para a MSPA, observando-se acréscimos de 273% na MSF e 387% na MSPA em 47 dias de cultivo a mais com o Ácido silícico quando comparamos os períodos de 115 e 162 dias. Para o Agrisil, a MSF e a MSPA nos períodos de aplicação dos tratamentos de 115 e 136 dias não diferiram entre si, mantendo valores médios

entre as concentrações de 2,68 e 5,03 g para MSF e 4,46 e 9,69 g para MSPA, respectivamente. Contudo, aos 162 dias houve uma redução quadrática a partir da concentração de 2,52 g de Si, alcançando valores máximos estimados de 10,21 g na produção de MSF, em 1,23 g de Si, e de 21,92 g na MSPA, em 0,80 g de Si. Nas concentrações de 3,36 e 4,20 g de Si houve reduções, respectivamente, de 11,60 e 18,58% para MSF e de 16,69 e 17,01% para MSPA (Figura 6a e 6b).

Na figura 6, observamos, ainda, a MSR para ambos os fertilizantes, onde a MSR das plantas cultivadas com o Ácido silícico teve resultados semelhantes entre as concentrações tanto para o período de 115 quanto o de 136 dias de aplicação dos tratamentos, atingindo-se médias em torno de 0,94 e 1,45 g, respectivamente, promovendo aumentos de 54,25% na produção de MSR das plantas, enquanto o Agrisil teve uma regressão quadrática para o período de 115 dias, na qual as concentrações de 1,68 e 2,52 g de Si promoveram acréscimos de 173 e 369% na produção de MSR em relação às plantas controle, adquirindo-se valores máximos estimados de 1,42 g, em 2,16 g de Si (Figura 6c). Aos 136 dias, a resposta da MSR das plantas fertilizadas com Agrisil foi semelhante ao do Ácido Silícico, onde as concentrações possuíram valores similares, em torno de 1,24 g.

A TCR, a TCRF, a RAF e a RMF foram influenciadas pelas fontes de silício em suas diferentes concentrações (Figura 7). As plantas fertilizadas com o Ácido silícico evidenciaram uma resposta quadrática para a TCR e para a TCRF, onde as maiores concentrações de Si, 3,36 e 4,20 g decresceram em 1,34% e 54,60% a TCR em comparação as plantas controle, obtendo-se valores máximos de 0,03 g g<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, em 1,67 g de Si, enquanto a TCRF teve um incremento de 185% a partir da concentração de 0,84 g de Si, sendo o valor máximo atingindo a produção de 0,36 g dia<sup>-1</sup>, em 2,63 g de Si. Para a RAF não houve diferença entre as concentrações para o Ácido silícico, tendo em média a produção de 95,21 cm<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>, ao passo que, a RMF decresceu de forma linear conforme o aumento das concentrações de Si, em que as concentrações de 3,36 e 4,20 g de Si reduziram em 12 e 6% a RMF, respectivamente (Figura 7a, 7b, 7c e 7d).

Ainda na figura 7, a TCR e a RAF das plantas tratadas com o Agrisil expressaram respostas semelhantes entre as concentrações de Si, apresentando valores médios de 0,03 g g<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> e 92,03 cm<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 7a e 7c). Foi observada regressão linear para TCRF, com incrementos de 1,57% a partir da concentração de 1,68 g de si (Figura 7b). A RMF obteve uma quadrática

decrecente a partir da concentração de 0,84 g de Si (redução de 0,58%), acentuando-se na concentração de 2,52 g de Si com decréscimos de 14,42% em relação às plantas controle, e atingindo valores mínimos de produção de 0,52 g g<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, em 0,60 g de Si (Figura 7d). A TAL não variou conforme o aumento das concentrações de Si no substrato ao longo do tempo, tendo resposta semelhante à RAF, mostrando que a TAL não foi limitada pela área fotossinteticamente ativa (Figura 7e), mantendo-se em média o incremento da fitomassa das plantas em 1,48 g cm<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>.

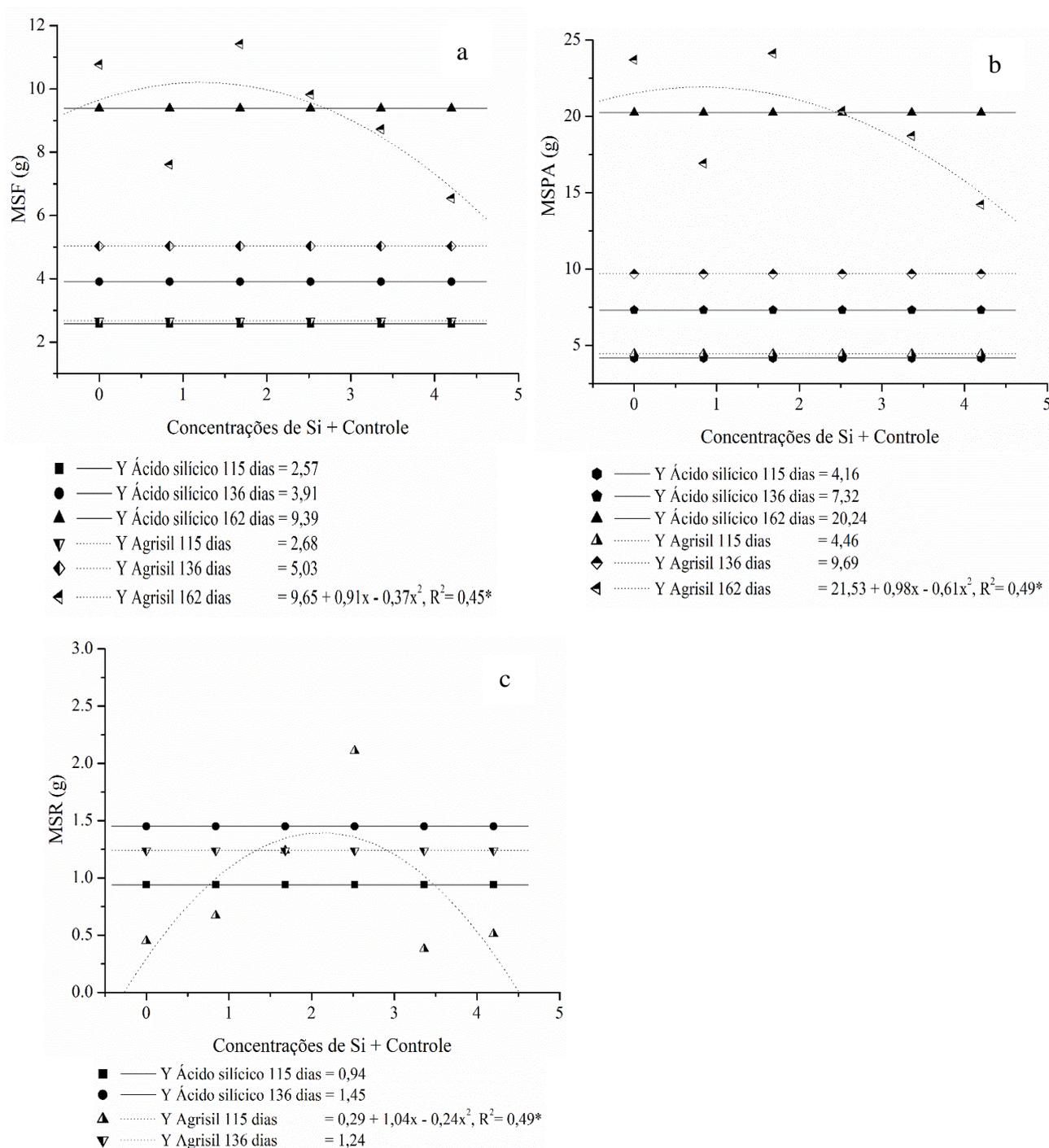


Figura 6: Matéria seca da folha (MSF), Matéria seca da parte aérea (MSPA) e a Matéria seca da raiz (MSR) de maracujazeiro azedo em função das concentrações de silício aplicadas e do tempo de aplicação dos tratamentos, em plantas cultivadas em Hidroponia, casa de vegetação, após 165 dias de sementeiras. Obs: Regressão ( $\alpha = 0,05$ ) Concentrações de Si + Controle (g  $dm^{-3}$ ): 0 (sem aplicação de Si); 1 = 0,84 g; 2 = 1,68 g; 3 = 2,52 g; 4 = 3,36; 5 = 4,20 g.

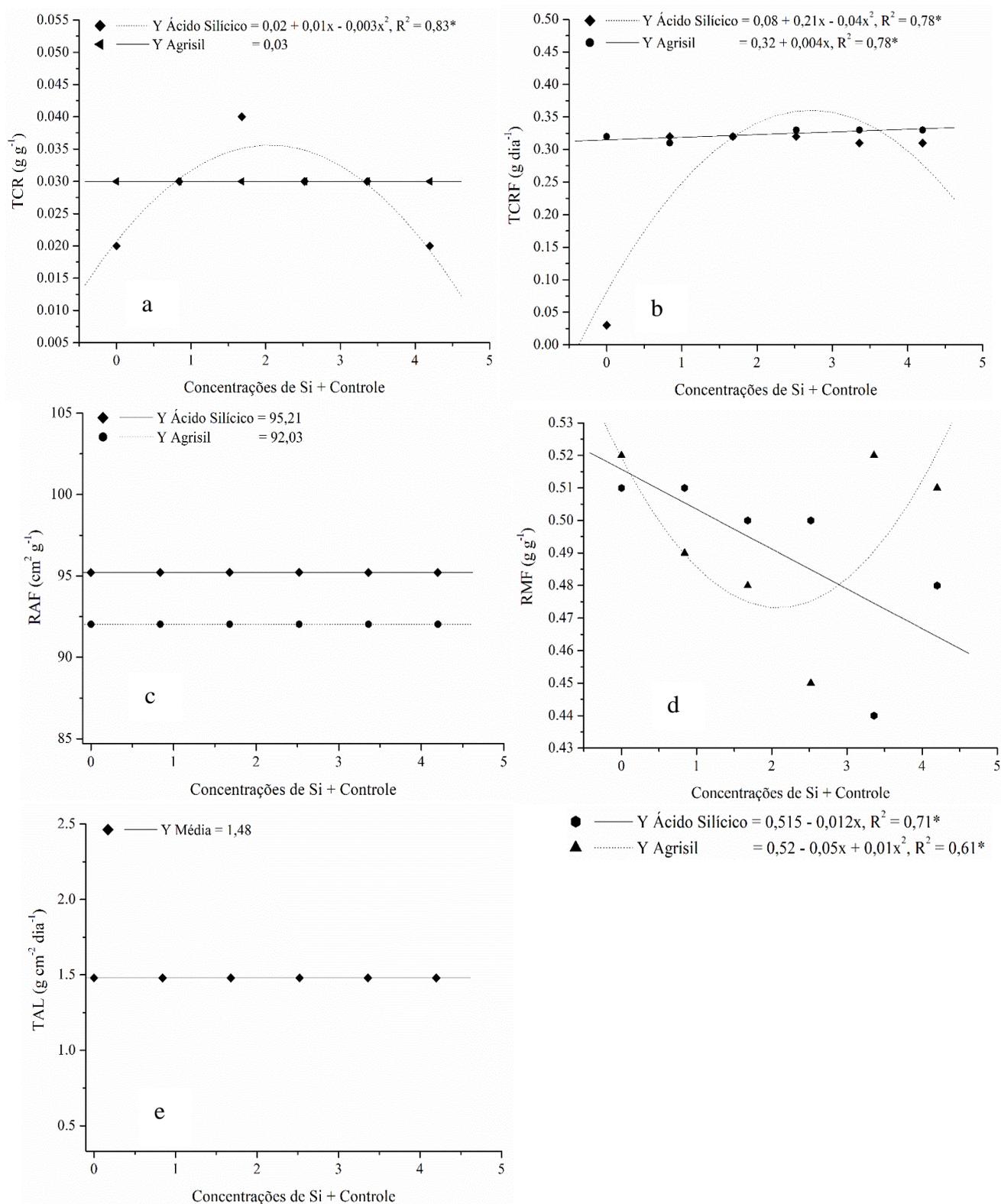


Figura 7: Taxa de crescimento relativo (TCR) [a], Taxa de crescimento relativo foliar (TCRF) [b], Razão da área foliar (RAF) [c], Razão da massa foliar (RMF) [d]; e Taxa de assimilação líquida (TAL) [e] (média dos três períodos de aplicação dos tratamentos e médias das duas fontes de silício) de maracujazeiro azedo em função das concentrações de silício aplicadas e do tempo de aplicação dos tratamentos, em dias, em plantas cultivadas em Hidroponia, casa de vegetação, após 165 dias de semeadas. Obs: Regressão ( $\alpha = 0,05$ ) Concentrações de Si + Controle ( $g dm^{-3}$ ): 0 (sem aplicação de Si); 1 = 0,84 g; 2 = 1,68 g; 3 = 2,52 g; 4 = 3,36; 5 = 4,20 g.

Em relação às variáveis morfoestruturais, a AFE teve uma resposta linear positiva para o Ácido Silícico, aos 115 dias de aplicação dos tratamentos (Figura 8a), com acréscimos de 40,53% na área foliar na concentração de 3,36 g de Si em comparação ao controle, indicando uma área foliar maior por unidade de produção de matéria seca foliar. Ainda, aos 136 e 162 dias, o Ácido silícico e as concentrações de Si alcançaram respostas semelhantes, mantendo-se em média 200,73 cm<sup>2</sup> para a produção de 1 grama de matéria seca aos 136 dias, e decaindo a superfície foliar útil em 31,24% na produção de matéria seca aos 162 dias.

Em relação ao Agrisil, os períodos de 115 e 136 dias não diferiram entre as concentrações de Si aplicada para AFE, tendo em média 208,08 cm<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> para o período de 115 dias, com redução de 12,58% da área fotossinteticamente ativa para a produção de biomassa seca aos 136 dias. Já aos 162 dias, teve uma resposta quadrática, demonstrando redução de 6,32% na concentração de 2,52 g de Si e incrementos de 12% e 37,54% nas concentrações de 0,84 e 4,20 g de Si, obtendo-se valores mínimos estimados de 127,66 cm<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>, em 1,51 g de Si (Figura 8a).

Na figura 8b, observa-se a MFE, que é o inverso da AFE e estima a espessura foliar das plantas, verifica-se que as concentrações de Si dentro da fonte Ácido silícico, tiveram, para todos os períodos de aplicação dos tratamentos, 115;136 e 162 dias, respostas semelhantes, possuindo em média 0,024 mm aos 115 dias, 0,028 mm aos 136 dias e 0,03 mm aos 162 dias, em 47 dias a mais de cultivo das plantas com Ácido silícico a espessura foliar teve um incremento de 25%. Quando comparadas a MFE e a AFE, constata-se que há o aumento da espessura foliar e diminuição da AFE ao longo do tempo de cultivo das plantas tratadas com esse fertilizante.

Na mesma resposta para a MFE pode-se notar para as plantas fertilizadas com o Agrisil, onde as concentrações não diferiram entre si em relação aos períodos de 115 e 136 dias, assim, houve o acréscimo de 4,17% na MFE, quando relacionam-se os dois períodos de aplicação. Os períodos tiveram médias, respectivamente, de 0,024 mm e 0,025 mm. Ao passo que, o período de 162 dias, deteve uma resposta linear decrescente, em que as concentrações de 3,36 e 4,20 g de Si decresceram em 24,32% e 25,14% a MFE em relação ao controle (Figura 8b). Observa-se, ainda, na figura 7c que o GS obteve uma resposta quadrática, em que a concentração de 1,68 g de Si aumentou em 15% o conteúdo de água nas

células em relação à área foliar estudada, enquanto a concentração de 4,20 g de Si reduziu essa variável em 2,30%. O GS obteve os valores máximos estimados de produção de 0,10 g cm<sup>-2</sup>, em 2,25 g de Si.

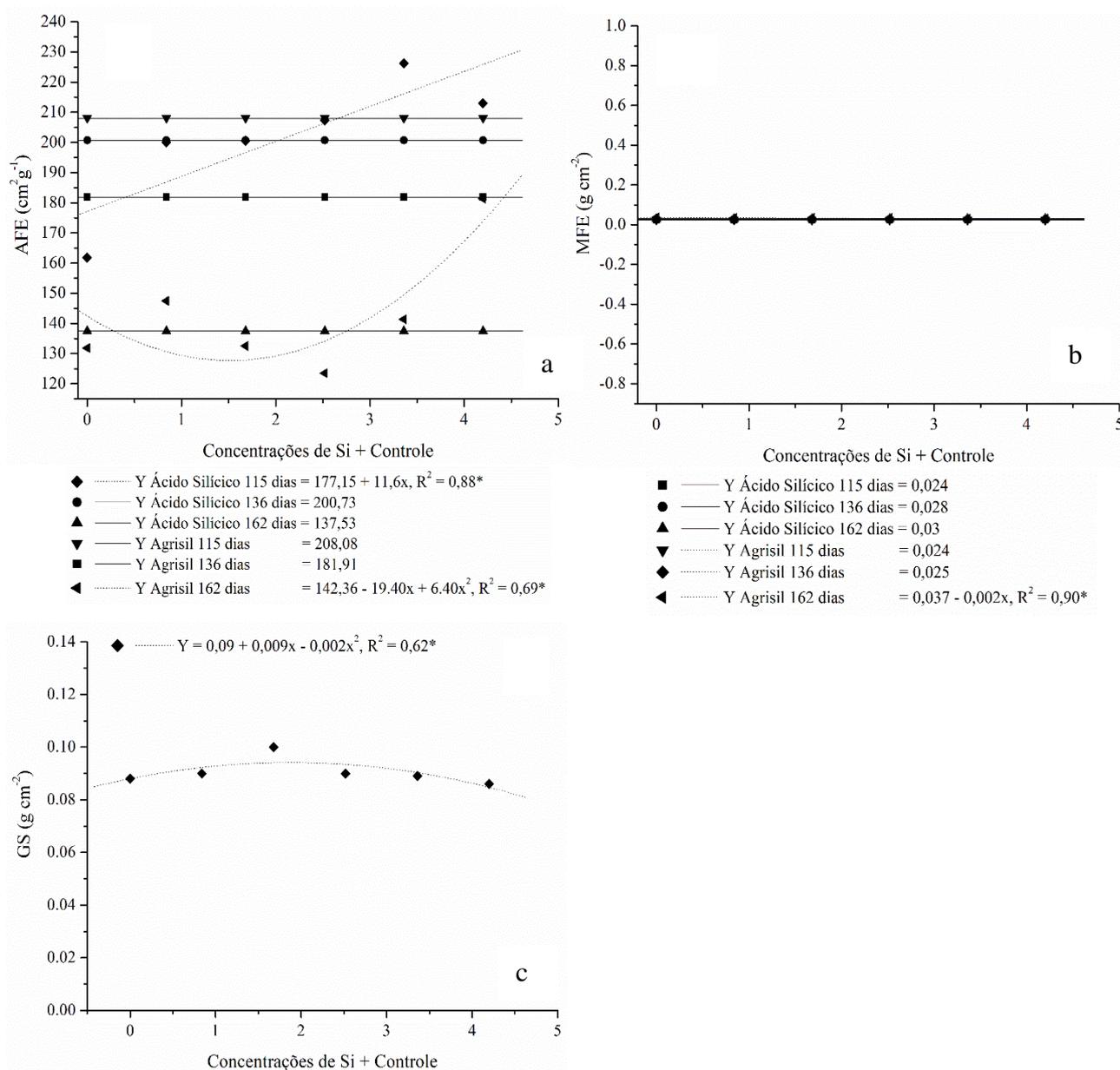


Figura 8: Área foliar específica (AFE) [a], Massa foliar específica (MFE) [b], em função do tempo de aplicação dos tratamentos, em dias, e o grau de suculência das folhas (GS) [c] (média dos três períodos de aplicação dos tratamentos e médias das duas fontes de silício) de maracujazeiro azedo, em função das concentrações de silício aplicadas em plantas cultivadas em Hidroponia, casa de vegetação, após 165 dias de sementeiras. Obs: Regressão ( $\alpha = 0,05$ ) Concentrações de Si + Controle (g dm<sup>-3</sup>): 0 (sem aplicação de Si); 1 = 0,84 g; 2 = 1,68 g; 3 = 2,52 g; 4 = 3,36; 5 = 4,20 g.

Quanto aos atributos radiculares, o CRT, a AST, o DMR e o VR, as plantas fertilizadas tanto com o Ácido silícico quanto com o Agrisil, nas diferentes concentrações de Si, não foram influenciadas significativamente a  $p \geq 0,05$ , obtendo-se os valores da média dos períodos de aplicação dos tratamentos e das fontes, encontrando, assim, uma quantidade total de raízes no substrato, respectivamente, de 3.653,11 cm, 603,03 cm<sup>2</sup>, 0,74 mm e 8,29 cm<sup>3</sup> (Figura 9a, 9b, 9c e 9d). O mesmo resultado foi observado para o CR, ASR e VR das raízes finas e grossas, onde as plantas tratadas com ambas as fontes de Si tiveram as médias das concentrações semelhantes entre si, expondo valores para as raízes finas em torno de 3.634,36 cm para o CR, de 518,11 cm<sup>2</sup> para a ASR e 8,33 cm<sup>3</sup> para o VR (Figura 10a, 10b e 10c), e as raízes grossas tiveram médias de 21,96 cm para o CR, de 21,37 cm<sup>2</sup> para a ASR e 1,97 cm<sup>3</sup> para o VR (Figura 10d, 10e e 10f).

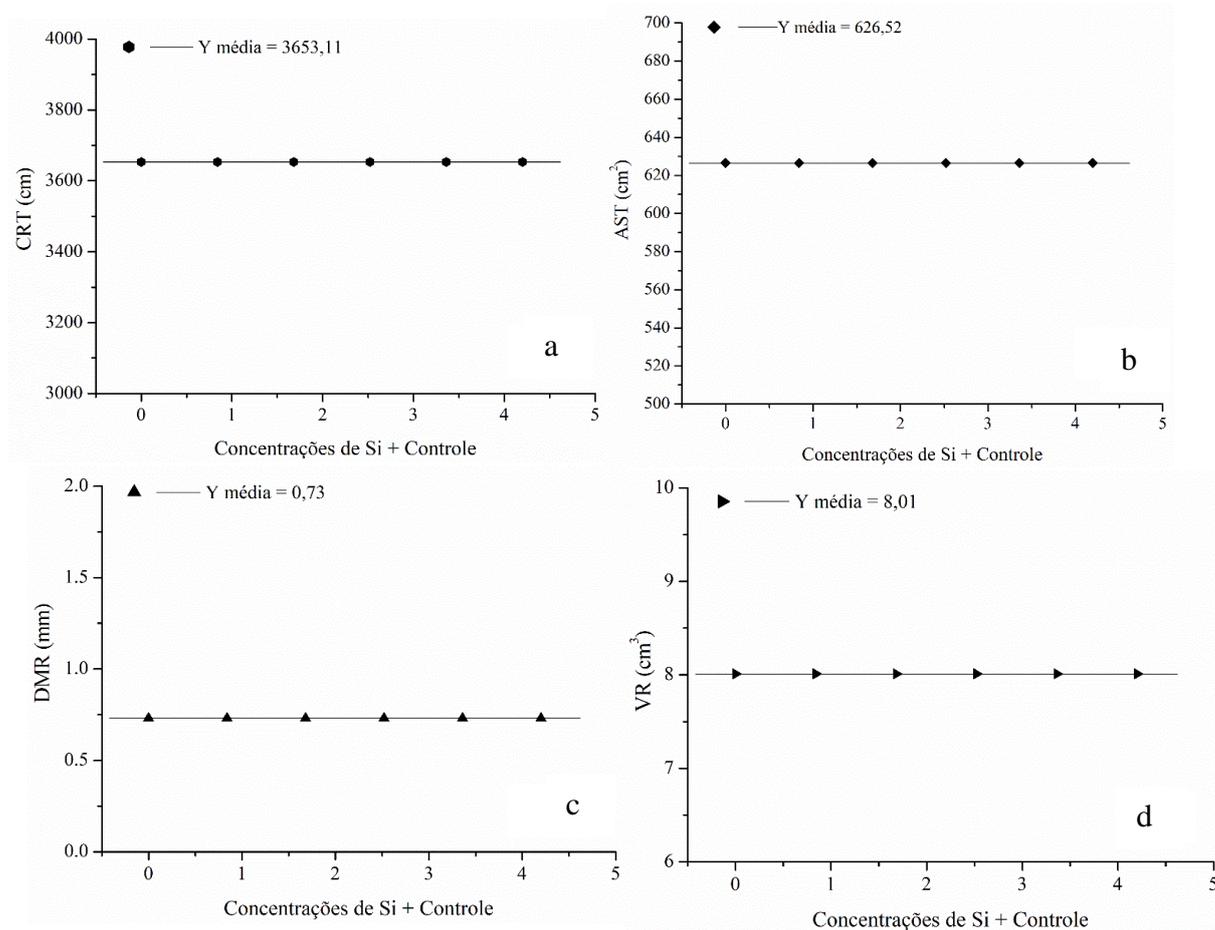


Figura 9: Comprimento total (CTR) [a], Área superficial total (AST) [b], Diâmetro médio (DMR) [c] e Volume radicular (VR) [d] (média dos três períodos de aplicação dos tratamentos e médias das duas fontes de silício) de maracujazeiro azedo, em função das concentrações de silício aplicadas em plantas cultivadas em Hidroponia, casa de vegetação, após 165 dias de sementeas. Obs: Regressão ( $\alpha = 0,05$ ) Concentrações de Si + Controle (g dm<sup>-3</sup>): 0 (sem aplicação de Si); 1 = 0,84 g; 2 = 1,68 g; 3 = 2,52 g; 4 = 3,36; 5 = 4,20 g.

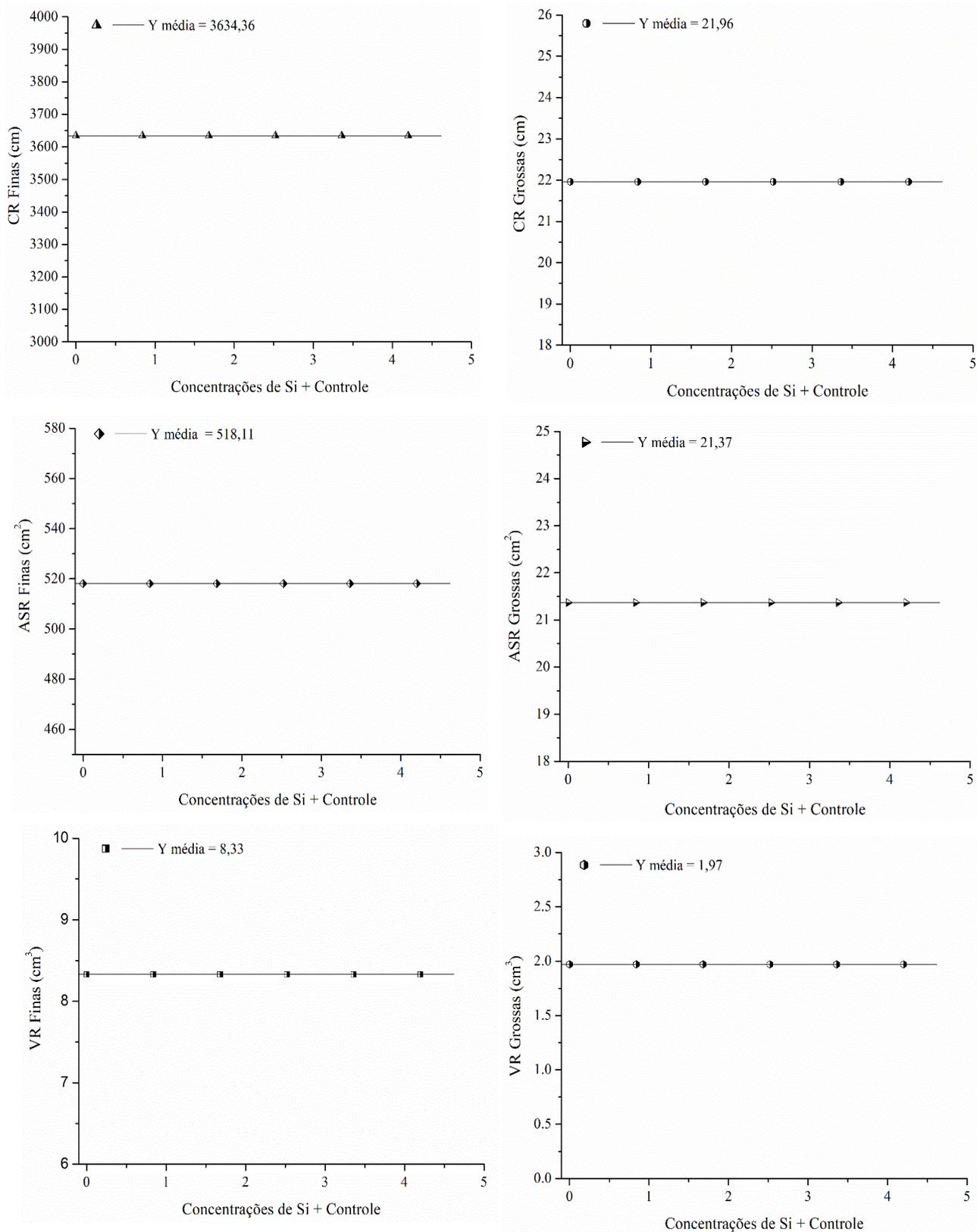


Figura 10: Comprimento (CR) [a] e [d], Área superficial (ASR) [b] e [e], e Volume (VR) [c] e [f] das raízes finas e grossas (média dos três períodos de aplicação dos tratamentos e médias das duas fontes de silício) de maracujazeiro azedo, em função das concentrações de silício aplicadas em plantas cultivadas em Hidroponia, casa de vegetação, após 165 dias de sementeiras. Obs: Regressão ( $\alpha = 0,05$ ) Concentrações de Si + Controle (g dm<sup>-3</sup>): 0 (sem aplicação de Si); 1 = 0,84 g; 2 = 1,68 g; 3 = 2,52 g; 4 = 3,36; 5 = 4,20 g.

## DISCUSSÃO

Nas análises mineralógicas do Ácido silícico e Agrisil (Figura 3 e 4) as barras de cor azul indicam os máximos reconhecidos pelo programa, assim, os fertilizantes demonstraram uma composição estritamente relacionada a uma única fase de  $\text{SiO}_2$ , onde para o Ácido silícico, a fase  $\text{SiO}_2$  é sem distinção do polimorfo dominante, como a responsável pelo pico, o que é condizente com a composição de elevada pureza do produto (Figura 3).

Em contrapartida, o Agrisil é formado por um polimorfo de  $\text{SiO}_2$  de baixa cristalinidade, cujo máximo de difração ocorre em posição próxima ao da amostra anterior (próximo aos  $22^\circ 2\theta$ , 4,01 Å), com pico de baixa intensidade e a simetria foi associada ao mineral tridimita, material típico de rochas vulcânicas ácidas. Portanto, para desenvolver recomendações de aplicação de materiais silicatados, o conhecimento sobre o status e a disponibilidade do Si de fertilizantes são essenciais (Korndörfer e Pereira, 2011).

As fontes de Si, Ácido silícico e Agrisil, utilizadas neste experimento apresentaram características similares na disponibilização do Si disponível para as plantas, pois ambas são polimorfos de  $\text{SiO}_2$  o que torna o fertilizante Agrisil uma fonte viável de Si para fertilização de plantas tanto em condições de casa de vegetação quanto em condição de campo, enquanto o Ácido silícico é mais utilizado para condições de laboratório. Ambas as fontes de Si não provocaram nenhuma toxidez ou algum estresse nas concentrações aplicadas nas plantas de maracujazeiro azedo.

A fertilização com Si promoveu uma resposta positiva ao maracujazeiro azedo em relação ao âmbito de crescimento, uma vez que as plantas absorveram quantidades significantes de Si que pudessem causar modificações em sua parte aérea. A disponibilidade do Si por ambos os fertilizantes foi semelhante, principalmente nas menores concentrações de Si (0,84; 1,68 e 2,52 g), deduzindo que o Si disponível pelos fertilizantes foi solubilizado e disponibilizado dentro da faixa de pH utilizada no experimento. O Si promoveu a polimerização do ácido silícico absorvido pelas raízes em sílica biogênica, e depositando-se no caule das plantas, conferindo rigidez e aumento da massa de matéria seca do caule, inferindo-se um grau de silicificação a essa variável que, segundo Ma e Yamaji

(2006), a silicificação das células é observada, além das lâminas foliares nos tecidos dos feixes vasculares do caule e na bainha.

As reduções que ocorreram no CRP, no DRP, na TCR, na TCRF, na MSF, na MSPA e na MSR nas maiores concentrações de Si (3,36 e 4,20 g) utilizadas no presente estudo, podemos relacionar à precipitação do Si disponível na solução homogênea, pois a fase mais solúvel de Si possui energia livre de superfície menor que fases menos solúveis, de maneira que os polimorfos mais solúveis de qualquer material se precipitam primeiro a partir de soluções supersaturadas, transformando-se em polimorfos menos solúveis (Melo e Alleoni, 2009). Segundo Marschner (2012), as concentrações de Si em solução aquosa maiores que 56 mg Si L<sup>-1</sup>, equivalente a 2mM, indicam supersaturação ou parcial polimerização do ácido silícico disponível. Resultado semelhante obtidos por Costa et al. (2016), os autores verificaram que a fertilização com Si na maior dose aplicada (0,83 g vaso<sup>-1</sup>) reduziu a maioria das variáveis de crescimento analisadas.

Embora exista variação na absorção e acumulação de Si na parte aérea entre as espécies (Ma e Yamaji, 2015), no caso do maracujazeiro-azedo, as plantas fertilizadas com Si (com até 2,52 g na solução) tiveram as melhores respostas nos atributos da parte aérea em comparação às plantas controle. Tais respostas mostraram que há melhora na qualidade das raízes por meio da absorção de Si, promovendo ainda o aumento na TCRF, pois o declínio na RMF não atingiu a RAF, confirmando a manutenção das folhas fotossinteticamente ativas pela TAL. Ahmed et al (2011b) ao analisarem duas cultivares de sorgo fertilizadas com Si sob estresse hídrico, observaram que a aplicação de Si afetou significativamente a taxa de crescimento, porém, não houve diferença entre as cultivares, e os valores máximos para razão da área foliar foram obtidos nas plantas tratadas com Si.

Desta maneira, os resultados da fertilização com Si nas plantas de maracujazeiro azedo são promissores, principalmente em relação a proteção do mecanismo de fotossintético, promovido nas folhas pela silicificação da parede celular, melhorando a estabilidade mecânica do caule e das lâminas foliares, conferindo um grau de resistência às plantas aos estresses ambientais (Ahmed et al., 2011a).

As plantas de maracujazeiro azedo mostraram diferenças significativas com a aplicação das fontes e concentrações de Si na estrutura foliar, devido à acumulação de Si nas folhas, a fitomassa aumentou a composição interna foliar,

propiciando maior espessura (MFE), este crescimento pode estar associado a deposição de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) polimerizado, conhecido como fitólito ou opala biogênica (Ahmed et al., 2013). E este aumento na espessura favoreceu o armazenamento de água celular expresso por meio do GS das plantas.

A redução na AFE ao longo do período estudado, não afetou a área fotossinteticamente ativa, pelo contrário, a RAF e a AF das plantas de maracujazeiro foram mantidas, de certa forma, o Si contornou a senescência das folhas. A redução da superfície foliar favorece a diminuição da perda de água pelas plantas de maracujazeiro azedo, ao passo que a espessura foliar maior permite o maior armazenamento de água, assim, permitindo a manutenção do balanço hídrico das plantas (James & Bell, 2001). Os resultados da estrutura morfológica em relação ao Si estão conectados com a qualidade do sistema metabólico das plantas, Costa et al. (2018) reportaram que as concentrações de Si utilizadas em seu estudo conferem qualidade e não quantidade das características anatômomorfológicas avaliadas.

Neste trabalho observa-se o impacto do Si nas estruturas das folhas e raízes, as respostas das plantas dependem fortemente da fonte de Si que é fornecida a estas. Neste estudo, as plantas de maracujazeiro investiram mais em formação de raízes, principalmente raízes finas, apresentando maior qualidade de raízes produzidas quando a planta de maracujazeiro é suplementada com Si. Resultando semelhantes foram observados por Linhares (2019) onde foram encontradas maior densidade das raízes finas para o maracujazeiro azedo, quando fertilizadas com o Ácido silícico para todas as variáveis analisadas (Comprimento, área superficial e volume radicular). Os mecanismos de absorção de Si, por meio da absorção de água, ainda são inconsistentes para a cultura do maracujazeiro azedo, necessitando de um estudo específico para identificar se a cultura possui os diferentes tipos de transportadores de Si, como o milho (Mitami et al., 2009), e o pepino (Liang et al., 2005).

A absorção ativa de Si para a cultura do maracujazeiro azedo ainda é uma incognita, desde que o gene transportador de Si foi identificado em plantas de arroz Lsi1 (OsLsi1) (Ma e Yamaji, 2006), os tipos diferentes de transportadores de Si e seus homólogos têm sido isolados e caracterizados em outras espécies. A diferença de acumulação de Si entre as espécies é uma habilidade atribuída a especificidade das raízes em absorver esse micronutriente (Ma e Yamaji, 2006).

Um estudo que identifique a absorção de Si no maracujazeiro facilitaria o entendimento do aumento da fitomassa seca do caule do maracujazeiro azedo, visto que foi atribuído que a aplicação de Si aumenta a absorção de água pelas raízes e a matéria seca tanto da parte aérea quanto das raízes das plantas, principalmente quando estas estão sob estresse hídrico (Sonobe et al., 2011).

A indução da produção de matéria seca mediada pela absorção de água pelo Si (Sonobe et al., 2011), pode ser aplicada às plantas de maracujazeiro-azedo, pois semelhantemente às plantas de pepino (Mitami et al., 2009), abrangem a classe dicotiledônea que absorvem o Si de forma passiva. O transportador Lsi1 é o canal responsável pelo transporte passivo da solução do solo para as membranas das células corticais das raízes (Ma e Yamaji, 2015). Mais estudos para analisar a absorção de água pelas raízes seriam necessários para compreender completamente os mecanismos ligados ao crescimento e a absorção de água das plantas, promovidos pelo Si para melhorar a tolerância do maracujazeiro azedo a qualquer estresse ambiental.

O sistema radicular do maracujazeiro azedo é pivotante com predominância de raízes laterais, sendo a maioria das suas raízes finas (Figura 10), e embora não observada diferença entre as concentrações e as fontes de Si, pode-se constatar que as fontes Ácido silícico e Agrisil proporcionaram valores máximos na matéria seca radicular (Figura 7), o que pode estar relacionado à deposição de sílica amorfa nas raízes, acarretando em força e rigidez ao tecido radicular (Ma e Yamaji, 2015), aumentando assim o diâmetro radicular pela absorção de Si pelas raízes laterais do maracujazeiro azedo. As raízes laterais desempenham um papel importante na absorção de Si, desta forma, as plantas de maracujazeiro azedo investiram mais na formação das raízes laterais, para garantir a absorção ideal de nutrientes e água (Martins et al., 2019). O gene transportador de Si, Lsi1 está mais presente nas raízes laterais e é um mediador fundamental na absorção de Si (Ma e Yamaji, 2008; Ma e Yamaji, 2015), se esse transportador for identificado nas raízes do maracujazeiro, seria um avanço no cultivo da espécie desse gênero fertilizadas com o Si.

Nesse contexto, a translocação dos elementos minerais, que são carregados pelo xilema da raiz, pode ter sido potencializada pelo crescimento radicular das plantas fertilizadas com ambas as fontes de Si, principalmente na promoção do crescimento de raízes finas, onde ocorre a absorção de água e

nutrientes das plantas de maracujazeiro-azedo. Isto pode ser confirmado em estudos como o de Martins et al. (2019), onde os autores verificaram que as plantas de *A. blanchetiana* cultivadas em 7 e 14  $\mu\text{M}$  de  $\text{CaSiO}_3$  investiram mais em formação de raízes ao invés de vasos de xilema, para garantir a absorção ideal de nutrientes e água do meio de cultura, o que pode compensar a perda do transporte de soluto, e permitir que a planta explore uma área maior do meio em que está inserida.

## CONCLUSÃO

1. As concentrações de 0,84; 1,68 e 2,52 g de Si promoveram incrementos nas características de crescimento, absorção de Si pelas raízes e nas estruturas morfológicas das folhas das plantas de maracujazeiro azedo.
2. A adubação com Si aumenta a produção de biomassa da parte aérea e radicular, a taxa de crescimento, bem como, a espessura foliar das plantas de maracujazeiro azedo, o que pode ser benéfico à resistência das plantas por ser um micronutriente que promove uma barreira física na parede celular e cuticular das folhas, além disso, induz metabólitos secundários como componente de resistência das plantas a estresse biótico e abiótico.
3. Os fertilizantes Ácido Silício e Agrisil atuam de forma semelhante na disponibilização de Si, em sua forma disponível  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ , no entanto, em proporções e tempos distintos.

## AGRADECIMENTOS

A autora agradece o apoio financeiro fornecido à pesquisa e pela concessão de bolsa de doutorado ao órgão de fomento Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoas de Nível Superior (CAPES) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo financiamento da pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, M., Hassen, F. U., Khurshid, Y. Does silicon and irrigation have impact on drought tolerance mechanism of sorghum? *Agricultural water management*, 98(12), 1808-1812, 2011a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.07.003>
- Ahmed, M., Hassen, F. u., Qadeer, U., Aslam, M. A. Silicon application and drought tolerance mechanism of sorghum. *African Journal of Agricultural Research*, 6(3), 594-607, 2011b. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR10.626>
- Ahmed, M., Kamran, A., Asif, M., Qadeer, U., Ahmed, Z. I., Goyal, A. Silicon priming: a potential source to impart abiotic stress tolerance in wheat: A review. *Australian Journal of Crop Science*, 7(4), 484-481, 2013. Disponível em: <https://search.informit.com.au/documentSummary;dn=308620458964442;res=1> ELHSS Acesso em: 28 de abr. de 2020.
- Ahmed, M., Qadeer, U., Ahmed, Z. I., Hassan, F. U. Improvement of wheat (*Triticum aestivum*) drought tolerance by seed priming with silicon. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62(3), 299-315, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1048235>
- Costa, B. N. S., Dias, G. M. G., Costa, I. J. S., Assis, F. A., Silveira, F. A., Pasqual, M. Effects of silicon on the growth and genetic stability of passion fruit. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 38(4), 503-511, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v38i4.30939>
- Costa, B. N. S., Costa, I. J. S., Dias, G. M. G., Assis, F. A., Pio, L. A. S., Soares, J. D. R., Pasqual, M. Morpho-anatomical and physiological alterations of passion fruit fertilized with silicone. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 53(2), 163-171 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018000200004>
- Dias, T. J., Cavalcante, L. F., Freire, J. L. O., do Nascimento, J. A., Beckmann-Cavalcante, M. Z., Santos, G. P. Qualidade química de frutos do maracujazeiro-amarelo em solo com biofertilizante irrigado com águas salinas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15(3), 229-236, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000300002>
- Epstein, E., Bloom, A. *Nutrição Mineral de Plantas: Princípios e Perspectivas*. 2ª ed. Editora Planta – Londrina, 401p. 2006.
- Fawe, A., Abou-Zaid, M., Menzies, J. G., Bélanger, R. R. Silicon-mediated accumulation of flavonoid phytoalexins in cucumber. *Biochemistry and Cell Biology*, 88(5), 396-401, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1094/PHYTO.1998.88.5.396>.
- Guntzer, F., Keller, C., Meunier, J. D. Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(1), 201-213, 2012. DOI: 10.1007/s13593-011-0039-8

- Haynes, R. J. What effect does liming have on silicon availability in agricultural soils?. *Geoderma*, 337, 375-383, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.026>
- James, S.A., D.T. Bell. 2001. Leaf morphological and anatomical characteristics of heteroblastic *Eucalyptus globosus* ssp. *globosus* (Myrtaceae), *Australian Journal of Botany*, 49:259-269. Doi: //doi.org/10.1071/BT99044
- Korndörfer, G. H., Pereira H. S. Silicon testing, silicon fertilizer manufacturing techniques and standards. \_In: Proceedings of the International Conference on Silicon in Agriculture, Beijing, China, 89-98, 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/260553313>. Acesso em: 29 de julho de 2020.
- Liang YC, Si J, Römheld V. Silicon uptake and transport is an active process in *Cucumis sativus*. *New Phytologist*, 167:797–804, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01463.x>
- Liang, Y., Sun, W., Zhu, Y. G., Christie, P. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. *Environmental Pollution*, 147: 2, 422-428, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008>
- Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H., Song, A. Silicon in agriculture: From Theory to Practice. *Dordrecht: Springer*, 10, 250p., 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9978-2>
- Linhares, G. A. N. Maracujazeiro azedo adubado com fontes de silício: absorção e translocação de silício e caracterização fisiológica. \_In: Fontes de silício em mamoeiro e maracujazeiro: crescimento, fisiologia e indução de resistência. 107f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, 2019.
- Ma, J., Tamai, K., Yamaji, N. Mitani, N., Konishi, S., Katsuhara, M., Ishiguro, M., Murata, Y., Yano, M. A silicon transporter in rice. *Nature*, 440, 688–691, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature04590>
- Ma, J.F., Yamaji, N. Functions and transport of silicon in plants. *Cellular and Molecular Life Sciences*. 65, 3049–3057, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00018-008-7580-x>
- Ma, J. F., Yamaji, N. A cooperated system of silicon transport in plants. *Trends in Plant Science*, 20:7, 435-442, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tplants.2015.04.007>
- Marschner, H. *Mineral nutrition of higher plants*. 3.ed London: Elsevier, 643p. 2012.
- Martins, J. P. R., Rodrigues, L. C. A., Silva, T. S., Santos, E. R., Falqueto, A. R., Gontijo, A. B. P. L. Sources and concentrations of silicon modulate the physiological and anatomical responses of *Aechmea blanchetiana* (Bromeliaceae) during in vitro culture. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 137(2), 397-410, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11240-019-01579-6>

- Meletti, L.M.M. Avanços na cultura do maracujá no Brasil. *Revista Brasileira de Fruticultura*, Jaboticabal- SP, 33, SPE1, 83-91, 2011.
- Melo, V. F., Alleoni, L. R. F. *Química e mineralogia do solo parte 1: conceito básicos*. 1º ed. Viçosa-Minas Gerais. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 695p., 2009.
- Mitani, N., Yamaji, N., Ma, J. F. Identification of maize silicon influx transporters. *Plant and Cell Physiology*, 50(1), 5-12. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1093/pcp/pcn110>
- Peixoto, C. P., Peixoto, M. F. S. P. Dinâmica do crescimento vegetal: princípios básicos. In: Carvalho, C. A. L., Dantas, a. C. V. L., Soares, A. C. F., Melo Filho, J. F., Oliveira, G. J. C. Tópicos em Ciências Agrárias. Cruz das Almas, BA. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciência Agrárias, Ambientais e Biológicas, 1, 38-53, 2009. Disponível em: <http://files.prof-vanderufersa.webnode.com.br/200000123-6a2186a9e0/Livro%20T%C3%B3picos%20em%20Ci%C3%Aancias%20Agrarias.pdf#page=39> Acesso em: 14 de abril de 2020.
- Sonobe, K., Hattori, T., An, P., Tsuji, W., Eneji, A. E., Kobayashi, S., Kawamura, Y., Tanaka K., Inanaga, S. Effect of silicon application on sorghum root responses to water stress. *Journal of Plant Nutrition*, 34:1, 71-82, 2011. DOI: 10.1080/01904167.2011.531360
- Takahashi E, Ma JF, Miyake Y. The possibility of silicon as an essential element for higher plants. *Comments on Agricultural and Food Chemistry*, 2(2), 99–122, 1990.
- Wang, S., Liu, P., Chen, D., Yin, L., Li, H., Deng, X. Silicon enhanced salt tolerance by improving the root water uptake and decreasing the ion toxicity in cucumber. *Frontiers in plant science*, 6, 759, 1-10, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00759>
- Yin, L., Wang, S., Li, J., Tanaka, K., Oka, M. Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of *Sorghum bicolor*. *Acta Physiologiae Plantarum*, 35:11, 3099-3107, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11738-013-1343-5>
- Yin, L., Wang, S., Liu, P., Wang, W., Cao, D., Deng, X., Zhang, S. Silicon-mediated changes in polyamine and 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid are involved in silicon-induced drought resistance in *Sorghum bicolor* L. *Plant Physiology and Biochemistry*, 80, 268-277, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.04.014>.
- Yin, L., Wang, S., Tanaka, K., Fujihara, S., Itai, A., Den, X., Zhang, S. Silicon-mediated changes in polyamines participate in silicon-induced salt tolerance in *Sorghum bicolor* L. *Plant, cell & environment*, 39:2, 245-258, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/pce.12521>.

Zeraik, M. L., Pereira, C. A. M., Zuin, V. G., Yariwake, J.H. Maracujá: um alimento funcional?. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 20(3), 459-471, jun/jul. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-695X2010000300026>

Zhu, Y., Yin, J., Liang, Y., Liu, J., Jia, J., Huo, H., Wu, Z., Yang, R., Gong, H. Transcriptomic dynamics provide an insight into the mechanism for silicon-mediated alleviation of salt stress in cucumber plants. *Ecotoxicology and environmental safety*, 174, 245-254. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.075>

### 3.2. APLICAÇÃO DE SI EM PLANTAS DE MARACUJAZEIRO AZEDO CULTIVADAS EM HIDROPONIA: RENDIMENTO QUÂNTICO, TROCAS GASOSAS E ABSORÇÃO.

**Resumo:** O Si é um elemento considerado benéfico ao crescimento de plantas superiores, apresentando funções significativas, especialmente em resposta à condição de estresse, além disso, confere às plantas resistência a pragas e doenças causadas por fungos e bactérias devido à deposição de sílica amorfa nas paredes celulares dos vegetais. O maracujazeiro azedo está entre as frutíferas de maior expressão econômica no Brasil, tendo destaque nas últimas décadas no agronegócio, no que se refere a produção de frutas. O objetivo do trabalho foi avaliar a ação do elemento Si, por meio de duas fontes comerciais, Agrisil e o Ácido silícico, em diferentes concentrações, nos aspectos fisiológicos das plantas de maracujazeiro azedo. Os tratamentos consistiram em cinco concentrações de silício e o tratamento controle (0; 0,84; 1,68; 2,52; 3,36 e 4,20 g de silício.dm<sup>-3</sup>), sendo duas fontes comerciais de silício, Ácido silícico e Agrisil, e três períodos de avaliação nas plantas 115, 136 e 162 dias após a aplicação de Si. As plantas foram submetidas às análises de trocas gasosas, Spad, rendimento quântico do PSII e de absorção de Si por meio dos teores e conteúdo. As concentrações de 0,84 e 1,68 g de Si foram mais eficientes na manutenção do mecanismo da clorofila, aumentando a condutância e transpiração, com as taxas fotossintéticas, o rendimento quântico do PSII e o desempenho fotossintético sendo mantidos nessas concentrações. A partir da concentração de 1,68 g de Si houve um incremento de 11% no teor de SiF nas plantas fertilizadas com o Ácido silícico. Em relação às plantas cultivadas com o Agrisil houve incrementos de 17% no teor de SiF a partir

da concentração de 3,36 g de Si. Assim, concluiu-se que a introdução da fertilização com o Si nas plantas de maracujazeiro azedo, favorece a proteção do mecanismo fotossintético, e o Si advindo do Ácido silícico é mais rapidamente disponibilizado, enquanto o Si do Agrisil é disponibilizado de forma mais lenta, sendo que o maior teor deste Si é acumulado nas raízes dessa espécie frutífera.

**Palavras-chave:** Ácido silícico, Adubação, fruticultura, Maracujá, Mecanismo fotossintético.

#### SI APPLICATION IN SOUR PASSION FRUIT PLANTS CULTIVATED IN HYDROPONICS: QUANTUM YIELD, GAS EXCHANGES AND ABSORPTION

**Abstract:** Si is an element considered beneficial to the growth of higher plants, presenting significant functions, especially in response to stress conditions, besides, it gives plants resistance to pests and diseases caused by fungi and bacteria due to the amorphous silica deposition in the cell wall. Sour passion fruit is among the most economically important fruit trees in Brazil, having been highlighted in recent decades in agribusiness, concerning fruit production. The work aimed to evaluate the action of the Si element, through two commercial sources, Agrisil and Silicic acid, in different concentrations, in the physiological aspects of passion fruit plants. The treatments consisted of six silicon concentrations (0; 0.84; 1.68; 2.52; 3.36 and 4.20 g of silicon.dm<sup>-3</sup>), two silicon commercial sources, Silicic acid and Agrisil, and three evaluation periods in plants 115, 136 and 162 days after Si application. The plants were subjected to gas exchange analysis, Spad, PSII quantum yield and Si absorption through the contents. The Si concentrations of 0.84 and 1.68 g were most efficient in maintaining the chlorophyll mechanism, increasing conductance and transpiration, with photosynthetic rates, PSII quantum yield and photosynthetic performance being maintained at these concentrations. From the Si concentration of 1.68 g, there was an increase of 11% in the SiF content in plants fertilized with silicic acid. Concerning plants grown with Agrisil, there were only 17% increments in the SiF content from the Si concentration of 3.36 g. Thus, we conclude that the introduction of Si fertilization in sour passion fruit, favours the protection of the photosynthetic mechanism, and Si forthcoming from silicic acid is more readily available, while Si from Agrisil is made available more slowly, being that the highest content of this Si is accumulated in the roots of this fruit species.

**Keys word:** Silicic acid, Fertilization, Orchards, Passion fruit, Photosynthetic mechanism

## INTRODUÇÃO

O silício (Si) pode ser encontrado no solo nas formas de ácido silícico [H<sub>4</sub>SiO], sílica e silicatos, e devido à sua forte afinidade com o oxigênio, sua presença no solo é facilmente associada à dessilicificação de minerais primários do solo mais o intemperismo, que são fontes vitais de Si disponível. A liberação de Si no solo ocorre na forma de ácido monossilícico que é o meio prontamente disponível para ser absorvido pelo sistema radicular das plantas, além disso, o Si é um fertilizante útil e de alta qualidade para a agricultura sustentável (Ahmed et al., 2020). Considerado um elemento benéfico para o crescimento de plantas superiores, tem funções significativas especialmente em respostas à condição de estresse (Epstein e Bloom, 2006).

A função do Si na planta está relacionada com a proteção contra vários tipos de estresses como estresse hídrico, salino, temperaturas altas, frio, toxicidade de metais, encharcamento e desbalanço nutricional, e confere resistência a estresse biótico como pragas e doenças causadas por fungos e bactérias (Ma e Yamaji, 2015). Além disso, o Si disponível aumenta a resistência das culturas, adaptando a captação e o transporte de água das plantas, induzindo a tolerância à desidratação a níveis celular ou de tecido, melhorando o status da água, o que facilita o acesso e a disponibilidade fotossintética das plantas (Ahmed et al., 2013).

O efeito do Si no aumento da resistência à seca ocorre devido à redução da evaporação ou controlando a condutância estomática, quando absorvido e depositado na cutícula das plantas forma uma dupla camada cutícula-Si, que atua como uma barreira física que reduz a perda de água pela transpiração (Yin et al., 2014, Ma e Yamaji, 2015). Além do mais, essa dupla camada cutícula-Si dificulta a penetração das hifas fúngicas e o ataque de pragas, promovendo barreira mecânica pela deposição de sílica amorfa hidratada na parede celular, o que atrapalha o processo de infecção e torna difícil a penetração do estilete e a mastigação do inseto nos tecidos das plantas (Ma e Yamaji, 2008).

Embora o Si não seja considerado essencial para a maioria das espécies, assim possui muitos efeitos positivos na taxa fotossintética, condutância estomática, na concentração de clorofila, na atividade fotoquímica, bem como no

crescimento e desenvolvimento das plantas (Frew et al., 2018). Em plantas de pepinos o Si aumenta a acumulação de poliaminas modulando o sistema de defesa quando submetidas ao estresse salino, reduzindo o estresse oxidativo e aumentando a tolerância aos sais (Yin et al., 2019). Zanetti et al. (2016) reportam que a aplicação foliar de Si em plantas de cacau quando submetidas ao estresse hídrico aumentou a taxa fotossintética, a eficiência do uso da água e a taxa de carboxilação, além de ter mitigado o efeito do estresse oxidativo nessa cultura.

O Maracujazeiro azedo, do gênero *Passiflora*, é considerado uma planta acumuladora de Si nas raízes, onde diversos estudos mostram que o Si promove alterações anatômicas e melhorias nos aspectos fisiológicos e morfoanatômicos das plantas (Costa et al., 2016; Costa et al., 2018e). Entre as espécies do gênero *Passiflora*, a *Passiflora edulis* Sims é a espécie mais cultivada como maracujazeiro azedo, de maior expressão econômica, social, de cultivo e produção do Brasil, podendo corresponder até 95% da produção comercial de maracujá no país (Faleiro et al., 2008).

A preferência pelos frutos do maracujazeiro azedo é devido a sua qualidade, com uma série de características agrônômicas consideradas superiores tanto para o mercado de frutas frescas como para a indústria de sucos, tais como a qualidade, vigor, tamanho, peso, teor de caroteno, acidez total, produtividade por hectare e rendimento de suco dos seus frutos (Zeraik et al., 2010; Meletti, 2011), tornando o Brasil o maior produtor e consumidor mundial dessa frutífera (Dias et al., 2011).

Alguns estudos sugerem que o Si pode estar envolvido nos processos fisiológicos e no sistema de defesa (Yin et al., 2014, Yin et al., 2019), porém o mecanismo de tolerância aos diversos estresses proporcionados pelo ambiente mediado pelo Si, ainda precisa ser melhor compreendido e explorado, principalmente em espécies dicotiledôneas como o maracujazeiro. Em vista disso, este trabalho teve como objetivo avaliar a ação do elemento Si, por meio de duas fontes comerciais, Agrisil e o Ácido silícico, em diferentes concentrações, nos aspectos fisiológicos das plantas de maracujazeiro azedo, a fim de verificar se os efeitos benéficos na fisiologia das plantas são originários do micronutriente.

## MATERIAL E METODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação no *Campus* da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, localizada 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). O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, com os tratamentos dispostos em análise conjunta 6 x 2 x 3: seis concentrações de silício 0; 0,84; 1,68; 2,52; 3,36 e 4,20 g de silício.dm<sup>-3</sup>; duas fontes comerciais de silício (Ácido silícico e Agrisil); e três períodos de avaliação nas plantas (115, 136 e 162 dias, iniciados após a germinação das sementes), com quatro blocos, dois vasos por parcela e uma planta por vaso, compondo a unidade experimental, totalizando 288 vasos.

Durante a condução do experimento, a casa de vegetação foi equipada com um datalogger Hobo modelo U23-001 Pro v2 Onset® para obtenção diária da temperatura e da umidade relativa do ar. As leituras obtidas durante o período experimental estão apresentadas na Figura 1.

As sementes de maracujazeiro azedo foram obtidas por meio do Laboratório de Melhoramento Genético Vegetal (LMGV) da UENF, sendo utilizadas sementes da cultivar "Rio Dourado" (*Passiflora edulis* Sims). Para o processo de germinação, as sementes foram semeadas diretamente em vasos de polietileno preto com capacidade volumétrica de 5 dm<sup>3</sup>, preenchidos com o substrato areia, lavada devidamente em água corrente, e em seguida, em água desionizada. A areia foi escolhida como substrato por ser inerte quanto ao fornecimento de nutrientes, ter pH neutro, por apresentar retenção de água e porosidade adequadas para a oxigenação das raízes, oferecer sustentação para as plantas, e proteção às raízes aos danos físicos.

Na fase inicial, a irrigação foi feita diariamente buscando-se manter a umidade do substrato em todos os vasos próxima a 70%. Durante os primeiros 15 dias, as plântulas foram irrigadas alternadamente, com 200 ml de água e solução nutritiva completa adaptada para a cultura do maracujazeiro com ¼ da força. Após esse período, foram irrigadas a cada dois dias, com 200 ml de solução nutritiva completa com ½ força. Após 22 dias e até o final do experimento, as plantas foram irrigadas durante cinco dias consecutivos com solução nutritiva completa com 100%

da força, conforme a necessidade da planta ao longo do dia, tendo em média 450 ml vaso<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, sendo o pH da solução sempre ajustado para 5,4 (Tabela 1), e a cada dois dias irrigadas com água deionizada para que não houvesse salinização do meio.

As fontes comerciais utilizadas para a composição dos tratamentos foram o ácido silício SiO<sub>2</sub>\*xH<sub>2</sub>O PA. MERCK® (99,0 – 100,5 % de SiO<sub>2</sub> disponível) e Agrisil Agrobiológica® (98% de SiO<sub>2</sub> disponível). Antes do início do experimento foi feita a análise química do fertilizante comercial Agrisil, e a composição química do Ácido silício foi elaborada de acordo com as informações do fabricante do produto (Tabela 2). A aplicação dos tratamentos fontes e concentrações de silício foi iniciada ao 23º dia após a germinação, e foram realizadas a cada 15 dias. As concentrações de Si, 0,84; 1,68; 2,52; 3,36 e 4,20 g e mais o tratamento controle (sem adição de Si) foram calculadas conforme a capacidade do vaso de 5 dm<sup>3</sup> e parceladas em 12 aplicações (Tabela 3).

Tabela 1: Composição da solução nutritiva completa 'Hoagland' modificada, utilizada no experimento do maracujazeiro azedo-Hidroponia, em diferentes concentrações de silício. Campos dos Goytacazes, RJ. 2020.

Solução estoque	Completo (ml L <sup>-1</sup> )
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 4H <sub>2</sub> O (2 mol L <sup>-1</sup> )	1,5
KNO <sub>3</sub> (2 mol L <sup>-1</sup> )	2,0
MAP (1 mol L <sup>-1</sup> )	0,5
MgSO <sub>4</sub> (1 mol L <sup>-1</sup> )	2,0
FeEDTA (25 g L <sup>-1</sup> )	1,0
MICRO*	1,0
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> (25mM)	1,0
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (1 mol L <sup>-1</sup> )	0,5

\* Micro: ZnSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O-578 mg L<sup>-1</sup>, CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O-0,125 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>

Tabela 2: Análise química dos fertilizantes comerciais Agrisil e Ácido silícico utilizados no experimento do maracujazeiro azedo-Hidroponia, em diferentes concentrações de silício. Campos dos Goytacazes, RJ. 2020

Fert.	Ca	Mg	K	P	S	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Zn	Cl
	g Kg <sup>-1</sup>					mg g <sup>-1</sup>							
Agrisil	1,39	0,44	1,23	1,28	0,23	29,35	1,64	1372	2,19	0,83	0,84	28,3	-
Ác. Si.	%												
Ác. Si.	-	-	-	-	-	-	-	0,03	-	-	-	-	0,05

Tabela 3: Quantidade de silício aplicado no substrato, em experimento de maracujazeiro azedo, cultivado em Hidroponia, Casa de vegetação. Campos dos Goytacazes, RJ. 2019.

Concentrações de Si ( $\text{mM mL}^{-1}$ )	Primeira aplicação		Secunda aplicação		12ª aplicação		Total de Si aplicado (g)
	Si (mg)	Si ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) <sup>3)</sup>	Si (mg)	Si ( $\text{mg dm}^{-3}$ )	Si (mg)	Si ( $\text{mg dm}^{-3}$ )	
0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	14	70	14	70	14	70	0,84
1,0	28	140	28	140	28	140	1,68
1,5	42	210	42	210	42	210	2,52
2,0	56	280	56	280	56	280	3,36
2,5	70	350	70	350	70	350	4,20

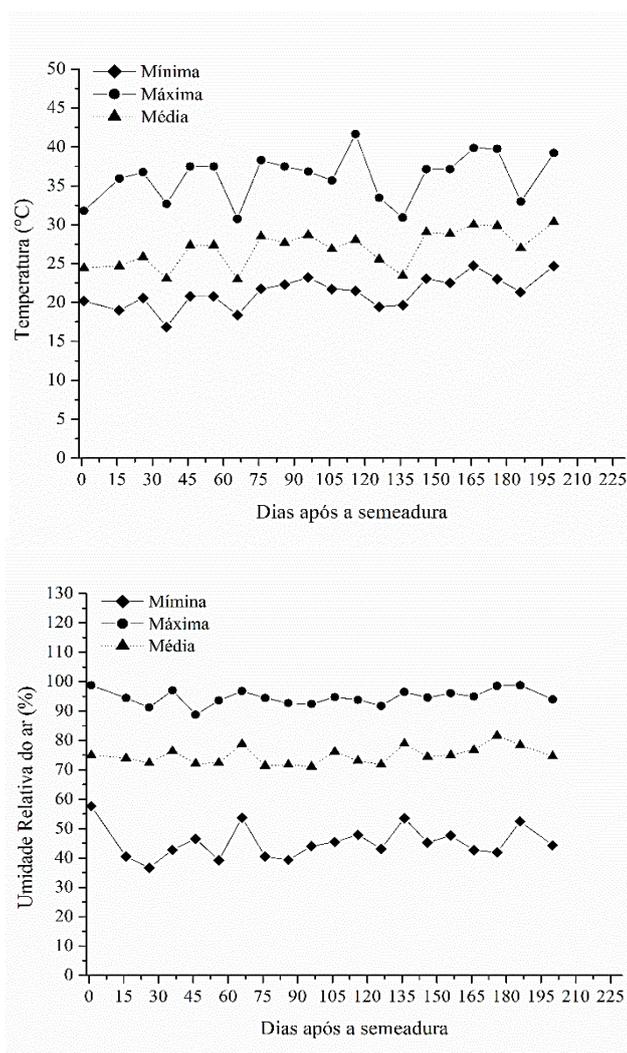


Figura 1: Monitoramento da Temperatura, em °C, e da Umidade relativa do ar, em %, durante o cultivo das plantas de maracujazeiro azedo, em Hidroponia, em Casa de Vegetação. Campos dos Goytacazes. 2019.

A solução de Si foi preparada por meio de adição de SiO<sub>2</sub> de cada fonte em água desionizada, e aplicadas em um volume de 250 ml dm<sup>-3</sup>, diretamente no substrato areia ao redor do caule das plantas. As equações 1 e 2 representam os cálculos de adição de SiO<sub>2</sub> disponível nas plantas, em que CF<sub>1</sub> é a concentração da fonte Ácido silícico; C<sub>x</sub> é a concentração de silício em mg dm<sup>-3</sup>; CF<sub>2</sub> é a concentração da fonte Agrisil; PMA<sub>s</sub> é o peso molecular do Ácido silícico = 46,75; e o PMA<sub>g</sub> é o peso molecular Agrisil = 45,85.

$$C_{F1} = \frac{100 \cdot C_x}{PMA_s} \quad (1)$$

$$C_{F2} = \frac{100 \cdot C_x}{PMA_g} \quad (2)$$

As fontes de silício foram analisadas quanto à composição mineral pela técnica de difração de raios-X (DRX) por Linhares et al. (2020); dados não publicados, que possibilita a detecção de fases cristalinas nas amostras por meio da determinação dos diversos espaçamentos atômicos da rede cristalina dos minerais. Os fertilizantes foram estudados na forma de pó, após moagem e peneiramento (malha < 0,053 mm), por meio de montagens não orientadas confeccionadas em porta amostra metálico de formato côncavo. As leituras foram efetuadas em um equipamento de difratômetro Rigaku Miniflex II, operado sob tensão de 30 kV, corrente de 10 mA e fonte de radiação CuKθ (θ = 1.5418 Å; 1 Å = 10<sup>-10</sup> m) e nas seguintes condições experimentais: intervalo de leitura de 3 a 50° 2θ, passo de 0,02° 2θ, velocidade de escaneamento de 1s/passos, fendas Soller de 5,5 e 2,5° e fenda divergente de 1mm

Os padrões de DRX foram estudados no software Match! 3.0 (Crystal Impact GbR®), para a identificação das fases presentes. Essa identificação se dá pela aplicação da lei de Bragg (eq. 1), que relaciona o ângulo onde máximos construtivos estão presentes difratados (na forma de picos distintos de energia) com o espaçamento atômico da estrutura das fases cristalinas (Hammond, 1997):

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (\text{Eq. 1}),$$

rescrita como

$$d = \frac{n\lambda}{\sin \theta}$$

$n$  = número inteiro de comprimentos de onda

$\lambda$  = comprimento de onda usado na difração, em Å

$\theta$  = ângulo de máximo da difração (detectado no máximo de cada pico)

$d$  = espaçamento atômico, em Å

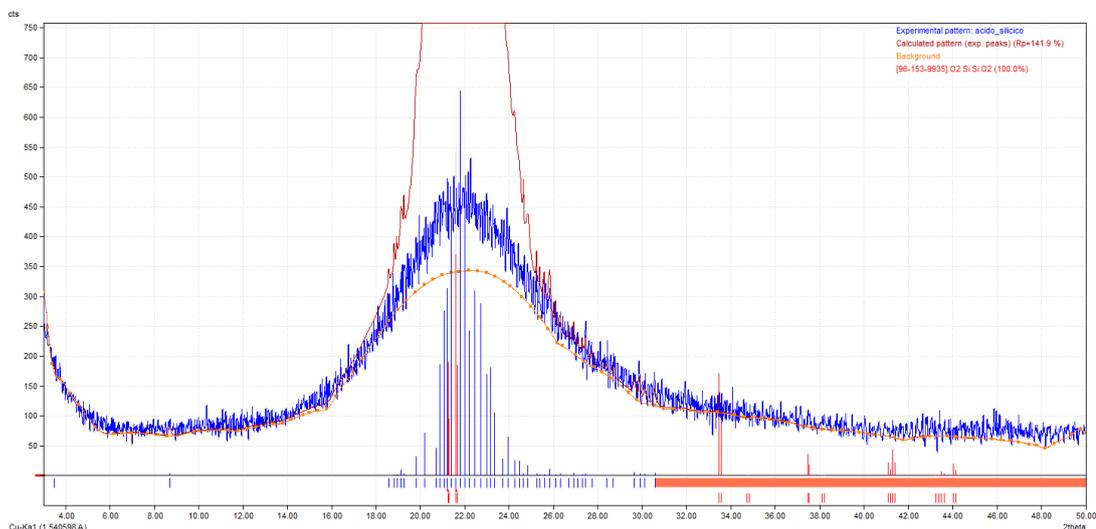


Figura 2: Padrão de DRX do ácido silícico. O eixo x corresponde à posição dos ângulos  $2\theta$ . O eixo y corresponde à intensidade em cps (contagens por segundo). A linha azul demonstra o padrão experimental, a linha laranja o padrão calculado de ajuste (desconsiderado neste trabalho) e a legenda superior (à direita) indica as fases identificadas. As barras vermelhas indicam os picos de algum polimorfo do  $\text{SiO}_2$  que coincidem com os picos do padrão (Linhares, 2020; dados não publicados).

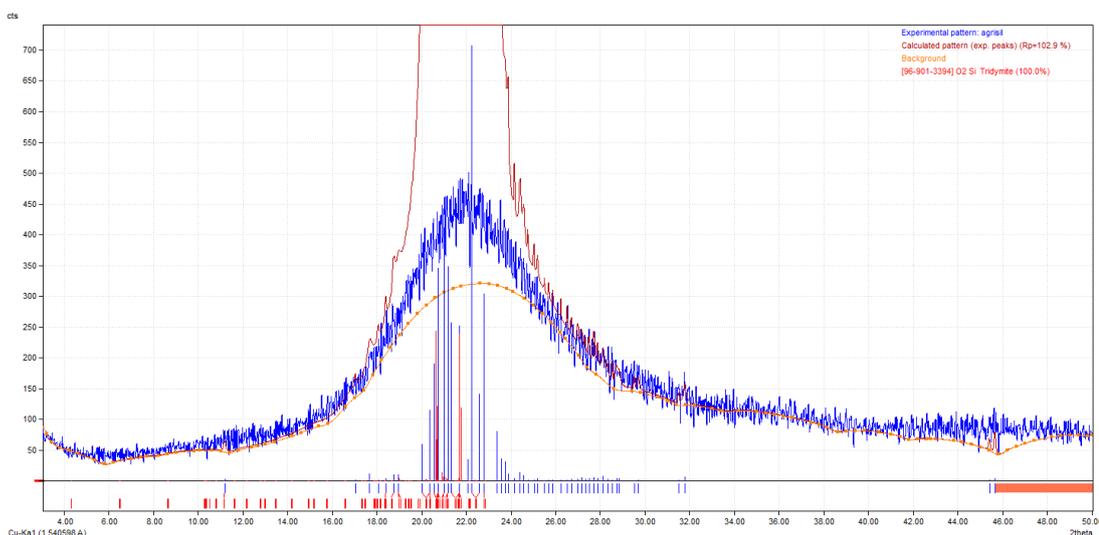


Figura 3: Padrão de DRX do produto Agrisil. O eixo x corresponde à posição dos ângulos  $2\theta$ . O eixo y corresponde à intensidade em cps (contagens por segundo). A linha azul demonstra o padrão experimental, a linha laranja o padrão calculado de ajuste (desconsiderado neste trabalho) e a legenda superior (à direita) indica as fases identificadas. As barras vermelhas ao longo do eixo x indicam os picos de tridymite que coincidem com os picos do padrão (Linhares, 2020; dados não publicados).

Aos 115, 136 e 162 dias após o início da aplicação dos tratamentos fontes e concentração de silício, foram avaliados os aspectos fisiológicos no terço médio da 4ª ou 5ª folha totalmente expandida, e contadas a partir do ápice das plantas. As mensurações foram realizadas no horário de 8:00 às 10:00 a.m, em um total de 48 plantas, sendo assim, determinadas as seguintes variáveis fisiológicas:

O teor de clorofila total nas folhas (TCT<sub>f</sub>) (intensidade verde das folhas - índice Spad) foi analisado por meio do medidor portátil de clorofila modelo SPAD – 502 “*Soil Plant Analyser Development*” (Minolta Company, Japan), onde coletaram-se cinco valores Spad, utilizando uma área mediana das folhas, obtendo-se, assim, a média do valor Spad, em unidades.

A taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> (A,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), a condutância estomática (gs,  $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), a transpiração (E,  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), a concentração intercelular de CO<sub>2</sub> (C<sub>i</sub>,  $\mu\text{mol.mol}^{-1}$ ) e temperatura foliar (T<sub>foliar</sub>, °C) foram determinadas através do analisador de gás portátil infravermelho (IRGA), modelo LCpro SD Portable Photosynthesis System® (ADC Biocientific Limited, UK), utilizou-se fonte de luz e concentração de CO<sub>2</sub> artificiais de 1.000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e 400  $\mu\text{L L}^{-1}$ , respectivamente.

A eficiência instantânea do uso da água (A/E,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}/\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), a eficiência intrínseca do uso da água (A/gs,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / \text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) e a eficiência instantânea da carboxilação (A/C<sub>i</sub>,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / \mu\text{mol.mol}^{-1}$ ), foram calculadas a partir da razão dos valores de A, E, gs e C<sub>i</sub>.

Logo após as avaliações das trocas gasosas, foi analisado o rendimento quântico máximo do fotossistema II (PSII) (F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>), a produção quântica basal dos processos não fotoquímicos no PSII (F<sub>0</sub>/F<sub>m</sub>), eficiência máxima do processo fotoquímico no PSII (F<sub>v</sub>/F<sub>0</sub>), e o índice fotossintético total (PIT), obtido por meio do fluorímetro Pocket PEA (Plant Efficiency Analyser, Hansatech, Inglaterra). Para esta análise, as folhas foram adaptadas ao escuro por 30 minutos com o auxílio de pinças. Nessas condições os centros de reação estavam completamente abertos com perda mínima de calor (Strasser et al., 2004). Passados os 30 minutos, um pulso forte de luz de 3.500  $\mu\text{mol}$  de fótons  $\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  foi aplicado por três diodos emissores de luz de 650 nm.

A absorção de Si foi estimada somente no período de 136 dias por meio dos teores e conteúdo de silício (Si) nas folhas e raízes. Além do Si, foi determinado

o nitrogênio (N) e polifenóis totais (PT). Para isto as folhas e raízes das plantas foram acondicionadas em papel tipo kraft e colocadas em estufa com circulação de ar forçada a  $65^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}$  por 72h para a determinação dos nutrientes. Após a secagem, as amostras foram trituradas em moinho tipo Wiley com peneira de 20 *mesh* e armazenadas em frascos hermeticamente fechados para realização das análises de Si, N e PT nas folhas (folha + pecíolo) e raízes.

Para a determinação do Si e N, foram pesados 0,100 g das folhas e raízes e moídas e colocados em tubos de ensaios para a determinação. O tubo utilizado para o Si é do tipo polipropileno com volume de 100 ml. A análise de Si consiste no método colorimétrico amarelo, por meio da oxidação da matéria orgânica, descrito por Korndörfer et al. (2004), por digestão em 3 mL de água oxigenada ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), acrescida de duas gotas de querosene filtrado para controlar a espuma, e adicionando 3 mL de hidróxido de sódio para melhorar a eficiência do oxidante  $\text{H}_2\text{O}_2$  e aumentar o pH para manter o Si do tecido vegetal.

O N foi determinado pelo método de Nessler (Jackson, 1965), após digestão em ácido sulfúrico, onde o N-amoniaco foi determinado no extrato. Para os PTs, foram pesados 0,375 g do material vegetal moído e determinados pelo método de Anderson e Ingram (1996). A leitura do Si, N e dos PTs nos extratos foi feita imediatamente após a adição dos reagentes, em espectrofotômetro Specord (analytikjena), no comprimento de onda de 410 nm, 480 nm e 760 nm, respectivamente.

Os dados foram submetidos à ANOVA para efeito de comparação dos tratamentos pelo software análises estatística "Sisvar 5.6". Para os dados quantitativos utilizou-se a análise de regressão com teste F significativo a 5% de probabilidade. Para os resultados das análises de regressão, foi aplicada a equação de regressão que melhor se ajustou à curva.

## RESULTADOS

Foi observada a interação significativa ( $p < 0.05$ ) entre o período de aplicação dos tratamentos e as concentrações de silício para as variáveis Tf ( $^{\circ}\text{C}$ ) e o TChIT (índice spad), a interação entre fonte e as concentrações de silício (Si) para gs, E, A/gs e PIT. Com relação às variáveis A, Ci, A/Ci, A/E,  $F_v/F_0$ ,  $F_0/F_m$  e  $F_v/F_m$  não houve interação significativa entre os tratamentos. Para o teor de silício (SiF), de

nitrogênio (NF) e conteúdo de Si nas folhas (SIF) e teor de Si-raiz (SiRa), N-raiz (NRa), polifenóis totais-raiz (PTRa) houve interação significativa entre as fontes e as concentrações de Si. Não houve interação significativa a 5% de probabilidade para os teores de polifenóis totais (PTF), conteúdo de N (NF) e polifenóis totais (PTF) nas folhas e conteúdo de Si-raiz (SiRa), N-raiz (NRa) e polifenóis totais-raiz (PTRa).

A Tf e o TChIT tiveram um comportamento linear crescente para o período de aplicação dos tratamentos de 115 dias, onde foi constatado um aumento de 7,01% na Tf na concentração de 4,20 g de Si, enquanto para o TChIT houve um incremento de 7,54% na concentração de 2,52 g de Si, quando as concentrações foram relacionadas ao controle (Figura 4a e 4b). Aos 136 dias, a Tf e o TChIT se mantiveram constantes, tendo em média, 38,36 °C e 50,62 unidades, respectivamente. Aos 162 dias houve novamente o aumento da Tf, em torno de 3,14%, e o decréscimo de 6,57% no TChIT na concentração de 4,20 g de Si.

A “A” não variou conforme o aumento das concentrações de Si ao longo do tempo, foi obtida a média das fontes e do tempo de aplicação dos tratamentos, mantendo, assim, a taxa fotossintética das plantas a média de 5,45  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Figura 5a). Característica similar foi observada para a fertilização das plantas com Agrisil nas diversas concentrações aplicadas para as variáveis *gs* e *E*, tendo em média 0,13  $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e 3,14  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , respectivamente. Em contrapartida, as plantas fertilizadas com o Ácido silícico expressaram uma resposta linear crescente para *gs* e *E*, em que, houve o incremento na condutância estomática de 14,29% e de 34,63% no processo de transpiração a partir da concentração de 2,52 g de Si quando comparados ao controle (Figura 5b, 5c).

De forma semelhante ao comportamento da taxa de assimilação de  $\text{CO}_2$  foram os valores observados para  $C_i$ , em que permaneceram os mesmos ao longo do tempo de aplicação das concentrações de Si, tendo o valor em média de 287,81  $\mu\text{mol.mol}^{-1}$ , instituindo que a assimilação de  $\text{CO}_2$  não foi limitada pela difusão de  $\text{CO}_2$  por meio da condutância estomática das plantas (Figura 6a). A mesma resposta foi verificada para a  $A/C_i$  e para a  $A/E$ , onde os variáveis tiveram, respectivamente, uma média de 0,02  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}(\mu\text{mol.mol}^{-1})^{-1}$  e 1,93  $\mu\text{mol CO}_2$  fixado ( $\text{mmol H}_2\text{O transpirada})^{-1}$  (Figura 6b, 6c). Para a  $A/g_s$ , as plantas fertilizadas com o Agrisil nas concentrações aplicadas diferiram ( $p \leq 0.05$ ) das plantas tratadas com o Ácido silícico, todavia, não houve diferença na análise de

regressão entre as concentrações para ambos os fertilizantes, tendo em média  $46,43 \mu\text{mol CO}_2 (\text{mol H}_2\text{O}^{-1})^{-1}$  para o Agrisil e  $41,08 \mu\text{mol CO}_2 (\text{mol H}_2\text{O}^{-1})^{-1}$  para o Ácido silícico (Figura 6d).

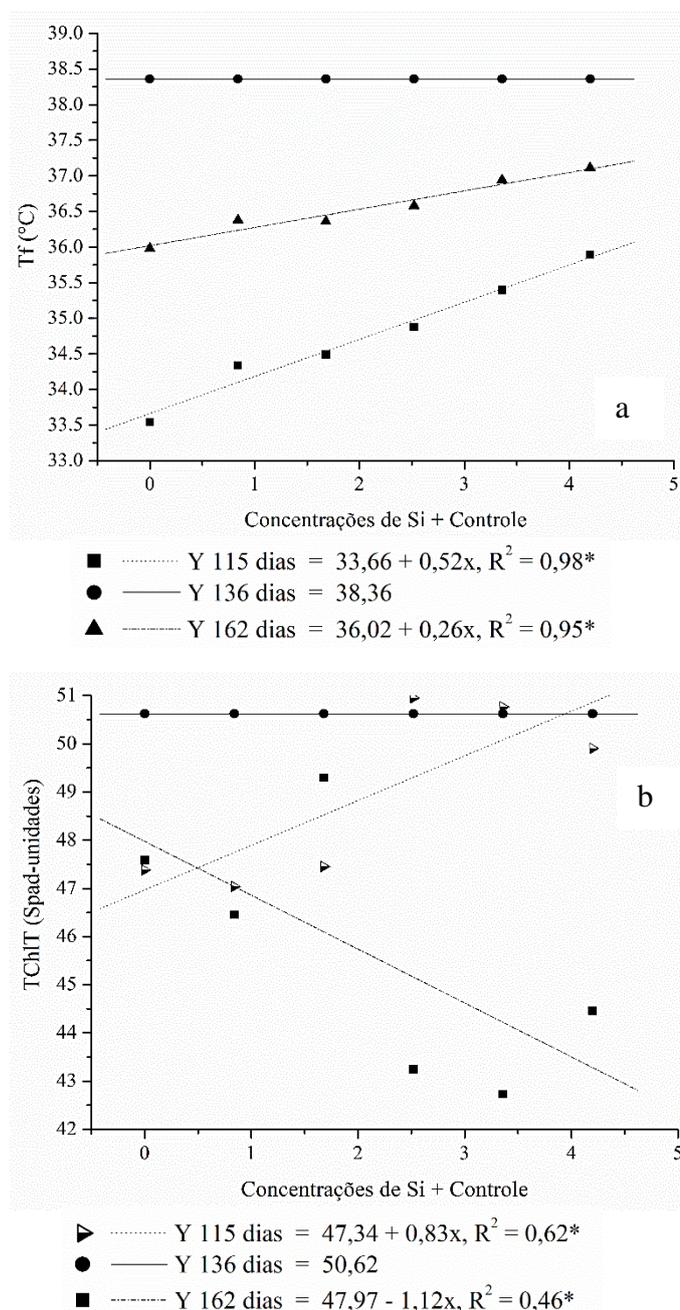


Figura 4: Temperatura foliar (T) [a] e o teor de clorofila total nas folhas – Spad (TChIT) (média das fontes de silício) [b] de maracujazeiro azedo em função das concentrações de silício aplicadas e do tempo de aplicação dos tratamentos, em dias, em plantas cultivadas em Hidroponia, casa de vegetação, após 165 dias semeadas. Obs: Regressão ( $\alpha = 0,05$ ) Concentrações de Si + Controle ( $\text{g dm}^{-3}$ ): 0 (sem aplicação de Si); 1 = 0,84 g; 2 = 1,68 g; 3 = 2,52 g; 4 = 3,36; 5 = 4,20 g.

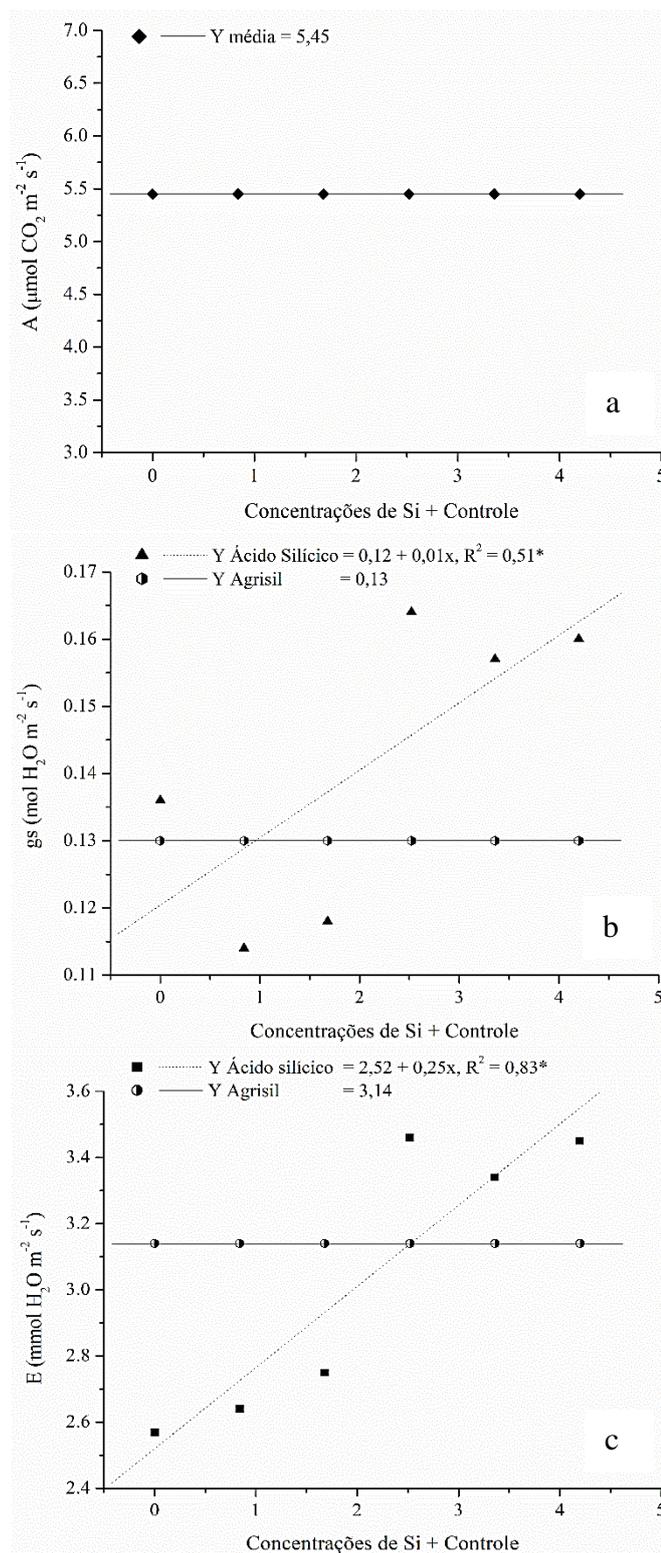


Figura 5: Taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> (A) (média das fontes de silício e do tempo de aplicação dos tratamentos) [a]; Condutância estomática (gs) [b] e Transpiração (E) [c] (média do tempo de aplicação dos tratamentos) de maracujazeiro azedo em função das doses de silício aplicadas em plantas cultivadas em Hidroponia, casa de vegetação, após 165 dias semeadas. Obs: Regressão ( $\alpha = 0,05$ ) Concentrações de Si + Controle (g dm<sup>-3</sup>): 0 (sem aplicação de Si); 1 = 0,84 g; 2 = 1,68 g; 3 = 2,52 g; 4 = 3,36; 5 = 4,20 g.

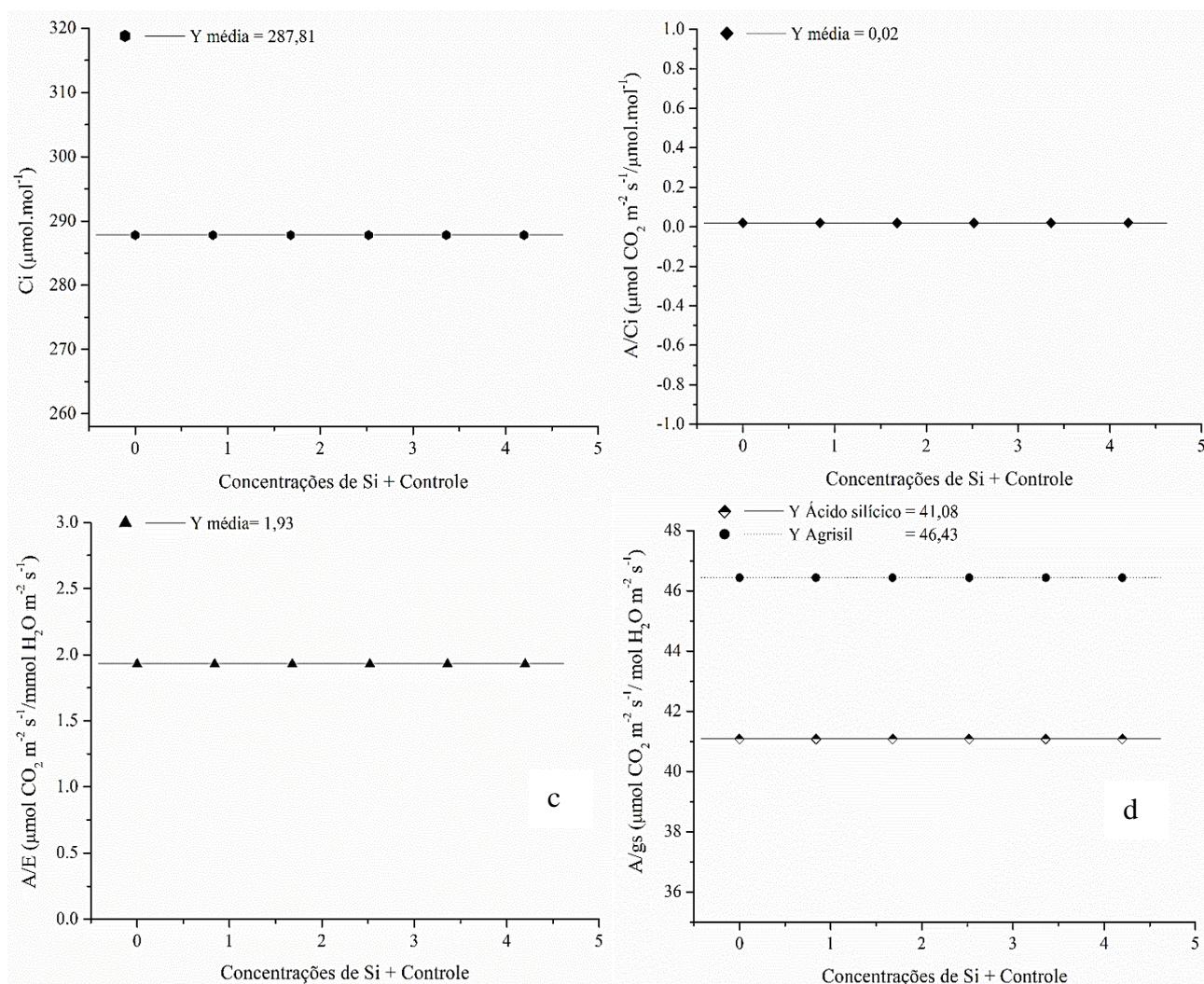


Figura 6: Concentração intercelular de CO<sub>2</sub> (Ci) [a], Eficiência instantânea da Carboxilação (A/Ci) [b], Eficiência instantânea do uso da água (A/E) (média das fontes de silício e do tempo de aplicação dos tratamentos) [c]; Eficiência intrínseca do uso da água (A/gs) (média do tempo de aplicação dos tratamentos) [d] de maracujazeiro azedo em função das doses de silício aplicadas em plantas cultivadas em Hidroponia, casa de vegetação, após 165 dias semeadas. Obs: Regressão ( $\alpha = 0,05$ ) Concentrações de Si + Controle ( $\text{g dm}^{-3}$ ): 0 (sem aplicação de Si); 1 = 0,84 g; 2 = 1,68 g; 3 = 2,52 g; 4 = 3,36; 5 = 4,20 g.

Em relação à variável de fluorescência da clorofila constatou-se que, o  $F_v/F_0$ ,  $F_0/F_m$  e  $F_v/F_m$  tiveram o mesmo comportamento entre as concentrações e as fontes de Si, isto é, foram obtidas as médias das fontes e do tempo de aplicação dos tratamentos, de 3,69; 0,22 e 0,78, respectivamente (Figura 7a, 7b e 7c). As variáveis  $F_v/F_0$  e  $F_v/F_m$  mantiveram-se dentro dos valores normais sugeridos para essas relações de fluorescência, valores esses preconizados entre 4 e 6 e 0,75 e 0,85, respectivamente (Zanandrea et al., 2006; Stirbet e Govindjee, 2011), com

exceção para a variável  $F_0/F_m$ , em que o valor da média ficou acima dos valores considerados ideais, entre 0,14 e 0,20 elétrons quantum<sup>-1</sup> (Roháček, 2002), indicando por essa relação que as plantas de maracujazeiro azedo poderiam estar sob estresse causado pelo efeito da temperatura ambiente.

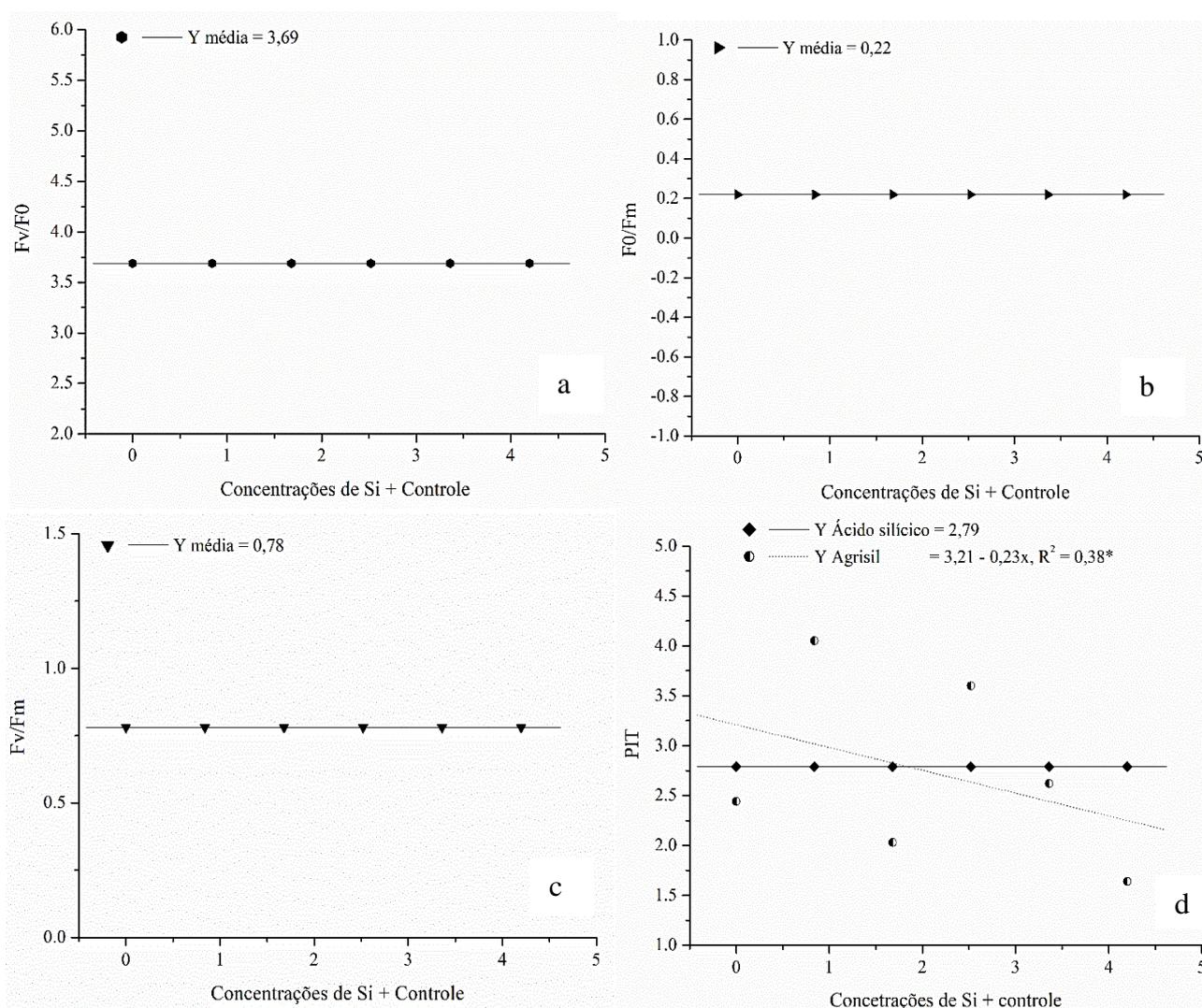


Figura 7: Eficiência máxima do processo fotoquímico no PSII ( $F_v/F_0$ ) [A], Produção quântica basal dos processos não fotoquímicos no PSII ( $F_0/F_m$ ) [B], Rendimento quântico máximo do PSII ( $F_v/F_m$ ) (média das fontes de silício e do tempo de aplicação dos tratamentos) [C]; e o Índice fotossintético total (PIT) (média do tempo de aplicação dos tratamentos) [D] de maracujazeiro azedo em função das doses de silício aplicadas em plantas cultivadas em Hidroponia, casa de vegetação, após 165 dias semeadas. Obs: Regressão ( $\alpha = 0,05$ ) Concentrações de Si + Controle (g dm<sup>-3</sup>): 0 (sem aplicação de Si); 1 = 0,84 g; 2 = 1,68 g; 3 = 2,52 g; 4 = 3,36; 5 = 4,20 g.

É possível verificar maior sensibilidade na variável PIT na figura 7d em relação ao  $F_v/F_m$  (Figura 7c), onde a resposta das plantas fertilizadas com o Ácido Silícico foi semelhante entre as concentrações de Si, sendo a média obtida por essas plantas de 2,79. As plantas fertilizadas com Agrisil tiveram decréscimo de 32,51% no índice de desempenho da energia de conservação dos fótons absorvidos na concentração de 4,20 g de Si em comparação ao controle, em contrapartida, a concentração de 0,84 g de Si manteve o desempenho fotossintético em 66,67%.

Os modelos matemáticos das equações respostas dos teores e conteúdo dos nutrientes das plantas de maracujazeiro azedo descrevem as respostas das variáveis em questão e as concentrações de Si (Tabela 4). A resposta para o teor de SiF das plantas fertilizadas tanto com o Ácido silícico quanto com o Agrisil foi uma regressão quadrática, onde as plantas fertilizadas com o Ácido silícico obtiveram valores máximos estimados de 2,93 g kg<sup>-1</sup> de Si foliar em uma concentração de 3,13 g de Si. A partir da concentração de 1,68 g de Si houve um incremento de 11% no teor de SiF nas plantas fertilizadas com esse produto. Ao passo que, as plantas cultivadas com o Agrisil alcançaram valores mínimos estimados de 0,66 g kg<sup>-1</sup> de Si foliar, em 2,32 g de Si (Tabela 4). No entanto, para o Agrisil somente houve incrementos de 17% no teor de SiF a partir da concentração de 3,36 g de Si.

Em relação ao teor de NF, as plantas cultivadas com o Ácido silícico não foram influenciadas pelas diferentes concentrações no meio, onde tiveram em média a produção de 39,58 g kg<sup>-1</sup> de N foliar. Em contrapartida as plantas fertilizadas com o Agrisil tiveram uma regressão quadrática, adquirindo-se valores mínimos estimados de 38,13 g kg<sup>-1</sup>, em 2,56 g de Si. Para o teor de PTF, as concentrações de Si e as fontes aplicadas não influenciaram na produção desse composto, tendo assim uma média de 15,35 g kg<sup>-1</sup> para as plantas cultivadas com Ácido silícico, e 15,38 g kg<sup>-1</sup> para as fertilizadas com o Agrisil (Tabela 4).

Na tabela 4 observa-se, ainda, os teores de SiRa, de NRa e PTRa, onde para as plantas cultivadas com o Ácido silícico não houve diferença entre as concentrações para os teores de SiRa, tendo em média 3,55 g kg<sup>-1</sup>. As plantas fertilizadas com o Agrisil expressaram uma regressão quadrática, obtendo-se valores mínimos estimados de 1,02 g kg<sup>-1</sup> de Si na raiz, em uma concentração de 2,40 g de Si. Para os teores de NRa, as plantas fertilizadas com o Ácido silícico

também evidenciaram uma resposta quadrática, sendo o valor máximo obtido em 19,56 g kg<sup>-1</sup>, em 2,56 g de Si. Não houve diferença entre as concentrações aplicadas nas plantas cultivadas com o Agrisil, obtendo-se média em torno de 29,69 g kg<sup>-1</sup> na produção de NRa. Para os teores de PTRa, tanto nas plantas fertilizadas com o Ácido silícico quanto nas com o Agrisil foi observada regressão linear crescente, onde para o Ácido silícico houve incrementos de 29% na quantidade de PTRa a partir da concentração de 2,52 g de Si e para o Agrisil aumentos de 36,15% e 12% nos teores de PTRa, nas concentrações de 0,84 g e 1,68 g de Si, respectivamente. As maiores concentrações de Si do Agrisil mostraram reduções de 18% nos teores de PTRa a partir da concentração de 2,52 g.

Tabela 4: Regressão polinomial para teor e conteúdo de silício na folha (SiF) e na raiz (SiRa), de nitrogênio na folha (NF) e na raiz (NRa) e polifenóis totais nas folhas (PTF) e na raiz (PTRa) na matéria seca total de maracujazeiro azedo em função das doses de silício aplicadas em plantas cultivadas em Hidroponia, casa de vegetação, após 165 dias semeadas, Campos dos Goytacazes-RJ. 2020.

Teor de nutrientes	Fontes	Regressão polinomial	R <sup>2</sup>
SiF (g kg <sup>-1</sup> )	Ácido silícico	$Y = 2,70 + 0,293x - 0,05x^2$	0,61*
	Agrisil	$Y = 2,35 - 0,093x + 0,07x^2$	0,76*
SiRa (g kg <sup>-1</sup> )	Ácido silícico	Y = 3,55	-
	Agrisil	$Y = 2,49 - 0,184x + 0,090x^2$	0,80*
NF (g kg <sup>-1</sup> )	Ácido silícico	Y = 39,58	-
	Agrisil	$Y = 42,55 - 3,450x + 0,673x^2$	0,66*
NRa (g kg <sup>-1</sup> )	Ácido silícico	$Y = 29,31 - 7,632x + 1,493x^2$	0,44*
	Agrisil	Y = 29,69	-
PTF (g kg <sup>-1</sup> )	Média Ácido silícico	Y = 15,35	-
	Média Agrisil	Y = 15,38	-
PTRa (g kg <sup>-1</sup> )	Ácido silícico	$Y = 2,78 + 0,170x$	0,33*
	Agrisil	$Y = 2,49 - 0,151x$	0,32*

Conteúdo de nutrientes	Fontes	Regressão polinomial	R <sup>2</sup>
SIF (mg g <sup>-1</sup> )	Ácido silícico	Y = 11,79	-
	Agrisil	$Y = 10,10 + 0,140x + 0,297x^2$	0,93*
SIRa (mg g <sup>-1</sup> )	Média Ácido silícico	Y = 4,37	-
	Média Agrisil	Y = 3,40	-
NF (mg g <sup>-1</sup> )	Média Ácido silícico	Y = 152,88	-
	Média Agrisil	Y = 186,29	-
NRa (mg g <sup>-1</sup> )	Média Ácido silícico	Y = 28,81	-
	Média Agrisil	Y = 36,66	-
PTF (mg g <sup>-1</sup> )	Média Ácido silícico	Y = 61,57	-
	Média Agrisil	Y = 72,77	-
PTRa (mg g <sup>-1</sup> )	Média Ácido silícico	Y = 2,75	-
	Média Agrisil	Y = 3,96	-

Em relação ao conteúdo foliar houve regressão quadrática para o SIF nas plantas fertilizadas com o Agrisil, adquirindo-se valores mínimos estimados de 10,08 mg g<sup>-1</sup>, em 0,24 g de Si, com aumento de 22% no conteúdo de SIF a partir da concentração de 2,52 g de Si. Para o Ácido silícico não houve diferença entre as concentrações, tendo em média 11,79 mg g<sup>-1</sup> para o conteúdo de SIF (Tabela 4). Quanto aos conteúdos de NF e PTF não houve regressão, obtendo-se, assim, as médias das concentrações de Si e das fontes aplicadas, as plantas fertilizadas com o Ácido silícico alcançaram valores médios, respectivamente, de 152,88 mg g<sup>-1</sup> e de 61,57 mg g<sup>-1</sup>; e para o Agrisil foram obtidos valores de 186,29 mg g<sup>-1</sup> e de 72,77 mg g<sup>-1</sup>. A mesma resposta foi verificada para o conteúdo nas raízes, onde o SiRa, o NRa e o PTRa para o fertilizante Ácido silícico apresentaram médias, respectivamente de 4,37 mg g<sup>-1</sup>; 28,81 mg g<sup>-1</sup> e 2,75 mg g<sup>-1</sup>, enquanto o Agrisil obteve médias de 3,40 mg g<sup>-1</sup>; 36,66 mg g<sup>-1</sup> e 3,96 mg g<sup>-1</sup>.

## DISCUSSÃO

As respostas observadas pelas plantas de maracujazeiro azedo, principalmente pelas fertilizadas nas concentrações de 2,52; 3,36 e 4,20 g de Si, em relação ao aumento da Tf, foi que os processos fisiológicos se tornaram mais sensíveis ao calor, devido ao acúmulo de temperatura a partir de 136 dias, causando sensibilidade na membrana dos tilacoides e, conseqüentemente, a redução da produção de clorofila nas folhas de maracujazeiro azedo como pode ser observado na figura 3b aos 162 dias. O Si contido nessas concentrações não proporcionou o efeito de proteção ao mecanismo fotossintético, como é de praxe desse elemento, uma vez que o silício é depositado na parte aérea por meio da transpiração, em forma de sílica biogênica na epiderme, estômatos, tricomas e na cutícula foliar, proporcionando proteção e amenização dos efeitos de estresses, principalmente abiótico (Ahmed et al., 2013). A restrição na absorção da forma disponível do Si pode estar associada segundo Marschner (2012), à polimerização do ácido mono silícico (H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>), pois o silício em concentrações mais altas em soluções aquosas, isto é, acima de 56 mg Si L<sup>-1</sup>, indica supersaturação ou parcial polimerização do ácido mono silícico.

O estresse pelas as altas temperaturas no ambiente da casa de vegetação, pode ter causado nas plantas de maracujazeiro azedo, fertilizadas a partir da concentração de 2,52 g de Si, a baixa acumulação de clorofila no mesófilo foliar, devido à inibição da síntese de clorofila ter sido prejudicada pela destruição de inúmeras enzimas envolvidas no mecanismo de biossíntese, ou aceleração da degradação da membrana dos tilacoides por espécies reativas de oxigênio ou a combinação de ambos os processos. Em respostas do estresse por altas temperaturas (38/28°C) em plantas de soja, observaram-se decréscimos de 18% no teor total de clorofila, 7% no teor de clorofila 'a' e 3% na relação entre clorofila a/b por Mathur et al. (2014).

Em relação à taxa de assimilação de CO<sub>2</sub>, condutância estomática e transpiração, resultado semelhante foi obtido por Costa et al. (2018), utilizando as concentrações de 0; 0,28; 0,55 e 0,83 g de Si vaso<sup>-1</sup> em forma de solução de ácido silícico (SiO<sub>2</sub>.XH<sub>2</sub>O) a 1% em plantas de maracujazeiro azedo. Os autores observaram que as análises fisiológicas, como a *A*, *g<sub>s</sub>* e *E* aumentaram a partir da concentração de 0,28 g de Si vaso<sup>-1</sup>. A *A* teve acréscimos em 48,82% em 0,28 g de Si, 43,25% em 0,55 g de Si e 39,30% em 0,83 g de Si quando comparadas ao controle. Para a variável *C<sub>i</sub>* não houve diferença entre as concentrações de Si aplicadas. Corroborando os resultados obtidos por este trabalho que a limitação fotossintética nas maiores concentrações de Si, a partir da concentração de 2,52 g, não foi causada pela limitação de CO<sub>2</sub>.

As plantas fertilizadas com o Ácido silícico foram mais eficientes no uso da água quando comparadas às tratadas com Agrisil, devido à condutância estomática e à transpiração serem menores nas concentrações de 0,84 e 1,68 g de Si quando comparadas às concentrações de 2,52; 3,36 e 4,20 g de Si e ao controle, maximizando o uso intrínseco da água das plantas fertilizadas com Ácido silícico. A *A/C<sub>i</sub>* indica a eficiência instantânea de carboxilação da enzima Ribulose 1,5 bisfosfato (Rubisco), como o valor de *C<sub>i</sub>* não foi limitante para as folhas do maracujazeiro azedo, a baixa assimilação de CO<sub>2</sub> pelas plantas nas concentrações de 2,52; 3,36 e 4,20g de Si pode ser devido à atividade da Rubisco ser limitada nos cloroplastos das plantas, pela redução do teor de clorofila nessas concentrações pelo aumento da temperatura (Figura 3).

A inclusão do Si na fertilização de algumas espécies monocotiledônea, como o arroz, e em dicotiledôneas, como pepino, tem sido associada de forma

significativa no aumento do crescimento, da atividade fotossintética, da área foliar, no teor de clorofila, no melhoramento da estrutura dos cloroplastos quando as plantas são submetidas a estresse salino (Liang et al., 2015). A resposta do maracujazeiro azedo à fertilização com o Si foi satisfatória, principalmente em relação às variáveis *gs*, *E* e o TChIT, nas concentrações de 0,84 e 1,68 g de Si quando comparadas ao controle, mostrando que o efeito benéfico do Si é mais eficiente em menores concentrações, favorecendo o aumento das trocas gasosas e a eficiência do mecanismo de defesa da cultura do maracujazeiro azedo. Fawer et al (1998) demonstram que o Si atua estimulando os mecanismos de defesa das plantas, especialmente os derivados fenólicos como as fitoalexinas. Há estudos, como os de Yin et al. (2014), Wang et al. (2015) e Yin et al. (2016) sobre o papel regulador do Si nos níveis de poliaminas em plantas sob estresse salino. Estudos prévios mostram que o silício e as poliaminas podem ser aliviadores de danos oxidativos no mecanismo fotossintético sob estresse (Puyang et al., 2015; Yin et al., 2016).

De acordo com Yin et al. (2019), os efeitos observados nas menores concentrações de Si (0,84 e 1,68 g) podem ser decorrentes da interação entre o Si e as poliaminas no mecanismo de defesa das plantas de maracujazeiro azedo. O Si induz a acumulação de poliaminas em plantas de pepino, onde esse acúmulo pode mitigar decréscimos aos danos oxidativos e, portanto, aumentar a tolerância dessas plantas ao estresse. Isso pode estar relacionando principalmente à manutenção da síntese e estrutura da clorofila nas concentrações de Si aplicadas no maracujazeiro azedo aos 162 dias, pois as concentrações de 0,84 e 1,68 g de Si foram mais eficientes na manutenção do mecanismo da clorofila, em 7,40% e 14%, respectivamente, do que as concentrações a partir de 2,52 g de Si (Figura 3).

Como demonstra o trabalho de Yin et al. (2016) em estudo sobre a indução mediada pelo Si nas poliaminas em sorgo submetido a estresse salino, a aplicação de Si na concentração de 0,83 mM manteve a concentração de clorofila das folhas e aumentou a concentração total de poliaminas. Os autores sugerem que a acumulação em níveis altos de poliaminas sob a indução do Si pode ser benéfico no tratamento do estresse salino, pois, ambos o Si e as poliaminas desempenham o papel de eliminadores de radicais livres, como as EROs, e são ativadores de enzimas antioxidantes em plantas sob estresse.

Diante dos resultados obtidos em  $F_v/F_m$ , as fontes de Si nas suas diferentes concentrações não afetaram o PSII, tendo em vista que os valores encontrados para essa variável ficaram entre 0,75 e 0,85 indicando, de acordo com Bolhàr-Nordenkampf et al. (1989), o funcionamento adequado do PSII, ou seja, quando o tecido das plantas é iluminado com uma luz forte, os elétrons que são produzidos no processo fotoquímico da fotossíntese estão sendo reduzidos de 75-85% pelo acceptor quinona A ( $Q_a$ ). Porém, nem sempre a variável  $F_v/F_m$  é suficiente para identificar diferenças entre tratamentos experimentais (Stirbet e Govindjee, 2011), concordando com os resultados obtidos nesse trabalho, em que, a relação  $F_v/F_m$  não apresentou diferenças significativas entre as concentrações de Si utilizadas, tendo em vista que as concentrações de Si não afetaram o PSII, indicando o bom funcionamento deste fotossistema.

Nesse sentido, tem sido utilizado o PIT, que é o índice que apresenta maior sensibilidade para detectar estresses, pois depende da densidade de centros de reação e da eficiência no transporte de elétrons (Strasser et al. 2004; Stirbet e Govindjee, 2011). Pode-se evidenciar esse fato correlacionando os gráficos do TChIT e PIT, em que há o decréscimo do teor de clorofila e redução do índice de desempenho fotossintético nas maiores doses de Si, 3,36 e 4,20 g, isso relacionado ao aumento da temperatura a partir dos 136 dias (Figura 3a). Quando as plantas estão expostas a altas temperaturas, estas reduzem a biossíntese de clorofila, e o espectro da emissão da fluorescência é tomado como uma mensuração da quantidade do teor de clorofila (Mathur et al., 2014).

Pode-se observar, ainda, aumento nos processos não fotoquímicos pela variável  $F_0/F_m$ , indicando a produção de fotoinibição na fase fotoquímica da fotossíntese, devido a esse processo, as concentrações de Si de 3,36 e 4,20 g não distinguiram aumentos na fotossíntese líquida das plantas (Figura 4a), pois a assimilação de  $CO_2$  manteve-se constante em todas as concentrações, mostrando limitação fotossintética nas maiores concentrações de Si, em razão à baixa atividade da Rubisco. Segundo Misra et al (2012), a emissão da fluorescência da clorofila é um resultado líquido da dissipação em forma de calor, a estimulação da redução da plastoquinona no escuro, e o aumento do fluxo cíclico de elétrons pela luz, e o aumento do vazamento de elétrons pelos tilacoides, causando a desativação da Rubisco (ribulose 1,5 bifosfatocarboxilase-oxigenase), e a geração

de espécies reativas de oxigênio como o ânion superóxido ( $O_2^-$ ) e peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ).

O impacto da temperatura nas folhas de maracujazeiro azedo pode ter sido minimizado nas menores concentrações de Si (0,84 e 1,68 g), pois, segundo Yin et al. (2014) o Si minimiza os danos oxidativos induzidos por estresse, aumentando a capacidade antioxidante enzimática e não enzimática, aprimorando as atividades de enzimas como a Ribulose bifosfato carboxilase e dependentes de  $NADP^+$  gliceroldeído-3-fosfato desidrogenase. O efeito do Si no  $F_v/F_m$  foi observado em plantas de pepino sob estresse salino por Yin et al. (2019), que utilizaram as concentrações de 0,3mM de Si, 75mM NaCl a combinação entre Na+Si, e a junção entre 75mM NaCl + 0.3mM Si, e analisaram o efeito do Si no crescimento e no metabolismo da poliamina. Os autores verificaram que as plantas de pepino tratadas com Si e a combinação Na+Si tiveram altos índices em  $F_v/F_m$ , resultando na diminuição do estresse salino nas plantas quando relacionado ao tratamento que só continha  $Na^+$  (75mM NaCl), e no aumento da concentração total de poliaminas.

Respostas positivas foram verificadas na deposição de Si foliar nas plantas de maracujazeiro azedo pelos teores e conteúdo de SiF observados na tabela 4. A absorção do ácido silícico foi mais rápida, o que é condizente com a composição e o grau de pureza desse fertilizante (Linhares et al., 2020; dados não publicados). Esse produto atingiu o máximo de absorção em 3,13 g de Si, posterior a isso, a absorção do elemento Si nesse fertilizante foi decaindo na maior concentração de Si aplicada (4,20 g). Já a absorção do Si fornecido pelo Agrisil foi mais lenta, isto pode ser característico de um material de rochas vulcânicas ácidas, por estar associado ao mineral tridimita (Linhares et al., 2020; dados não publicados). As plantas fertilizadas com o Agrisil atingiram o máximo de absorção de Si em 2,32 g, e continuaram absorvendo o Si nas maiores concentrações de 3,36 e 4,20 g de Si, comprovando que a disponibilidade de Si por esse produto é em longo prazo.

Em relação ao Si absorvido, houve maior acúmulo de Si na raiz (SiRa) do que nas folhas (SiF) das plantas quando relacionados aos teores desse elemento de ambos os fertilizantes, comprovando que as raízes dessa espécie podem ser consideradas acumuladoras intermediárias (Costa et al., 2016). O conteúdo de Si foliar (SiF) foi 4,5% maior nas plantas fertilizadas com o Agrisil em relação às plantas tratadas com o Ácido silícico quando comparamos a média das

concentrações. Tanto as plantas fertilizadas com o Ácido silícico como as com o Agrisil tiveram seus tecidos foliares revestidos com 0,12% do Si absorvido. O Si absorvido por essas plantas pode ser translocado no xilema, polimerizado e depositado na forma de fitólitos, ou associando-se a compostos orgânicos como proteínas, polissacarídeos e lignina, conferindo proteção às plantas de maracujazeiro azedo e amenizando os efeitos de estresses de natureza abiótica, neste caso, das altas temperaturas observadas no ambiente de casa de vegetação (Marchner, 2012; Nascimento et al., 2019). É possível, ainda, que dois mecanismos gerais de absorção, seja passiva e ativa, possam coexistir em uma mesma espécie de planta, no entanto, a absorção e translocação de Si depende da espécie em estudo e da concentração de Si na solução externa. No caso do maracujazeiro azedo esses mecanismos de absorção e translocação do Si precisam ser melhor elucidados.

A aplicação de Si e suas fontes causaram efeitos nos teores de N foliar (NF) e N radicular (NRa), o teor desse macronutriente nas folhas não foi influenciado pelo Si disponibilizado do Ácido silícico, diferente do teor de N nas raízes, que foi maior nas menores concentrações de Si (0,84 e 1,68g). Com a aplicação do Agrisil, o teor de N foliar aumentou também com a absorção de Si nas menores concentrações. A mesma resposta encontrada nos teores de N foliar foi observada para o teor de N na raiz das plantas cultivadas com o Agrisil. Os teores de PT nas folhas (PTF) não foram influenciados pelas fontes e concentrações de Si, mas os teores de PT nas raízes (PTRa) aumentaram conforme a quantidade de Si no meio, em ambos os fertilizantes. A quantidade de PTRa das plantas cultivadas com o ácido silícico foi 44% superior à das plantas fertilizadas com o Agrisil. Com a aplicação de Si maiores rendimentos em culturas agrícolas podem estar relacionados ao efeito sinérgico desse nutriente com os outros elementos da planta, especialmente o N, o qual faz parte da molécula de clorofila e, conseqüentemente, melhora a atividade fotossintética das plantas (Ullah et al., 2018). Além disso, a fertilização com Si promove a produção de compostos fenólicos, como as fitoalexinas, que são isoflavonoides acumulados em respostas ao estresse, ativa os mecanismos de defesa das plantas, principalmente relacionados ao processo infecção causada por bactérias, fungos ou algum efeito tóxico provocado na planta (Ma e Yamaji, 2008).

Quanto aos conteúdos de N e de PT foliar e N e PT na raiz, as maiores médias foram obtidas nas plantas fertilizadas com o Agrisil, com exceção do conteúdo de Si na raiz, onde as maiores médias foram obtidas nas plantas tratadas com o Ácido silícico, tendo as plantas absorvido 28% mais de Si do que as cultivadas com o Agrisil. Ao observar os resultados do conteúdo de Si na raiz no estudo de Linhares (2019), verifica-se que dos 43,48% do Si absorvido fica retido nas raízes das plantas de maracujazeiro azedo, enquanto 56,52% é translocado para a parte aérea (Folha + caule). De fato, espécies que podem acumular Si em quantidades consideráveis podem melhorar a qualidade e longevidade das raízes, parte aérea e de seus frutos (Liang et al., 2005). Essa qualidade em acumular Si nas raízes pelas plantas de maracujazeiro azedo é de suma importância, principalmente, quando relacionamos a proteção que esse elemento pode conferir a pragas e doenças de solo que atingem essa cultura.

Para as duas fontes analisadas, as plantas foram eficientes em absorver o Si fornecido e translocá-lo das raízes para as folhas até os 136 dias de aplicação. Tanto nas análises foliares como nas radiculares, o teor de Si nas plantas fertilizadas com Ácido silícico foi maior a partir da concentração de 1,68 g, já as plantas cultivadas com o Agrisil, o teor de Si foi maior a partir da concentração de 2,52 g. Os atributos mineralógicos dos fertilizantes explicam parcialmente a disponibilidade do Si no substrato (Figura 2 e 3), o Si presente nos polimorfos de SiO<sub>2</sub> no ácido silícico sugere maior capacidade de dissolução, mesmo em pH da solução de 5,4. O baixo ordenamento estrutural observado no padrão de DRX é um atributo fundamental do fertilizante que deve estar ligado à sua superfície específica, o que facilita a sua dissolução na solução do substrato. Para o Si presente nos polimorfos de SiO<sub>2</sub> no Agrisil, deduz-se que a dissolução na solução pode ser mais lenta e necessita de maiores quantidades para suprir as necessidades de Si nas plantas. Essa característica pode estar associada à presença de uma fase de baixa cristalinidade e a materiais amorfos (sólidos não cristalinos) no fertilizante.

Infere-se, que a amenização do estresse moderado causado pela temperatura nas folhas de maracujazeiro azedo devido ao acúmulo do Si ao longo do tempo, principalmente, nas menores concentrações, pode ter ocorrido, pois ambos os fertilizantes utilizados no experimento disponibilizaram a forma disponível de Si (H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>) para as plantas, mas em proporções e tempos diferentes. A

absorção de Si vai depender da habilidade específica das raízes de maracujazeiro azedo em absorver esse elemento. A absorção passiva e ativa do Si solúvel é mediado por transportadores envolvidos no transporte radial do nutriente nas raízes. Estudos fisiológicos em plantas de arroz mostram que a absorção do Si pelas raízes dessas monocotiledôneas são metabolicamente ativos, mediados por transportadores gênicos, que é muito mais rápido do que a absorção de água e não é afetado pela transpiração (Liang et al., 2015).

## CONCLUSÃO

1. As concentrações de 0,84; 1,68 g e 2,52 g de Si dm<sup>-3</sup> promovem aumentos na fotossíntese, condutância e transpiração, bem como a proteção do mecanismo da fluorescência da clorofila.
2. Os fertilizantes Ácido Silício e Agrisil atuam de forma semelhante na disponibilização de Si, em sua forma disponível H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>, no entanto, essa liberação ocorre em proporções e tempos distintos. A melhor resposta para o Ácido silícico foi na concentração de 1,68 g de Si dm<sup>-3</sup> e para o Agrisil na concentração a partir da 2,52 g de Si dm<sup>-3</sup>.
3. Os resultados deste trabalho permitem dizer que as plantas de maracujazeiro azedo são capazes de absorver e translocar silício, aos 136 dias após a aplicação dos fertilizantes silicatados utilizados.
4. A introdução da fertilização com o Si nas plantas de maracujazeiro azedo favorece a proteção do mecanismo fotossintético dessas plantas, o que é benéfico em situações quando as plantas são expostas a algum tipo de estresse, como o de altas temperaturas.

## AGRADECIMENTOS

A autora agradece o apoio financeiro fornecido à pesquisa e pela concessão de bolsa de doutorado ao órgão de fomento Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoas de Nível Superior (CAPES) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo financiamento da pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, M., Kamran, A., Asif, M., Qadeer, U., Ahmed, Z. I., Goyal, A. Silicon priming: a potential source to impart abiotic stress tolerance in wheat: A review. *Australian Journal of Crop Science*, 7:4, 484-481, 2013.
- Ahmed, M., Hasanuzzaman, M., Raza, M.A., Malik, A., Ahmad, S. Plant Nutrients for Crop Growth, Development and Stress Tolerance. In: Roychowdhury, R., Choudhury, S., Hasanuzzaman, M., Srivastava, S. (eds) Sustainable Agriculture in the Era of Climate Change. *Springer*, Cham., p. 43-92, 2020. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-45669-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-45669-6_3)
- Anderson, J.D., Ingram, J.S.I. *Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods*. 2.ed. Wallingford, CAB International, 1996, 171p.
- Bernacci, L.C., Cervi, A.C., Milward-de-Azevedo, M.A., Nunes, T.S., Imig, D.C.; Mezzonato, A.C. *Passifloraceae*. In: Lista de Espécies da Flora do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/jabot/floradobrasil/FB12506>>. Acesso em: 14 de maio de 2020.
- Bolhar-Nordenkamp, H. R., Long, S. P., Baker, N. R., Oquist, G., Schreiber, U. L. E. G., Lechner, E. G. Chlorophyll fluorescence as a probe of the photosynthetic competence of leaves in the field: a review of current instrumentation. *Functional Ecology*, 3(4), 497-514, 1989. DOI: 10.2307/2389624.
- Costa, B. N. S., Dias, G. M. G., Costa, I. J. S., Assis, F. A., Silveira, F. A., Pasqual, M. Effects of silicon on the growth and genetic stability of passion fruit. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 38(4), 503-511, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v38i4.30939>
- Costa, B. N. S., Costa, I. J. S., Dias, G. M. G., Assis, F. A., Pio, L. A. S., Soares, J. D. R., Pasqual, M. Morpho-anatomical and physiological alterations of passion fruit fertilized with silicone. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 53(2), 163-171 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018000200004>
- Dias, T. J., Cavalcante, L. F., Freire, J. L. O., do Nascimento, J. A., Beckmann-Cavalcante, M. Z., Santos, G. P. Qualidade química de frutos do maracujazeiro-amarelo em solo com biofertilizante irrigado com águas salinas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15(3), 229-236, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000300002>
- Epstein, E., Bloom, A. *Nutrição Mineral de Plantas: Princípios e Perspectivas*. 2ª ed. Editora Planta – Londrina, 401p. 2006.

- Faleiro, F.G., Junqueira, N.T.V.; Braga, M.F. Pesquisa e desenvolvimento do maracujá. In: Albuquerque A.C.S.; Silva R.C. (Eds.). *Agricultura Tropical: Quatro Décadas de Inovações Tecnológicas, Institucionais e Políticas*. Brasília, Embrapa, 411-416, 2008.
- Fawe, A., Abou-Zaid, M., Menzies, J. G., Bélanger, R. R. Silicon-mediated accumulation of flavonoid phytoalexins in cucumber. *Biochemistry and Cell Biology*, 88(5), 396-401, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1094/PHYTO.1998.88.5.396>.
- Frew, A., Weston, L.A., Reynolds, O.L., Gurr, G.M. The role of silicon in plant biology: a paradigm shift in research approach. *Annals of Botany*, 121(7), 1265–1273, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcy009>
- Jackson, M.L. *Soil chemical analysis*. New Jersey: Prentice Hall, 1965, 498p.
- Korndörfer, G.H.; Pereira, H.S.; Nola, A. *Análise de silício: solo, planta e fertilizante*. Uberlândia: Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, 2004, 34p.
- Liang YC, Si J, Römheld V. Silicon uptake and transport is an active process in *Cucumis sativus*. *New Phytologist*, 167:797–804, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01463.x>
- Liang, Y., Sun, W., Zhu, Y.G., Christie, P. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. *Environmental Pollution*, 147(2), 422-428, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008>
- Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H., Song, A. Silicon in agriculture: From Theory to Practice. *Dordrecht: Springer*, 10, 250p., 2015. DOI 10.1007/978-94-017-9978-2.
- Linhares, G.A.N. Maracujazeiro azedo adubado com fontes de silício: absorção e translocação de silício e caracterização fisiológica. \_In: Fontes de silício em mamoeiro e maracujazeiro: crescimento, fisiologia e indução de resistência. 107f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, 2019.
- Ma, J.F., Yamaji, N. Functions and transport of silicon in plants. *Cellular and Molecular Life Sciences*. V.65, p. 3049–3057, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00018-008-7580-x>
- Ma, J. F., Yamaji, N. A cooperated system of silicon transport in plants. *Trends in Plant Science*, 20:7, 435-442, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tplants.2015.04.007>

- Marschner, H. *Mineral nutrition of higher plants*. 3.ed London: Elsevier, 643p. 2012.
- Mathur, S., Agrawal, D., Jajoo, A. Photosynthesis: Response to high temperature stress. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, v. 137, p. 116-126, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2014.01.010>.
- Meletti, L.M.M. Avanços na cultura do maracujá no Brasil. *Revista Brasileira de Fruticultura*, Jaboticabal- SP, v.33, n. SPE1, pp. 83-91, 2011.
- Misra, A.N., Misra, M., Singh, R. Chlorophyll fluorescence in plant biology. Biophysics. \_In: Misra, A. N. Biophysics. *Copyright© Intech*, Ed. 7, p. 171-192. 2012.
- Nascimento, C.W.A., Souza Nunes, G.H., Preston, H.A.F., Silva, F.B.V., Preston, W., Loureiro, F.L.C. Influence of silicon fertilization on nutrient accumulation, yield and fruit quality of melon grown in northeastern Brazil. *Silicon*, 12(4), 937-943, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00187-5>
- Pacheco, G., Simão, M. J., Vianna, M. G., Garcia, R. O., Vieira, M. L. C., Mansur, E. *In vitro* conservation of *Passiflora* - A review. *Scientia Horticulturae*, v. 211, p. 305-311, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2016.09.004>.
- Puyang, X., An, M., Han, L., Zhang, X. Protective effect of spermidine on salt stress induced oxidative damage in two Kentucky bluegrass (*Poa pratensis* L.) cultivars. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v.117, p. 96-106. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.03.023>
- Roháček, K. Chlorophyll fluorescence parameters: the definitions, photosynthetic meaning, and mutual relationships. *Photosynthetica*, v. 40, p.13- 29, 2002.
- Strasser, R.J., Tsimilli-Michael, M., Srivastava, A. Analysis of the chlorophyll fluorescence transient, \_In: G.C. Papageorgiou, Govindjee (Eds.), *Chlorophyll Fluorescence: A Signature of Photosynthesis*, Advances in Photosynthesis and Respiration, *Springer-Dordrecht*, The Netherlands, 19, 321–362, 2004.
- Ullah, H., Luc, P. D., Gautam, A., Datta, A. Growth, yield and silicon uptake of rice (*Oryza sativa*) as influenced by dose and timing of silicon application under water-deficit stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(3), 318-330, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/03650340.2017.1350782>.
- Wang, S., Liu, P., Chen, D., Yin, L., Li, H., Deng, X. Silicon enhanced salt tolerance by improving the root water uptake and decreasing the ion toxicity in cucumber. *Frontiers in Plant Science*, v.6, 759. 2015. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00759>

- Yin, L., Wang, S., Liu, P., Wang, W., Cao, D., Deng, X., Zhang, S. Silicon-mediated changes in polyamine and 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid are involved in silicon-induced drought resistance in *Sorghum bicolor* L. *Plant Physiology and Biochemistry*, v.80, p. 268-277, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.04.014>.
- Yin, L., Wang, S., Tanaka, K., Fujihara, S., Itai, A., Den, X., Zhang, S. Silicon-mediated changes in polyamines participate in silicon-induced salt tolerance in *Sorghum bicolor* L. *Plant, cell & environment*, v.39, n.2, p.245-258. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/pce.12521>.
- Yin, J., Jia, J., Lian, Z., Hu, Y., Guo, J., Huo, H., Zhu, Y., Gong, H. Silicon enhances the salt tolerance of cucumber through increasing polyamine accumulation and decreasing oxidative damage. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v.169, p. 8-17, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.10.105>.
- Zanandrea, I.; Nassi, F. L.; Turchetto, A. C.; Braga, E. J. B.; Peters, J. A.; Bacari, M. A. Efeito da salinidade sob parâmetros de fluorescência em *Phaseolus vulgaris*. *Revista Brasileira Agrociência*, Pelotas, v.12, p.157- 161, 2006.
- Zanetti, L. V., Milanez, C. R. D., Gama, V. N., Aguilar, M. A. G., Souza, C. A. S., Campostrini, E., Ferraz, T. M., Figueiredo, M. F. A. M. A. Leaf application of silicon in young cacao plants subjected to water deficit. *Pesquisa agropecuária brasileira*, 51(3), 215-223, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2016000300003>
- Zeraik, M. L., Pereira, C. A. M., Zuin, V. G., Yariwake, J.H. Maracujá: um alimento funcional?. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, v.20, n.3, p. 459-471, jun/jul. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-695X2010000300026>

#### 4. RESUMO E CONCLUSÕES

Foi conduzido um experimento em sistema hidropônico com a espécie de estudo o maracujazeiro azedo, em casa de vegetação no campus da UENF, no qual o objetivo foi avaliar o crescimento, as adaptações estruturais foliares, a distribuição radicular, os aspectos fisiológicos e a absorção do nutriente Si em diferentes concentrações e fontes. Os tratamentos consistiram de cinco concentrações de Si 0,84; 1,68; 2,52; 3,36 e 4,20 g de silício.dm<sup>-3</sup> mais o tratamento controle sem a aplicação de Si; duas fontes comerciais de silício (Ácido silícico e Agrisil); e três períodos de avaliação nas plantas (115, 136 e 162 dias), sendo o delineamento experimental o de blocos ao acaso em análise conjunta de 5 x 2 x 3. A unidade experimental era composta de 288 vasos.

Os resultados obtidos foram submetidos à ANOVA e comparados pela análise de regressão com o teste F significativo a 5% de probabilidade, onde as principais conclusões foram:

1. A fertilização com o Si em suas fontes e concentrações provoca alterações nas adaptações estruturais foliares, aumentando a sua espessura, além de contribuir no crescimento e na permanência da área foliar das plantas de maracujazeiro azedo.
2. A fertilização com Si nas plantas de maracujazeiro azedo contribui para o aumento da matéria seca das raízes.
3. A distribuição radicular das plantas não é afetada pelo emprego de diferentes concentrações e fontes de Si.

4. A suplementação com o Si promove benefícios na taxa de assimilação de CO<sub>2</sub>, na condutância estomática, transpiração, na fluorescência da clorofila, o que confere proteção ao mecanismo fotossintético das plantas de maracujazeiro azedo a possíveis estresses do ambiente.
5. O Si advindo do Ácido silícico é mais rapidamente disponibilizado, enquanto o Si do Agrisil é disponibilizado de forma mais lenta para as plantas de maracujazeiro azedo, sendo que o maior teor deste Si é acumulado nas raízes.
6. Ambos os fertilizantes forneceram a forma disponível de Si, o ácido monossilícico, assim, com a absorção desse elemento, as plantas de maracujazeiro azedo tiveram seus tecidos foliares revestidos com 0,12% do Si absorvido.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barbosa Filho, M. P.; Snyder, G. H.; Fagera, N. K.; Dannoff, L. E.; Silva, O. F. (2001) Silicato de cálcio como fonte de silício para o arroz de sequeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25:325-330.
- Beraldo, J., Kato, E. T. M. (2010). Morfoanatomia de folhas e caules de *Passiflora edulis* Sims, Passifloraceae. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 20 (2):233-239. Doi: <https://dx.doi.org/10.1590/S0102-695X2010000200016>
- Bruckner, C. H., Casali, V. W. D., Moraes, C. F., Regazzi, A. J. (1995). Self-incompatibility in passin fruit (*Passiflora edulis* sims), *Acta Horticulturae*, Leuven, 370:45-57.
- Bruckner, C.H.; Picanço, M.C. (2001) *Maracujá: tecnologia de produção, pós-colheita, agroindústria, mercado*. Cinco Continentes – Porto Alegre – RS, 472p
- Carvalho-Okano, R. M., Vieira, M. F. (2001). Morfologia e Taxionomia. In: Bruckner, C.H.; Picanço, M.C. (2001) *Maracujá: tecnologia de produção, pós-colheita, agroindústria, mercado*. Cinco Continentes – Porto Alegre – RS, 33-49.
- Chen, H.M., Zheng, C.R., Tu, C., Shen, Z.G. (2000). Chemical methods and phytoremediation of soil contaminated with heavy metals. *Chemosphere*, 41:229–234.
- Chiba, Y., Namiki, M., Naoki, Y., Ma, J.F. (2009). HvLsi1 is a silicon influx transporter in barley. *The Plant Journal*, 57:810–818. Doi:10.1111/j.1365-313X.2008.03728.x.
- Cooke, J., Leishman, M. R. (2016). Consistent alleviation of abiotic stress with silicon addition: a meta-analysis. *Functional Ecology*, 30 (8):1340-1357. Doi: 10.1111/1365-2435.12713

- Cronquist, A. (1981) *An integrated system of classification of flowering plants*. New York: Columbia University Press, 1262p.
- Embrapa. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Cultivares de maracujá. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/cultivar/maracuja>>. Acesso em 20 janeiro de 2021.
- Faleiro, F. G. (2018). Cultivo de maracujá tem lugar garantido no Brasil. Campo e Negócios [online]. São Paulo, 28. mai. p.1. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br/cultivo-de-maracuja-tem-lugar-garantido-no-brasil/> acesso em: 07 de junho de 2021.
- Faquin, V., Furlani, P. R. (1999). Cultivo de hortaliças de folhas em hidroponia em ambiente protegido. *Informe Agropecuário*, 20 (200/201):99-104.
- Foy, C. D. (1992) Soil chemical factors limiting plant root growth. *Advances in Soil Science*, 19:97-149.
- Franco, C.F.; Prado, R.M. (2006) Uso de soluções nutritivas no desenvolvimento e no estado nutricional de mudas de goiabeira: macronutrientes. *Acta Sci. Agron. Maringá*, 28 (2):99-205.
- 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. Doi: 10.1093/aob/mcy009
- Furlaneto, F.P.B., Esperancini, M.S.T., Martins, A.N., Vidal, A.A. (2010). Características técnicas e econômicas do cultivo de maracujazeiros. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <[http://www.infobibos.com/Artigos/2010\\_4/maracuja/index.htm](http://www.infobibos.com/Artigos/2010_4/maracuja/index.htm)>. Acesso em: 7 de fevereiro de 2021.
- Gazel Filho, A. B.; Nascimento, T. B. do. (1998) Recomendações técnicas para o cultivo do maracujazeiro (*Passiflora edulis*) no Amapá. EMBRAPA-CPAF – Macapá (Recomendações técnicas,1),2, p.1-4. Disponível:<[https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/74281/1/AP-1998\\_recomendacoes-tecnicas-cultivo-maracujazeiro.pdf](https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/74281/1/AP-1998_recomendacoes-tecnicas-cultivo-maracujazeiro.pdf)>. Acesso 30 de janeiro de 2021.
- Gonçalves, G. M., Viana, A. P., Bezerra Neto, F. V., Amaral Junior, A. T., Pereira, M. G. (2009). Genetic parameter estimates in yellow passion fruit based on design I. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 52: 523-530.
- Gou, T., Yang, L., Hu, W., Chen, X., Zhu, Y., Guo, J., Gong, H. (2020). Silicon improves the growth of cucumber under excess nitrate stress by enhancing nitrogen assimilation and chlorophyll synthesis. *Plant Physiology and Biochemistry*, 152:53-61. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.04.031>
- Guntzer, F., Keller, C., Meunier, J. D. (2012). Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32 (1):201-213. Doi: 10.1007/s13593-011-0039-8

- Haynes, R. J. (2019). What effect does liming have on silicon availability in agricultural soils? *Geoderma*, 337:375-383. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.026>
- Hodson M.J., White, P.J., Mead, A., Broadley, M.R. (2005). Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. *Annals of Botany*, 96:1027–1046. Doi: [doi:10.1093/aob/mci255](https://doi.org/10.1093/aob/mci255).
- Jiménez, A.M., Sierra, C.A., Rodríguez-Pulido, F.J., González-Miret, M.L., Heredia, F.J., Osorio, C. (2011). Physicochemical characterisation of gulupa (*Passiflora edulis* Sims. Fo *edulis*) fruit from Colombia during the ripening. *Food Research International*, 44:1912-1918.
- Jones, L.H.P.; Handreck, K.A. (1967) Silica in soils, plants, and animals. *Advances in Agronomy*, 19:107-149, Doi: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60734-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60734-8)
- Korndörfer, G.H. (2007). Uso do silício na agricultura. *Informações Agrônomicas*, Piracicaba, 117:9-11.
- Liang, Y., Sun, W., Zhu, Y.G., Christie, P. (2007). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. *Environmental Pollution*, 147 (2):422-428. Doi: [doi:10.1016/j.envpol.2006.06.008](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008)
- Lima Filho, O.F. (2008). Silício: produtividade com qualidade na lavoura. Embrapa Agropecuária Oeste. P.1-2. Disponível em: <<http://silifertil.com.br/download-artigos/silicio05.pdf>> Acesso em: 15 de janeiro de 2021.
- Lima Filho, O.F. (2009). *História e uso o silicato de sódio na agricultura*. 1ª Ed. [online], Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados – MS. 112p. Disponível em: <[https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/696871/1/LIVR\\_OSILICATO2009online.pdf](https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/696871/1/LIVR_OSILICATO2009online.pdf)> Acesso em: 24 de janeiro de 2021.
- Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H., Song, A. (2015). *Silicon in agriculture: From Theory to Practice*. Dordrecht: Springer, 10, 250p. Doi 10.1007/978-94-017-9978-2.
- Ma, J.F., Takahashi, E. (2002) *Soil, fertiliser, and plant silicon research in Japan*. Elsevier, Amsterdam. 275p.
- Ma, J., Tamai, K., Yamaji, N. Mitani, N., Konishi, S., Katsuhara, M., Ishiguro, M., Murata, Y., Yano, M. (2006). A silicon transporter in rice. *Nature*, 440:688–691. Doi: <https://doi.org/10.1038/nature04590>
- Ma, J.F., Yamaji, N. (2008). Functions and transport of silicon in plants. *Cellular and Molecular Life Sciences*. 65:3049–3057. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00018-008-7580-x>
- Ma, J. F., Yamaji, N. (2015). A cooperated system of silicon transport in plants. *Trends in Plant Science*, 20 (7):435-442. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tplants.2015.04.007>

- Manica, I. e Oliveira Jr., M.E. (2005) Maracujá no Brasil. In: Manica, I., Brancher, A., Sanzonowics, C., Icuma, I.M., Aguiar, J.L.P., Azevedo, J.A., Vasconcellos, M.A.S., Junqueira, N.T.V. Maracujá-doce: tecnologia de produção, pós-colheita, mercado. Cinco Continentes: Porto Alegre, p.11-26.
- Marafon, A.C., Endres, L. (2011). Adubação silicatadas em cana de açúcar. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 46p. (Documentos Nº 165/Embrapa Tabuleiros Costeiros, ISSN 1517-1329). Disponível em: [http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes\\_2011/doc\\_165.pdf](http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2011/doc_165.pdf) Acesso em: 18 de janeiro de 2021.
- Martinez, H. E. P., Silva Filho, J. B. (2006). *Introdução ao cultivo hidropônico de plantas*. 3ª. Ed. Viçosa: UFV, 2006. 111p.
- Marschner, P. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3ed.San Diego: Elsevier. 2012. 651p.
- Meletti, L.M.M. e Maia, M.L. (1999) Maracujá: produção e comercialização. Instituto Agrônômico (IAC) – Campinas – SP, 64p. (Boletim técnico, 181).
- Menegale, M.D.C., Castro, G.S.A., Mancuso, M.A.C. (2015). Silício: interação com o sistema solo-planta. *Embrapa Amapá-Artigo em periódico indexado (ALICE)*. Disponível em: < <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1025188>> Acesso em: 17 de abril de 2020.
- Mitani, N. Yamaji, N., Ma, J.F (2009) Identification of maize silicon influx transporters. *Plant Cell Physiology*. 50 (1):5–12. Doi: doi:10.1093/pcp/pcn110
- Montpetit, J., Vivancos, J. Mitani-Ueno, N., Yamaji, N., Rémus-Borel, W., Belzile, F., Ma, J.F., Bélanger, R. R. (2012) Cloning, functional characterization and heterologous expression of TaLsi1, a wheat silicon transporter gene. *Plant Mol. Biol.* 79:35–46. doi:10.1007/s11103-012-9892-3)
- Oliveira LF, Nascimento MRF, Borges SV, Ribeiro PCN, Ruback VR 2002. Aproveitamento alternativo da casca do maracujá amarelo (*Passiflora edulis* F. Flavicarpa) para produção de doce em calda. *Ciência Tecnologia Alimentos*, 22: 259-262. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0101-20612002000300011>
- Owino-Gerroh C, Gascho GJ (2004) Effect of silicon on low pH soil phosphorus sorption and on uptake and growth of maize. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35:2369–2378. Doi: <http://dx.doi.org/10.1081/LCSS-200030686>
- Pio Viana, A., Lima e Silva, F.H., Gonçalves, G. M., Silva, M.G.M., Ferreira, R.T., Pereira, T.N.S., Pereira, M.G., Amaral Júnior, A.T., Carvalho, G.F. (2016). UENF Rio Dourado: a new passion fruit cultivar with high yield potential. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 16 (3):250-253. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1984-70332016v16n3c38>

- Presotto, D. (2015) Estudo sobre os principais aspectos da produção de alface hidropônica. Monografia [Especialização em Gestão Ambiental em Municípios], Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, campus Medianeira. 68f.
- Queiroz, D.L., Camargo, J.M.M., Dedecek, R.A., Oliveira, E.B., Zanol, K.M.R., Melido, R. C.N. Absorção e translocação de silício em mudas de *Eucalyptus camaldulensis*. *Ciência Florestal*, 28 (2):632-640, 2018. Doi: <https://doi.org/10.5902/1980509832053>
- Reis, T.H.P., Guimarães, P.T.G., Figueiredo, F.C., Pozza, A.A.A., Nogueira, F.D., Rodrigues, C.R. (2007). O silício na nutrição e defesa de plantas. Belo Horizonte: EPAMIG, (*EPAMIG. Boletim Técnico*, 82), 120p.
- Resh, H. M. (2004). *Hydroponic food production: a definitive guidebook of soilless food-growing methods: for the professional and commercial grower and the advanced home hydroponics gardener*. 6º Ed. Mahwah, N.J.: Newconcept Press. 567p
- RNC. Registro Nacional de Cultivares. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: [http://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares\\_registradas.php](http://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares_registradas.php) . Acesso em: 20 de janeiro de 2021.
- Rodrigues, F. A., Datnoff, L. E. (2015). Silicon and plant diseases. *Cham: Springer International Publishing*. Doi: 10.1007/978-3-319-22930-0
- Ruggiero, C. (1980) *Cultura do Maracujazeiro*. FCAV – Jaboticabal –SP, 147p.
- Ruggiero, C. São José, A. R., Volpe, C. A., Oliveira, J. C. de, Durigan, J. F., Baumgartner, J. G., Silva, J. R. da, Nakamura, K., Ferreira, M. E., Kavaii, R., Pereira, V. P. (1996). Maracujá para exportação: Aspectos técnicos da produção. Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária, Secretária de Desenvolvimento Rural, Programa de apoio a produção e exportação de frutas, hortaliças, flores e plantas ornamentais - Brasília: Embrapa-SPI, (Publicações técnicas FRUPEX; 19).
- São José, A.R. (1994) Maracujá: produção e mercado. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB –Vitória da Conquista – BA, 255p.
- Savant, N.K. Korndörfer, G.H., Datnoff, L.E., Snyder, G. H. (1999). Silicon nutrition and sugarcane production: a review. *Journal of Plant Nutrition*, 22 (12):1853-1903.
- Souza, M. M., Pereira, T. N. S. (2011). Biologia da reprodução em maracujazeiro amarelo e sua importância para a produção comercial de frutos. In: Pires, M. M., São José, A. R., Conceição, A. O. (2011) *Maracujá: avanços tecnológicos e sustentabilidade*. Ilhéus-Bahia: Ed. Editus, 237p.

- Takahashi, E., Ma, J.F., Miyake, Y. (1990). The possibility of silicon as an essential element for higher plants. *Comments on Agricultural and Food Chemistry*. 2 (2):99–122.
- Tokunaga, Y. (1991). Potassium silicate: A slow-release potassium fertilizer. *Fertilizer Research*, 30 (1):55–59. Doi:10.1007/bf01048827
- Yamaji, N., Mitatni, N., Ma, J. F. (2008). A transporter regulating silicon distribution in rice shoots. *The Plant Cell*, 20 (5):1381-1389. Doi: [www.plantcell.org/cgi/doi/10.1105/tpc.108.059311](http://www.plantcell.org/cgi/doi/10.1105/tpc.108.059311)
- Zhu, Y., Yin, J., Liang, Y., Liu, J., Jia, J., Huo, H., Wu, Z., Yang, R., Gong, H. (2019). Transcriptomic dynamics provide an insight into the mechanism for silicon-mediated alleviation of salt stress in cucumber plants. *Ecotoxicology and environmental safety*, 174:245-254. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.075>

## APÊNDICES



Figura 1A: Processo de lavagem da areia de rio e equipe de trabalho, casa de vegetação, UENF. 2019.



Figura 2A: Visão geral do experimento de cultivo de maracujazeiro azedo suplementado com Si, em sistema hidropônico, casa de vegetação, UENF. 2019.



Figura 3A: Irrigação com água desionizada do experimento de cultivo de maracujazeiro azedo suplementado com Si, em sistema hidropônico, casa de vegetação, UENF. 2019



Figura 4A: Emergência e estabilização das plantas maracujazeiro azedo suplementadas com Si, em sistema hidropônico, casa de vegetação, UENF. 2020.



Figura 5A: Avaliação das variáveis biométricas e morfológicas foliares das plantas de maracujazeiro azedo, cultivadas em Sistema Hidropônico, Casa de vegetação, UENF. 2020



Figura 6A: Análises Fisiológicas das plantas de maracujazeiro azedo, cultivadas em Sistema Hidropônico, Casa de vegetação, UENF. 2020.

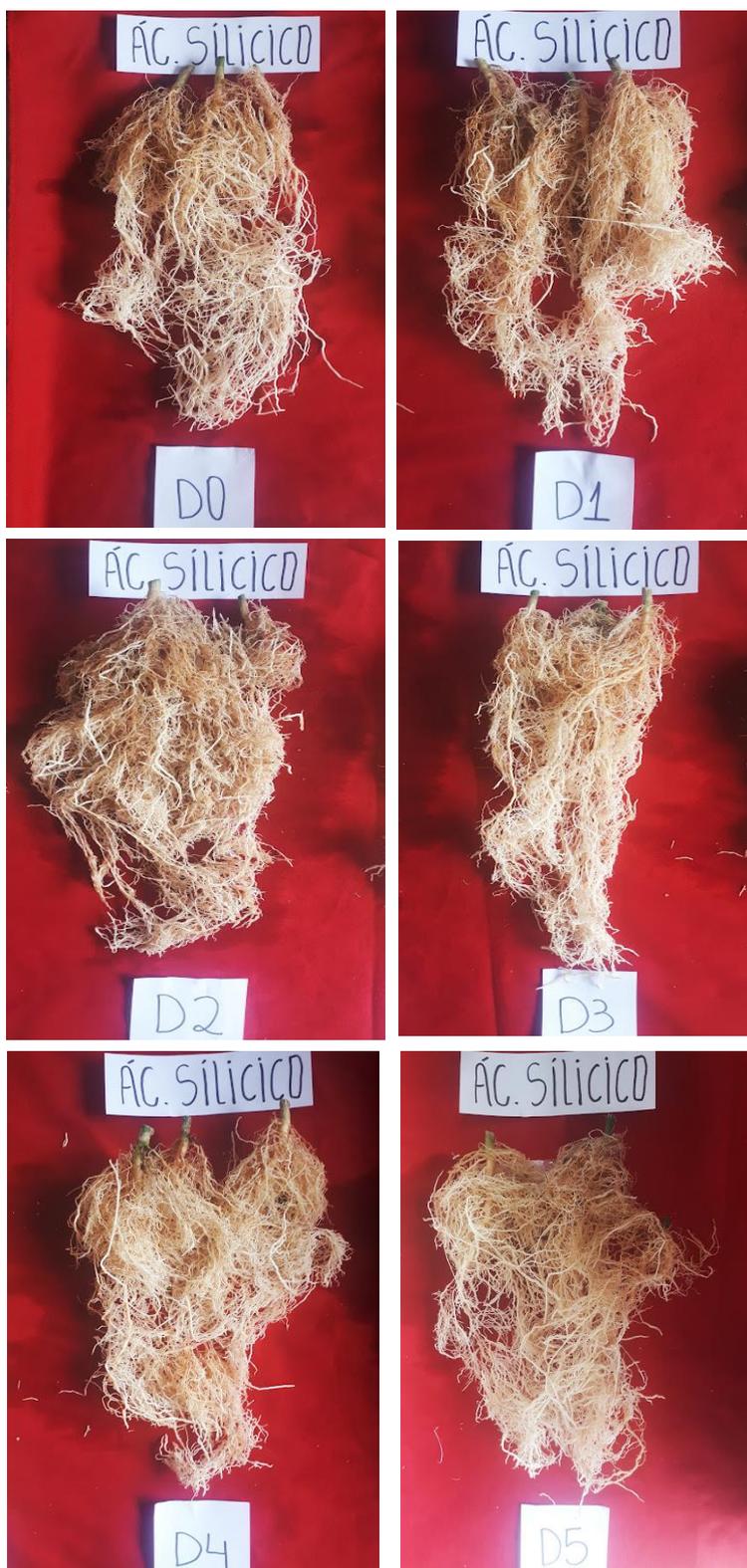


Figura 7A: Raízes das plantas de maracujazeiro azedo em função das aplicações do tratamento ácido silícico, cultivadas em Sistema Hidropônico, Casa de vegetação, UENF. 2020.



Figura 8A: Raízes das plantas de maracujazeiro azedo em função das aplicações do tratamento Agrisil, cultivadas em Sistema Hidropônico, Casa de vegetação, UENF. 2020.



Figura 9A: Scanner Epson XL 10000 acoplado ao computador conectado com o software Winrhizo pro® 2012, Fruticultura Tropical – LFIT, Uenf. Campos dos Goytacazes. 2020.



Figura 10A: Digestão do material vegetal em capela para as análises de Silício, Nitrogênio e Polifenóis totais, setor de nutrição mineral de plantas, LFIT – UENF. Campos dos Goytacazes, 2020.



Figura 11A: Equipamento ICPE 9000, SHIMADZU, para as análises nutricionais do setor de nutrição mineral de plantas, LFIT – UENF.