



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
CAMPUS PROFESSORA CINOBELINA ELVAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
MESTRADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

KAMILLA DIAS PESSOA

**ATUAÇÃO DO SELÊNIO NOS PROCESSOS FISIOLÓGICOS E MITIGAÇÃO DA
TOXICIDADE AMONÍACAL NO CRESCIMENTO INICIAL DO
MARACUJAZEIRO-AMARELO**

Bom Jesus – PI

2025

KAMILLA DIAS PESSOA

**ATUAÇÃO DO SELÊNIO NOS PROCESSOS FISIOLÓGICOS E MITIGAÇÃO DA
TOXICIDADE AMONÍACAL NO CRESCIMENTO INICIAL DO
MARACUJAZEIRO-AMARELO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA, Campus Professora Cinobelina Elvas - CPCE, da Universidade Federal do Piauí - UFPI, na área de concentração Produção Vegetal, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Barbosa da Silva Júnior

Coorientador: Dr. Rodrigo Fonseca da Silva

Bom Jesus – PI

2025

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Setorial Campus Professora Cinobelina Elvas
Setor de Processamento Técnico

P475a Pessoa, Kamilla Dias.

Atuação do selênio nos processos fisiológicos e mitigação da toxicidade amoniacal no crescimento inicial do maracujazeiro-amarelo / Kamilla Dias Pessoa. -- 2025.

48 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Bom Jesus, Piauí, 2025.

“Orientador: Prof. Dr. Gabriel Barbosa da Silva Júnior”.

“Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Fonseca da Silva”.

1. Ciências agrárias. 2. Nutrição de plantas. 3. Maracujá. I. Silva Júnior, Gabriel Barbosa da. II. Silva, Rodrigo Fonseca da. III. Título.

CDD 630

Bibliotecária: Nayra Fontinele Feijão – CRB3/1249

KAMILLA DIAS PESSOA

**ATUAÇÃO DO SELÊNIO NOS PROCESSOS FISIOLÓGICOS E MITIGAÇÃO DA
TOXICIDADE AMONÍACAL NO CRESCIMENTO INICIAL DO
MARACUJAZEIRO-AMARELO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA, do Campus Professora Cinobelina Elvas - CPCE, da Universidade Federal do Piauí - UFPI, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias.

Área de concentração: Produção Vegetal.

Linha de Pesquisa: Propagação e Manejo Cultural de Plantas.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Barbosa da Silva Júnior.

Coorientador: Dr. Rodrigo Fonseca da Silva.

Aprovada em: 30 de julho de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gabriel Barbosa da Silva Júnior (UFPI)
Orientador

Prof. Dr. Rodrigo Fonseca da Silva (UFPI)
Coorientador

Prof. Dr. Rafael de Souza Miranda (UFPI)
Examinador Interno ao Programa

Prof. Dr. Jenilton Gomes da Cunha (UFPI)
Examinador Externo ao Programa

Prof. Dr. Cid Naudi Silva Campos (UFMS)
Examinador Externo ao Programa

Aos meus pais, Rangel Pessoa e Vandr ia Dias
e, ao meu companheiro, Iuri Araújo.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Depois de tanto estudo e dedicação, hoje posso afirmar que alcancei mais uma conquista. Passei por momentos difíceis, obstáculos que me deixaram mais forte, fizeram crescer e momentos felizes e experiências que espero lembrar para sempre.

Agradecer primeiramente a Deus, por ter me permitido chegar até aqui, por sempre está comigo iluminando meus passos e me dando forças nos momentos difíceis me proporcionando a vitória desse desafio.

Aos meus pais Rangel Leal Pessoa e Vandréia Dias Rocha, por sempre me apoiarem em minhas decisões, por terem me ensinado o caminho certo e a nunca desistirdos meus sonhos.

Ao meu companheiro Iuri Araújo, por sempre está ao meu lado me incentivando e dando forças, me encorajando para não desistir.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias (PPGCA), da Universidade Federal do Piauí, Campus Professor Cinobelina Elvas (CPCE/UFPI), pela oportunidade de cursar o mestrado.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela atribuição da bolsa de pesquisa.

A todos da minha família, avós, primos, tios, por todas as orientações que sempre me deram.

As minhas amigas que a pós-graduação me trouxe, que me deram toda ajuda e apoio preciso, Ana Clara, Maria Luiza, Sara e Thayline, por deixarem esse ciclo mais descontraído e dividir as preocupações.

Aos meus parceiros de experimento, Eduardo, Maria Eduarda e Jenilton, por toda ajuda e apoio necessário.

Ao meu orientador Prof. Dr. Gabriel da Silva Júnior, pela orientação, amizade, confiança e apoio constante.

O meu coorientador Dr. Rodrigo Fonseca, pela coorientação, por todo auxílio com a pesquisa.

De forma geral, ao grupo FRUTAGRO, por tantos ensinamentos passados e ajuda nessa período.

Ao Viveiro Flora Brasil pela doação das sementes de maracujazeiro-amarelo utilizadas neste estudo.

Muito obrigada!

RESUMO

As plantas têm como principais fontes de nitrogênio o nitrato (NO_3^-) e o amônio (NH_4^+), um dos principais desafios enfrentados por agricultores está relacionado à toxicidade provocada pelo excesso do amônio, que pode comprometer significativamente o crescimento e a produtividade das plantas. Diante desse cenário, torna-se necessário o uso de estratégias que minimizem os efeitos negativos da toxicidade amoniacal. Uma abordagem promissora é a utilização de elementos benéficos, como o selênio (Se). Diante disso, o estudo do selênio como agente atenuante da toxicidade amoniacal torna-se essencial para o avanço de práticas nutricionais sustentáveis e eficientes no cultivo dessa espécie. Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar o uso do selênio como agente atenuante dos efeitos tóxicos causados pelo uso excessivo de amônio na nutrição, no funcionamento bioquímico e fisiológico, nos processos fotossintéticos e no crescimento inicial do maracujazeiro-amarelo cultivado em solução nutritiva. O delineamento experimental utilizado foi em Blocos Casualizados, com quatro repetições, arranjos em esquema fatorial $5 \times 2 + 1$, constituído por cinco concentrações de selênio (0; 3; 6; 12 e $18 \mu\text{mol L}^{-1}$), duas proporções de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (70/30 e 100/0) e um tratamento adicional de 50/50, o estudo foi dividido em duas etapas. Na etapa I as doses crescentes de Se apresentaram eficácia para elevar o teor desse elemento nos tecidos foliares do maracujazeiro-amarelo, beneficiando a sua qualidade nutricional. Porém, doses acima de $6 \mu\text{mol L}^{-1}$, ultrapassam os níveis considerados fisiológicos e nutricionais favoráveis para a planta de maracujazeiro-amarelo. Na etapa II a proporção de N intermediária (70/30) promoveu um equilíbrio favorável entre a absorção, translocação e redistribuição do Se. Assim essa proporção permite maior mobilidade do Se para a parte aérea sem causar acúmulo tóxico nas folhas jovens. Sendo assim, a dose de $6 \mu\text{mol L}^{-1}$. O selênio modula o aparato fotossintético em face ao crescimento inicial do maracujazeiro-amarelo, o N na proporção de 70/30 influencia fortemente o acúmulo e a distribuição de Se no maracujazeiro-amarelo.

Palavras-chave: Amônio, Elemento benéfico, Nutrição de plantas, *Passiflora edulis*, Selenito.

ABSTRACT

Plants' main nitrogen sources are nitrate (NO_3^-) and ammonium (NH_4^+). One of the main challenges farmers face is the toxicity caused by excess ammonium, which can significantly compromise plant growth and productivity. Given this scenario, strategies to minimize the negative effects of ammonia toxicity are essential. One promising approach is the use of beneficial elements, such as selenium (Se). Therefore, studying selenium as a mitigating agent for ammonia toxicity is essential for advancing sustainable and efficient nutritional practices in the cultivation of this species. Given the above, this study aimed to evaluate the use of selenium as a mitigating agent for the toxic effects caused by excessive ammonium use on the nutrition, biochemical and physiological function, photosynthetic processes, and initial growth of yellow passion fruit plants grown in nutrient solution. The experimental design was randomized blocks with four replicates, arranged in a $5 \times 2 + 1$ factorial scheme, consisting of five selenium concentrations (0; 3; 6; 12 and $18 \mu\text{mol L}^{-1}$), two $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratios (70/30 and 100/0) and an additional 50/50 treatment. The study was divided into two stages. In stage I, increasing Se doses were effective in increasing the content of this element in the leaf tissues of yellow passion fruit, benefiting its nutritional quality. However, doses above $6 \mu\text{mol L}^{-1}$ exceed the levels considered favorable physiological and nutritional for the yellow passion fruit plant. In stage II, the intermediate N ratio (70/30) promoted a favorable balance between Se absorption, translocation and redistribution. Thus, this ratio allows greater Se mobility to the shoot without causing toxic accumulation in young leaves. Therefore, the dose of $6 \mu\text{mol L}^{-1}$. Selenium modulates the photosynthetic apparatus in the face of the initial growth of the yellow passion fruit plant, N in the proportion of 70/30 strongly influences the accumulation and distribution of Se in the yellow passion fruit plant.

Keywords: Ammonium, Beneficial element, *Passiflora edulis*, Plant nutrition, Selenite.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Localização do local da realização do experimento em casa de vegetação situada na Universidade Federal do Piauí, Campus Professora Cinobelina Elvas, no município de Bom Jesus, Piauí.....	19
Figura 2 -	Teor de Se na folha de plantas de maracujazeiro-amarelo submetidas a diferentes concentrações de selênio.....	26
Figura 3 -	Teor de macronutrientes nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre na folha de plantas de maracujazeiro-amarelo submetidas a diferentes concentrações de selênio.....	27
Figura 4 -	Teor de clorofila <i>a</i> , clorofila <i>b</i> , clorofila total, e carotenoides de plantas de maracujazeiro-amarelo sob diferentes concentrações de selênio.....	28
Figura 5 -	Eficiência máxima e efetiva do fotossistema II (PSII), coeficiente de extinção fotoquímica e não fotoquímica, excesso de energia no PSII, e taxa de transporte de elétrons de plantas de maracujazeiro-amarelo sob diferentes concentrações de selênio.....	30
Figura 6 -	Taxas de fotossíntese líquida, transpiração, condutância estomática, e concentração interna de CO ₂ de plantas de maracujazeiro-amarelo sob diferentes concentrações de selênio após 15 e 30 dias de sua aplicação.....	29
Figura 7 -	Eficiência de carboxilação da Rubisco, eficiência intrínseca e instantânea do uso da água de plantas de maracujazeiro-amarelo após 15 e 30 dias da aplicação dos tratamentos com selênio.....	33
Figura 8 -	Altura de plantas, diâmetro do caule e aparência fenotípica de plantas maracujazeiro-amarelo após 15 e 30 dias da aplicação dos tratamentos com diferentes concentrações de selênio.....	34
Figura 9 -	Acúmulo de Se em plantas de maracujazeiro-amarelo submetidas a diferentes concentrações de selênio e proporções de NH ₄ ⁺ e NO ₃ ⁻	36
Figura 10 -	Acúmulo de NH ₄ ⁺ e NO ₃ ⁻ na raiz, caule e folhas de plantas de maracujazeiro-amarelo submetidas a diferentes concentrações de selênio e proporções de NH ₄ ⁺ e NO ₃ ⁻	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Concentrações dos nutrientes na solução estresse em função das concentrações de N e proporções de NH_4^+ e NO_3^-	20
Tabela 2 -	Concentrações dos nutrientes na solução nutritiva em função das concentrações de N e proporções de NH_4^+ e NO_3^-	21

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1	Cultura do maracujazeiro.....	14
2.2	Uso de solução nutritiva no cultivo de mudas frutíferas.....	14
2.3	Toxicidade amoniacal em plantas.....	15
2.4	Fatores que podem amenizar a toxicidade causada pelo excesso de NH_4^+ nas plantas.....	16
2.5	Uso do selênio nas plantas.....	17
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.1	Condições gerais do experimento.....	19
3.2	Etapa I: Concentrações de Se na modulação do aparato fotossintético, na nutrição e no crescimento inicial do maracujazeiro-amarelo.....	21
3.2.1	Variáveis analisadas.....	22
3.2.1.1	Taxa de crescimento relativo.....	22
3.2.1.2	Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a.....	22
3.2.1.3	Pigmentos fotossintéticos.....	23
3.2.1.4	Determinação do Se e macronutrientes.....	23
3.3	Etapa II: Concentrações de Se atenuando a toxicidade amoniacal do maracujazeiro-amarelo em fase inicial de crescimento.....	24
3.3.1	Variáveis analisadas.....	24
3.3.1.1	Acúmulo e eficiência do uso do Se.....	24
3.3.1.2	Acúmulo de íons inorgânicos.....	24
3.4	Análise estatística.....	24
4	RESULTADOS.....	26
4.1	Teor de Se nos tecidos foliares.....	26
4.2	Presença do Se diminui o teor de macronutrientes foliares.....	27
4.3	Eficiência da maquinaria fotossintética.....	28
4.4	Crescimento inicial.....	33
4.5	Concentrações de Se sob proporções de NH_4^+ e NO_3^-.....	35
4.6	Acúmulo de NH_4^+ e NO_3^- nas plantas tratadas com concentrações de Se.....	36
5	DISCUSSÃO.....	39

6	CONCLUSÃO.....	42
	REFERÊNCIAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

O nitrato (NO_3^-) e o amônio (NH_4^+) são as fontes mais importantes de nitrogênio para as plantas. Quando em concentrações adequadas, o NH_4^+ pode promover diversos benefícios ao desenvolvimento vegetal, como o aumento da atividade fisiológica e nutricional. No entanto, o seu excesso pode resultar em efeitos adversos, causando rompimento das estruturas celulares, levando à necrose da estrutura vegetal minimizando o seu desenvolvimento (Cunha *et al.*, 2024). Conforme demonstrado por Silva Júnior *et al.* (2019), para se alcançar uma nutrição eficiente e garantir a qualidade das mudas de maracujazeiro, é essencial determinar a proporção adequada de NO_3^- e NH_4^+ na solução nutritiva utilizada.

O crescimento e a produtividade das plantas podem ser seriamente afetados pelo excesso de amônio, cuja toxicidade representa um dos grandes desafios encontrados no setor agrícola (Silva; Souza, 2009). A toxicidade do NH_4^+ está associada à inibição de enzimas-chave, ao acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs) e à consequente degradação de macromoléculas celulares (proteínas, lipídios e ácidos nucleicos), o que provoca alterações morfofisiológicas severas nas plantas (Li *et al.*, 2014).

A fim de atenuar os efeitos prejudiciais da toxicidade amoniacal, é fundamental que sejam implantadas estratégias adequadas, que sejam capazes de reduzir tais impactos adversos. Uma abordagem promissora é a utilização de elementos benéficos, como o selênio (Se). Embora não seja considerado essencial para as plantas, o Se tem demonstrado potencial em aumentar a tolerância vegetal a estresses abióticos e atenuar distúrbios nutricionais (Hasanuzzaman *et al.*, 2022).

Identificado como um elemento benéfico, o selênio possui uma faixa estreita entre concentrações benéficas e tóxicas, variando conforme a espécie vegetal (Bodnar; Konieczka; Namiesnik, 2012). No ambiente, é encontrado predominantemente em formas minerais, sendo rara sua ocorrência na forma elementar (Boyd, 2011). Sua absorção e metabolismo dependem de fatores fisiológicos e bioquímicos específicos do solo e da planta (Wrobel *et al.*, 2020; Trippe *et al.*, 2021).

Estudos recentes têm investigado a eficácia do Se na mitigação de estresses abióticos, como é o caso da toxicidade amoniacal. Evidências indicam que o selênio pode reduzir o estresse oxidativo induzido pelo excesso de NH_4^+ , promovendo melhorias na fotossíntese e no crescimento vegetal (Zhu *et al.*, 2009; Hasanuzzaman *et al.*, 2020). Nesse contexto, a aplicação de Se em soluções nutritivas desponta como um método viável para reduzir os efeitos tóxicos

do amônio, aumentar a resistência das plantas e contribuir para o incremento da produtividade agrícola (Hawrylak-Nowak, 2009).

O cultivo do maracujá-amarelo tem crescido bastante, tanto em sistemas com substratos inertes quanto com uso de soluções nutritivas, o que tem melhorado a nutrição das plantas, principalmente em relação ao nitrogênio, que é um nutriente fundamental e requisitado em elevadas concentrações (Mattar *et al.*, 2018). Mesmo com o aumento da área cultivada, ainda há poucos estudos que investigam como o nitrogênio influencia no crescimento do maracujazeiro-amarelo, especialmente considerando as diferentes concentrações e fontes desse nutriente (Silva Júnior *et al.*, 2019; 2020; Bezerra *et al.*, 2019).

Embora seja uma planta rústica, com potencial agrônômico e econômico, o maracujazeiro-amarelo pode ter seu crescimento prejudicado quando exposto a concentrações elevadas de amônio, seja em sistemas hidropônicos ou com uso intensivo de fertilizantes, o que provoca danos nas células e leva a uma redução na produção de massa seca (Silva Júnior *et al.*, 2020). Desse modo, a investigação do selênio como um agente que atenua a toxicidade do amônio é crucial para o desenvolvimento de práticas nutricionais eficientes e sustentáveis para essa cultura. Assim, o monitoramento do desempenho fisiológico da planta deve incluir a análise de indicadores como as trocas gasosas, a fluorescência da clorofila *a* e o crescimento, principalmente para definição da concentração ideal de Se para se obter um cultivo bem sucedido de culturas economicamente importantes.

Diante disso, o presente estudo propôs-se a avaliar a uso do selênio como agente atenuador dos efeitos tóxicos causados pelo uso em excesso de amônio na nutrição, no funcionamento bioquímico e fisiológico, nos processos fotossintéticos e no crescimento inicial do maracujazeiro-amarelo cultivado em solução nutritiva.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cultura do maracujazeiro

O *Passiflora edulis Sims*, conhecido popularmente como maracujá-amarelo ou maracujá-azedo, é um fruto nativo brasileiro não endêmico, com cultivo em todo o território nacional (Bernacci *et al.*, 2020). Essa espécie possui uma ampla distribuição geográfica, destaca-se por ser uma das culturas mais cultivadas (Reis *et al.*, 2020). Essa popularidade se dá pelas características físico-químicas do fruto, como alta acidez, elevado teor de vitaminas e antioxidantes, possui fácil adaptação às condições de clima e solo do Brasil, que favorecem seu crescimento, desenvolvimento e produtividade (Mendonça *et al.*, 2006).

O Brasil se encontra no ranking mundial como o maior produtor de maracujá, com produção estimada em 698 mil toneladas, em uma área de 45.602 ha, a maior parte desses valores se concentra na região Nordeste, sendo o Piauí responsável por 0,04% dessa produção (IBGE, 2022).

O maracujá é uma fruta bastante nutritiva, a qual possui grande importância comercial, por ser amplamente utilizada na fabricação de alimentos, como sucos, geleias, sorvetes (Kawakami *et al.*, 2021). Além do mais, ele também pode ser utilizado na indústria farmacêutica, espera-se que essa indústria se desenvolva ainda mais (He *et al.*, 2020).

Dessa forma, o maracujá-amarelo ocupa uma posição importante na fruticultura mesmo em comparação a outras frutíferas tropicais que possuem maior tradição de consumo, sua participação no mercado de hortifruti é garantida, adaptando-se perfeitamente a este segmento de comercialização que valoriza produtos de elevado valor acrescentado (Meletti; Oliveira; Ruggiero, 2010).

2.2 Uso de solução nutritiva no cultivo de mudas frutíferas

Para garantir um fornecimento adequado de nutrientes essenciais ao cultivar mudas frutíferas, como o maracujá, é comum fazer uso de solução nutritiva (Hoagland; Arnon, 1950). Esse método proporciona as plantas acesso constante a elementos como nitrogênio, fósforo, potássio e micronutrientes essenciais para um crescimento saudável das mudas, a qualidade das mudas e a produtividade das plantas adultas podem ser significativamente melhoradas com nutrição adequada desde a fase inicial de crescimento (Taiz; Zeiger, 2017).

Além de promover um crescimento vigoroso, o uso de solução nutritiva pode ser uma ajuda para impedir o surgimento de carência nutricional, que são comuns em solos pobres ou insuficientes, a aplicação de solução nutritiva em ambientes controlados, como estufas, permite a otimização dos recursos, garantindo que as plantas recebam o que necessitam para realizar suas funções fisiológicas (Silva; Souza, 2009). Isto é importante para espécies frutíferas como o maracujá, que possuem necessidades nutricionais específicas para atingir seu potencial de produção (Ferreira *et al.*, 2014).

A solução nutritiva tem sua composição alterada dependendo da espécie cultivada e das condições do ambiente, por exemplo, no caso do maracujá, recomenda-se a utilização de solução balanceada que cubra a demanda de nitrogênio na forma de NH_4^+ e NO_3^- e outros macro e micronutrientes (Silva; Souza, 2009). Estudos mostram que é necessária uma proporção adequada de nitrogênio para evitar problemas com a toxicidade do amônio, o uso de uma solução que contenha selênio tem potencial para amenizar esse problema (Hawrylak-Nowak, 2009; Hasanuzzaman *et al.*, 2020).

O acompanhamento constante da solução nutritiva é fundamental para garantir que a composição possa ser adaptada às necessidades das plantas durante o seu desenvolvimento (Hoagland; Arnon, 1950). A fertirrigação é uma técnica moderna que permite a aplicação adequada de nutrientes, otimizando o uso de fertilizantes e água e, promovendo um crescimento mais uniforme e saudável das mudas (Zhu *et al.*, 2009). A adoção de tais práticas pode resultar em uma melhoria substancial na qualidade e na produtividade das plantas frutíferas, o que contribui para a sustentabilidade e eficiência da agricultura (Ferreira *et al.*, 2014).

2.3 Toxicidade amoniacal em plantas

As plantas podem ser tolerantes ou susceptíveis a exposição ao excesso amoniacal, a toxicidade do nitrogênio amoniacal pode causar alterações no desenvolvimento e crescimento das plantas, mesmo em genótipos da mesma espécie as plantas apresentam respostas distintas quando absorvem o NH_4^+ (Cruz *et al.*, 2011). Em concentrações ideais o NH_4^+ traz benefícios para as plantas, porém o seu fluxo é de difícil controle, assim pode ocasionar toxicidade nas plantas (Bittsánzky *et al.*, 2015).

A toxicidade do amônio nas plantas acarreta uma série de sintomas, sendo eles, murchamento, clorose e necrose foliar, redução no desenvolvimento da parte aérea e raiz, em casos mais severos da toxicidade pode levar a morte da planta (Wong, 2005; Jampeetong; Brix;

Kantawanicikul, 2012; Li *et al.*, 2014). O excesso do NH_4^+ pode resultar na danificação da integridade física da parede celular do vegetal (Kochanová *et al.*, 2014).

O excesso do amônio tem envolvimento direto com o desenvolvimento radicular das plantas, sendo o órgão mais afetado por essa exposição, resultando em severas alterações fisiológicas e morfológicas (Li *et al.*, 2014; Zanin *et al.*, 2015). Esse excesso resulta na redução do desenvolvimento das raízes primárias por impedir o processo de alongamento e multiplicação das células nas zonas meristemáticas e diminuição do crescimento das raízes secundárias (Li *et al.*, 2010). Essa absorção excessiva de NH_4^+ também resulta diminuição de energia e acidez dos brotos, restringindo severamente o desenvolvimento das plantas (Hachiya *et al.*, 2021; Kong *et al.*, 2022).

Altas proporções de amônio diminuem o acúmulo total de nitrogênio, tanto em plantas que são sensíveis, como é o caso do *Cucumis sativus* (Roosta; Schjoerring, 2008) como também nas plantas consideradas tolerantes, como o *Saccharum spp.* (Ishikawa *et al.*, 2009). Vale ressaltar que as respostas da assimilação e absorção de NH_4^+ pelos vegetais, refletida no acúmulo de nitrogênio em diferentes espécies, ainda precisam serem mais esclarecidas (Li *et al.*, 2014).

Foram feitos progressos na indicação de prováveis mecanismos de toxicidade amoniacal (Xiao *et al.*, 2023). A toxicidade provocada pelo NH_4^+ resulta em opções limitadas de fertilizantes nitrogenados para a agricultura, diminuindo o rendimento, portanto, reduzir eficazmente a toxicidade amoniacal é crucial para diminuir os custos agrícolas e amenizar a poluição (Xiao *et al.*, 2023).

2.4 Fatores que podem amenizar a toxicidade causada pelo excesso de NH_4^+ nas plantas

A toxicidade causada pelo amônio nas plantas é reduzida pela presença de NO_3^- pois a sua absorção está relacionada com a alcalinização da rizosfera e influxo de cátions, atenuando alguns dos efeitos deletérios do NH_4^+ (Brito; Kronzucker, 2005). A capacidade da planta em tolerar concentrações elevadas de amônio está ligada a sua aptidão em produzir quantidades suficientes de esqueletos de carbono para assimilar NH_4^+ (Hauck, 2010).

Em estudos realizados por Roosta e Schjoerring (2008) onde avaliaram o fornecimento de nitrato em mudas de pepino cultivadas em solução de 10 mmol L^{-1} de amônio, foi relatado que o cultivo apenas em amônio apresentou toxicidade, enquanto o uso de nitrato aliviou esses sintomas, aumentou a atividade de glutamina sintetase e reduziu a toxicidade causada pelo

amônio. O nitrato reduz a ação tóxica do amônio sem alterar o acúmulo de NH_4^+ , ácidos orgânicos e cátions inorgânicos (Hachiya *et al.*, 2012).

Foi demonstrado que o potássio (K) reduz a toxicidade do NH_4^+ no arroz, cevada, pepino e *Arabidopsis* (Roosta; Schjoerring, 2008; Hoopen *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2021; Fang *et al.*, 2021). Sob condições de baixo teor de K, quando o NH_4^+ é a única fonte de nitrogênio, o crescimento do arroz é bastante inibido, a alta oferta de potássio impede a entrada e saída de NH_4^+ , evitando assim uma circulação desnecessária de NH_4^+ (Szczerba *et al.*, 2008).

A toxicidade do NH_4^+ também pode ser amenizada através de ações hormonais, o NH_4^+ reduz os níveis de auxina nos tecidos e a aplicação exógena de AIA alivia significativamente a toxicidade amoniacal em *Arabidopsis* e arroz (Di *et al.*, 2018; Devi *et al.*, 2022). O transporte primário de auxina nas raízes é essencial para manter a gravidade das raízes sob condições de alto teor de NH_4^+ (Zou *et al.*, 2013).

2.5 Uso do selênio nas plantas

Pode-se admitir estratégias para amenizar os efeitos tóxicos causados pelo NH_4^+ nas plantas, destacando-se a utilização de elementos benéficos, como o Se, apesar deste elemento não ser essencial para as plantas, seu uso pode proporcionar benefícios às mesmas, como melhora na tolerância aos estresses abióticos e redução dos efeitos oriundos de desequilíbrios nutricionais (Hasanuzzaman *et al.*, 2022; Cipriano *et al.*, 2023).

O uso do Se tem sido reconhecido como um objetivo estratégico interessante nos vegetais não só pela sua capacidade de intensificar o crescimento, mas de amenizar os efeitos nocivos dos estresses abióticos (Titov *et al.*, 2022). De acordo com a concentração de Se aplicado às plantas que sofrem estresse, foi exposto que o efeito de proteção do mesmo está relacionado com a ativação de diversas vias de sinalização, a regulação positiva do metabolismo antioxidante (Khan *et al.*, 2023).

O Se ocupa um papel importante no metabolismo das plantas, atuando como antioxidante que remove o acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs), proporciona melhora na homeostase iônica, que ajuda a aliviar o estresse oxidativo, e no aparato fotossintético que proporciona resistência ao estresse metálico (Khan *et al.*, 2023). Os mecanismos de desintoxicação de metais induzidos por Se estão envolvidos na inibição da absorção de metais e na transferência de radiação para o solo (Titov *et al.*, 2022).

Esse elemento pode melhorar os sistemas antioxidantes dos vegetais, tanto aqueles que utilizam enzimas quanto os que não utilizam, ampliando sua capacidade de amenizar o estresse

oxidativo, e previne alterações induzidas por metais tóxicos nos padrões de metilação do DNA, esta estimulação da capacidade antioxidante induzida pelo Se pode acontecer por meio da indução da atividade enzimática antioxidante (Desoky *et al.*, 2021).

É necessário atenção na utilização do Se na agricultura, este elemento em teor elevado pode interagir com minerais nos tecidos das plantas e causar desequilíbrio, assim o efeito antioxidante torna-se pró-oxidante, quando está em altas concentrações o Se pode causar acúmulo de EROs e, como resultado ocasionar estresse oxidativo, que pode causar disfunções no processo da fotossíntese (Chauhan *et al.*, 2017; Wan *et al.*, 2019).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Condições gerais do experimento

O experimento foi conduzido em estufa situada no Campus Professora Cinobelina Elvas Universidade Federal do Piauí, (CPCE/UFPI), no município de Bom Jesus, Piauí, localizado a 287 metros de altitude, nas coordenadas geográficas 09°04'59,9" S e 44°19'36,8" W (Figura 1).

A estrutura da casa de vegetação incluía uma cobertura plástica transparente, sombrites na cor branca com 50% de luminosidade nas laterais e, bancadas de madeira de $9 \times 3 \times 5,5 \times 0,3$ m, ocupando uma área total de aproximadamente 90 m².

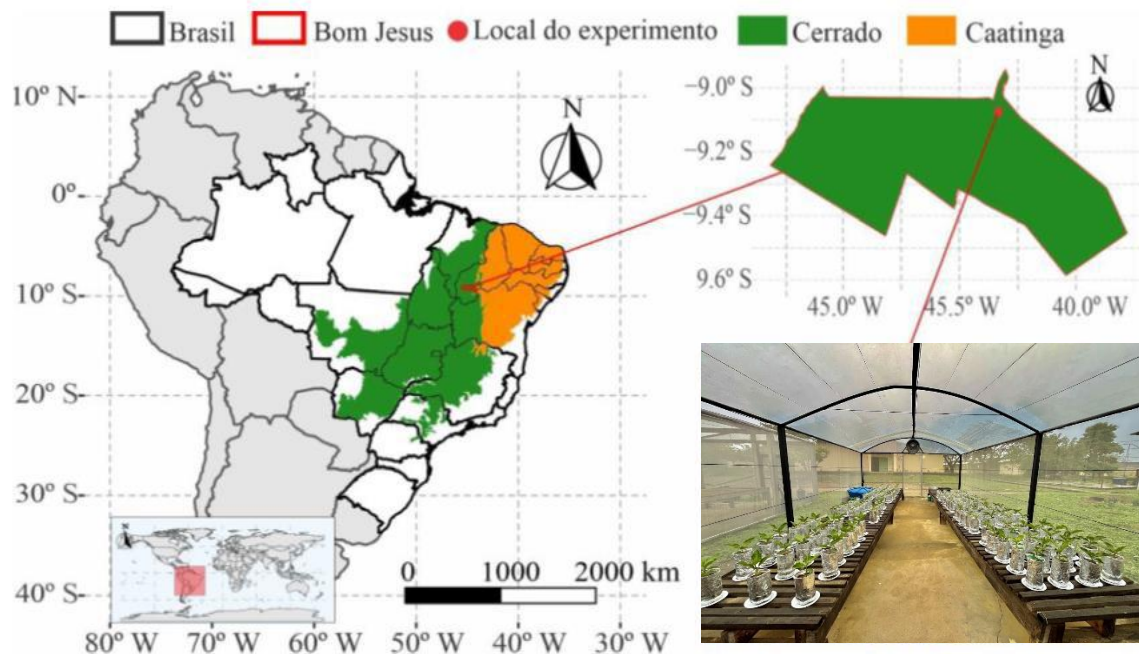


Figura 1 - Localização do local da realização do experimento em casa de vegetação situada na Universidade Federal do Piauí, Campus Professora Cinobelina Elvas, no município de Bom Jesus, Piauí.

Foram utilizadas sementes de maracujá-amarelo, especificamente da cultivar FB 200 Yellow Master. Para a obtenção das plântulas, a semeadura foi realizada na profundidade de aproximadamente 1,0 cm, em tubetes, preenchidos com substrato comercial “Carolina”, e diariamente umedecida visando a aclimação em estufa durante trinta dias. Logo após, as mesmas foram transplantadas para recipientes, com orifícios na base, com volume de 2 L, tendo como substrato areia lavada para retirada do excesso de sais, na base de cada vaso foi inserido um prato de polipropileno para retenção e reposição manual da solução nutritiva

O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados (DBC), com quatro repetições. Na etapa 1, utilizando-se 5 concentrações de Se: 0, 3, 6, 12 e 18 $\mu\text{mol L}^{-1}$, cada unidade experimental consistiu em quatro plantas cultivadas de forma individual em cada vaso. Enquanto que para a etapa 2, o experimento foi arranjado em esquema fatorial $5 \times 2 + 1$, constituído por: i) cinco concentrações de selênio 0, 3, 6, 12 e 18 $\mu\text{mol L}^{-1}$; ii) duas proporções de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$, de 70/30 e 100/0, considerando que os níveis de amônio causam toxicidade moderada e severa, respectivamente, utilizando a concentração total de N de 13 mmol L^{-1} , estabelecidas por Silva Júnior *et al.* (2020), as concentrações de nutrientes, incluindo amônio e nitrato, estão descritas na tabela 1, e, iii) o tratamento adicional sendo 50% na forma de amônio e 50% na forma de nitrato, indicado para a fase inicial de crescimento do maracujazeiro (Cunha *et al.*, 2024). As concentrações de nutrientes, incluindo amônio e nitrato, estão descritas na tabela 1.

Tabela 1 - Concentrações dos nutrientes na solução estresse em função das concentrações de N e proporções de NH_4^+ e NO_3^- .

$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$	Solução estoque (1 M)								
	Se	NH_4Cl	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	KH_2PO_4	KCl	MgSO_4	Micros*	Fe-EDDHMA**
(%)	$\mu\text{mol L}^{-1}$	mmol L^{-1}							
70/30	0,0	9,1	1,95	3,05	1,0	4,0	2,0	1,0	1,0
70/30	3,0	9,1	1,95	3,05	1,0	4,0	2,0	1,0	1,0
70/30	6,0	9,1	1,95	3,05	1,0	4,0	2,0	1,0	1,0
70/30	12,0	9,1	1,95	3,05	1,0	4,0	2,0	1,0	1,0
70/30	18,0	9,1	1,95	3,05	1,0	4,0	2,0	1,0	1,0
100/0	0,0	13,0	0,00	5,00	1,0	4,0	2,0	1,0	1,0
100/0	3,0	13,0	0,00	5,00	1,0	4,0	2,0	1,0	1,0
100/0	6,0	13,0	0,00	5,00	1,0	4,0	2,0	1,0	1,0
100/0	12,0	13,0	0,00	5,00	1,0	4,0	2,0	1,0	1,0
100/0	18,0	13,0	0,00	5,00	1,0	4,0	2,0	1,0	1,0

Micronutrientes utilizados (g L^{-1}): 2,86 g H_3BO_3 ; 1,81 g $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; 0,2 g; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 0,04 g $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; 0,02 g $\text{H}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ e Fe-EDDHMA = 0,082 g (Hoagland; Arnon, 1950).

A solução nutritiva original de Hoagland e Arnon (1950) foi adaptada para a realização do experimento, a fonte de ferro foi alterada para Fe-EDDHMA, além de ajustes nos tratamentos com nitrogênio e selênio. O NH_4^+ e o NO_3^- foram fornecidos, respectivamente como NH_4Cl e o $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, o Se foi adicionado na forma de selenito de sódio. Utilizou-se $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ para balancear as concentrações de cálcio em cada tratamento.

Para fornecer os demais macronutrientes foram utilizadas as fontes de KH_2PO_4 , KCl e $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; os micronutrientes utilizados podem ser consultados na Tabela 2. A solução nutritiva será mantida com valor pH 6,0.

Tabela 2 - Concentrações dos nutrientes na solução nutritiva em função das concentrações de N e proporções de NH_4^+ e NO_3^- .

As proporções de NH_4^+ e NO_3^-					
Concentração de N (mmol L ⁻¹)	Proporção de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$		KH_2PO_4	MgSO_4	KCl
	50/50				
	mmol L ⁻¹				
10	NH_4^+	5	1	2	4
	NO_3^-	2,5			

Micronutrientes utilizados (g L⁻¹): 2,86 g H_3BO_3 ; 1,81 g $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; 0,2 g; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 0,04 g $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; 0,02 g $\text{H}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ e Fe-EDDHMA = 0,082 g (Hoagland; Arnon, 1950).

Em seguida, o Se foi fornecido por meio da fonte selenito de sódio (Na_2SeO_3), contendo aproximadamente 46% de Se, considerando que as concentrações do elemento foram definidas conforme os tratamentos propostos, mantendo o fornecimento até o final do experimento, aos 90 dias de condução, correspondentes a etapa 2, a etapa 1 foi finalizada aos 53 dias após o transplântio.

As soluções estoques foram preparadas para os respectivos tratamentos e armazenadas em recipientes com capacidade para 5 litros, onde o volume necessário a ser aplicado era retirado diariamente. Para o preparo das soluções foi utilizada água deionizada.

Após os 53 dias de experimento, quando foi realizada a coleta de dados da etapa 1, deu-se início a aplicação de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ a 50% da concentração iônica, introduzindo o estresse amoniacal de forma controlada. Este passo visa avaliar a capacidade das plantas de tolerar e responder ao estresse após terem sido previamente fortalecidas pelo Se. Por fim, após 7 dias, a aplicação de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ será aumentada para 100% da concentração iônica, observando-se a evolução dos tratamentos e da sintomatologia pela diagnose visual das folhas.

A aplicação inicial do selênio antes da introdução do estresse amoniacal foi uma estratégia utilizada para permite que as plantas se beneficiassem das propriedades protetoras do selênio.

3.2 Etapa I: Concentrações de Se na modulação do aparato fotossintético, na nutrição e no crescimento inicial do maracujazeiro-amarelo

Na etapa I, foi observado como as plantas regulavam as concentrações de Se na parte aérea do maracujazeiro-amarelo, e como estas estimulavam a eficiência fotossintética e os parâmetros de crescimento inicial, como o crescimento relativo de plantas em altura e diâmetro do caule.

3.2.1 Variáveis analisadas

Enquanto o experimento era conduzido, foram realizadas avaliações do crescimento relativo do maracujazeiro-amarelo, assim como as trocas gasosas, monitorando os efeitos dos tratamentos até a definição do ponto de coleta do material vegetal para realização das análises destrutivas.

3.2.1.1 Taxa de crescimento relativo

Os parâmetros biométricos foram avaliados em intervalos pré-determinados, após 15 e 30 dias da aplicação de Se (correspondendo a 45 e 60 dias após o transplântio das plantas). Para medir o diâmetro do caule foi usado um paquímetro digital (modelo MPD-200 – Metrotools® capacidade de 200 mm e precisão de 0,01 mm) com a medição feita a 2 cm da base do caule. A altura da planta foi medida entre a base do caule até o ponto onde a folha mais nova estava inserida com uma trena milimetrada. Após a obtenção dos dados, foram determinadas as taxas de crescimento relativo em altura (TCRAP) e diâmetro do caule (TCRDC), conforme as equações 1 e 2, seguindo a metodologia de Benincasa (2003).

$$TCRAP = \frac{\ln AP2 - \ln AP1}{T2 - T1} \quad (\text{Eq.1})$$

$$TCRDC = \frac{\ln DC2 - \ln DC1}{T2 - T1} \quad (\text{Eq. 2})$$

Sendo: TCRA - taxa de crescimento relativo em altura de plantas ($\text{cm cm}^{-1} \text{ d}^{-1}$); AP1 - altura da planta no tempo T_1 (cm); AP2 - altura da planta no tempo T_2 (cm); TCRD - taxa de crescimento relativo caulinar em diâmetro ($\text{mm mm}^{-1} \text{ d}^{-1}$); DC1 - diâmetro do caule no tempo T_1 (mm) DC2 - diâmetro do caule no tempo T_2 (mm); T_1 - início do período de determinação da taxa de crescimento relativo; T_2 - final do período de determinação da taxa de crescimento relativo; ln - logaritmo neperiano.

3.2.1.2 Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a

As trocas gasosas foram medidas 30 dias após a aplicação dos tratamentos de Se tomando a terceira folha completamente formada, a partir do ápice, utilizando um analisador de gás infravermelho (IRGA) acoplado a um fluorômetro (IRGA, Walz-GFS3000). As medições foram realizadas sob concentração constante de CO_2 e densidade de fluxo de fótons fotossintéticos ($\sim 400 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ e $1000 \mu\text{mol fótons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente) das 08:00

às 11:00 h. Os parâmetros de trocas gasosas incluíram a taxa de assimilação de CO₂ (*A*), condutância estomática (*g_s*), taxa de transpiração (*E*) e a concentração de CO₂ intercelular (*C_i*). Ademais, foi estimada a eficiência instantânea de carboxilação pela razão *A/C_i*, como também, a eficiência no uso da água (WUE) pela razão *A/E*.

As medições de fluorescência da clorofila *a* também foram feitas fazendo uso de um fluorômetro em conjunto ao IRGA em plantas que haviam sido mantidas no escuro por um período de 12 horas. Com a obtenção dos dados de fluorescência, foram estimados os parâmetros fotoquímicos foram: rendimento quântico máximo do PSII [$F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$], rendimento quântico efetivo do PSII [$\Phi_{PSII} = (F_m' - F_s)/F_m'$], extinção fotoquímica [$qP = (F_m' - F_s)/(F_m' - F_o')$] e não fotoquímica [$NPQ = (F_m - F_m')/F_m'$], taxa de transporte de elétrons ($ETR = \Phi_{PSII} \times PPFD \times 0,5 \times 0,84$) e excesso relativo de energia no nível do PSII [$Exc = F_v/F_m - (\Phi_{PSII}/F_v/F_m)$] (Baker; Rosenqvist, 2004).

3.2.1.3 Pigmentos fotossintéticos

A quantificação dos pigmentos fotossintéticos (clorofila *a*, *b*, total e carotenoides) Seguiu o método detalhado por Wellburn (1994). Três discos foliares foram imergidos em uma solução de dimetilsulfóxido (DMSO) saturada com carbonato de cálcio (CaCO₃). Após 48 horas no escuro, a absorbância foi medida a 665, 649 e 480 nm. Os teores dos pigmentos foram determinados usando as seguintes equações: Chl *a* = (12,47 × A₆₆₅) – (3,62 × A₆₄₉); Chl *b* = (25,06 × A₆₄₉) – (6,50 × A₆₆₅); Chl (*a* + *b*) = (7,15 × A₆₆₅) – (18,71 × A₆₄₉); Carotenóides = [(1000 × A₄₈₀) – (1,29 × Chl *a*) – (53,78 × Chl *b*)]/220.

3.2.1.4 Determinação do Se e macronutrientes

A leitura do Se é realizada pelo método de espectrofotometria de absorção atômica (EAA), onde o Se da solução é aspirado na chama de ar-acetileno transformando-se em estado fundamental, absorvendo a luz na região de 213,9 nm. A absorção é linear até 2 mg L⁻¹ de Se da solução conforme descrito por Silva e Queiroz (2009). A concentração do Se foi determinada usando a seguinte equação: Se mg kg⁻¹ = mg L⁻¹ × 50. A determinação dos macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) também seguiram a metodologia estabelecida por Bataglia *et al.* (1983).

3.3 Etapa II: Concentrações de Se atenuando a toxicidade amoniacal do maracujazeiro-amarelo em fase inicial de crescimento

Na etapa II, foi observado como as concentrações de Se atuavam frente as plantas sob condições de toxicidade amoniacal nas folhas novas, folhas velhas, caule e raiz do maracujazeiro-amarelo.

3.3.1 Variáveis analisadas

Ao final da condução do experimento, após a definição do ponto de coleta do material vegetal para realização das análises destrutivas, foi realizada análise de acúmulo e eficiência do Se e íons inorgânicos frente a toxicidade amoniacal de plantas de maracujazeiro-amarelo.

3.3.1.1 Acúmulo e eficiência do uso do Se

A leitura do Se foi realizada pelo método de espectrofotometria de absorção atômica (EAA), conforme descrito no tópico 3.2.1.4.

3.3.1.2 Acúmulo de íons inorgânicos

Para a determinação dos íons inorgânicos (NO_3^- e NH_4^+) foram preparados extratos aquosos a partir de tecidos liofilizados do maracujazeiro-amarelo, sendo raiz, caule e folhas. Os teores de NO_3^- foram quantificados conforme o método descrito por Cataldo *et al.* (1975), por meio da leitura de absorbância em 410 nm com KNO_3 como padrão. Já o conteúdo de NH_4^+ foi determinado segundo Weatherburn (1967), com base na leitura de absorbância a 625 nm com um padrão $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

3.4 Análise estatística

Para ambas as etapas, os dados qualitativos foram testados quanto à normalidade através do teste de Shapiro-Wilk, a homogeneidade de variância pelo teste de Bartlett, e quanto à independência dos erros usando a análise gráfica dos resíduos, estes requisitos sendo atendidos, foram submetidos à análise de variância. As médias foram agrupadas pelo teste de Skott-Knott a um nível de probabilidade de 5% ($p < 0,05$) (Borges; Ferreira, 2003). As análises estatísticas,

geração de gráficos e demais análises de dados foram realizadas usando o software R versão 4.4.0 (R Core Team, 2024).

4 RESULTADOS

4.1 Teor de Se nos tecidos foliares

O gráfico apresenta com clareza que, conforme se fornece diferentes concentrações de Se no substrato inerte observa-se um incremento no teor do Se nos tecidos foliares vegetais do maracujazeiro (Figura 2). Analisando separadamente cada concentração aplicada, foi detectada a presença de Se nas folhas da testemunha, mesmo não havendo aplicação na mesma, contudo essa porcentagem é significativamente inferior às plantas com doses tratadas, podendo ser oriunda da água ou do substrato. A adição de Se na concentração de 3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ não apresentou resultado significativo na absorção foliar desse elemento, indicando que tal concentração possui efeito modesto, não sendo suficiente para causar alterações nutricionais e fisiológicas significativas no tecido foliar da planta.

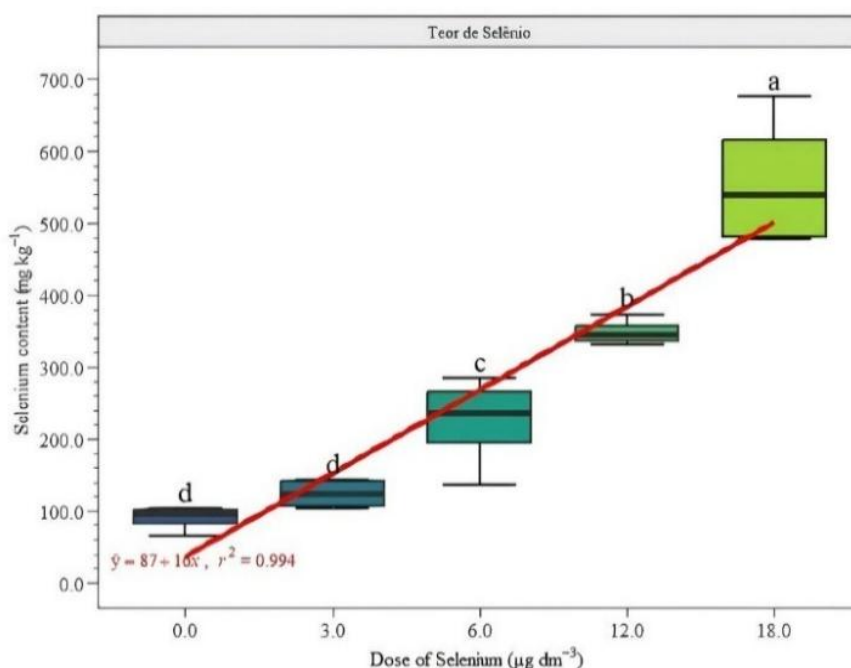


Figura 2 - Teor de Se na folha de plantas de maracujazeiro-amarelo submetidas a diferentes concentrações de selênio.

Com o aumento da concentração para 6 $\mu\text{mol L}^{-1}$ já se obtém uma resposta mais expressiva, a planta demonstrou uma maior eficiência de absorção foliar, evidenciando que na concentração de 6 $\mu\text{mol L}^{-1}$ já promove modificação de forma expressiva no conteúdo de selênio nos tecidos foliares. Nas concentrações de 12 e 18 $\mu\text{mol L}^{-1}$ é constatado um crescimento do teor de Se no tecido foliar, indicando assim que a planta da continuidade ao

processo de absorção do elemento de acordo com a concentração fornecida. O tratamento de $18 \mu\text{mol L}^{-1}$ é a concentração que proporciona maior percentual de Se nas folhas, constatando que o maracujazeiro possui uma alta capacidade de absorção de Se (Figura 2).

4.2 Presença do Se diminui o teor de macronutrientes foliares

Os teores de nitrogênio (N) e fósforo (P) não apresentaram uma diferença significativa quanto ao aumento da concentração de Se, mantendo valores constantes (Figura 3a, b), indicando que o fornecimento de Se não interfere na absorção desses macronutrientes pelas plantas de maracujazeiro-amarelo, mesmo nas concentrações mais elevadas.

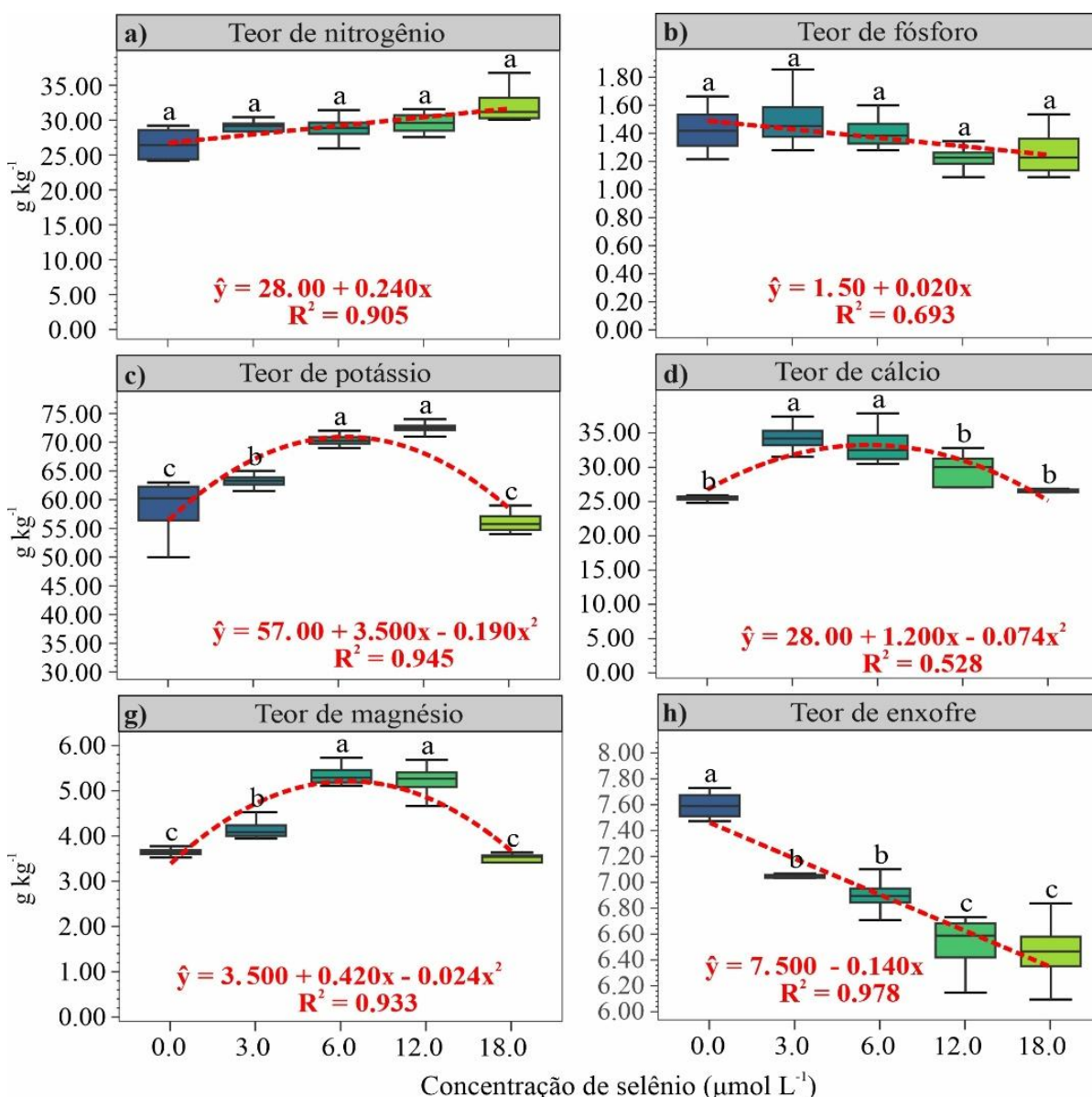


Figura 3 - Teor dos macronutrientes nitrogênio (a), fósforo (b), potássio (c), cálcio (d), magnésio (g) e enxofre (h) nas folhas de plantas de maracujazeiro-amarelo submetidas a diferentes concentrações de selênio.

Os teores de potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) seguem um comportamento semelhante, onde ocorre uma tendência de aumento inicial de seus teores até a concentração de $6 \mu\text{mol L}^{-1}$, seguida de uma queda significativa, devido ao aumento das concentrações de Se (Figura 3c, d, g).

Quanto ao teor de enxofre (S) é observado resultados opostos, no qual ocorre uma queda acentuada em seus valores proporcional ao aumento das concentrações de Se (Figura 3h).

4.3 Eficiência da maquinaria fotossintética

O acúmulo de pigmentos fotossintéticos obteve ajuste distinto para cada concentração de Se estudada. Os teores de clorofila *a*, clorofila total e carotenoides apresentaram resultados crescentes até as concentrações de 10 a $12 \mu\text{mol L}^{-1}$, sendo que valores superiores resultam em diminuição dos percentuais apresentados (Figura 4a, c, d).

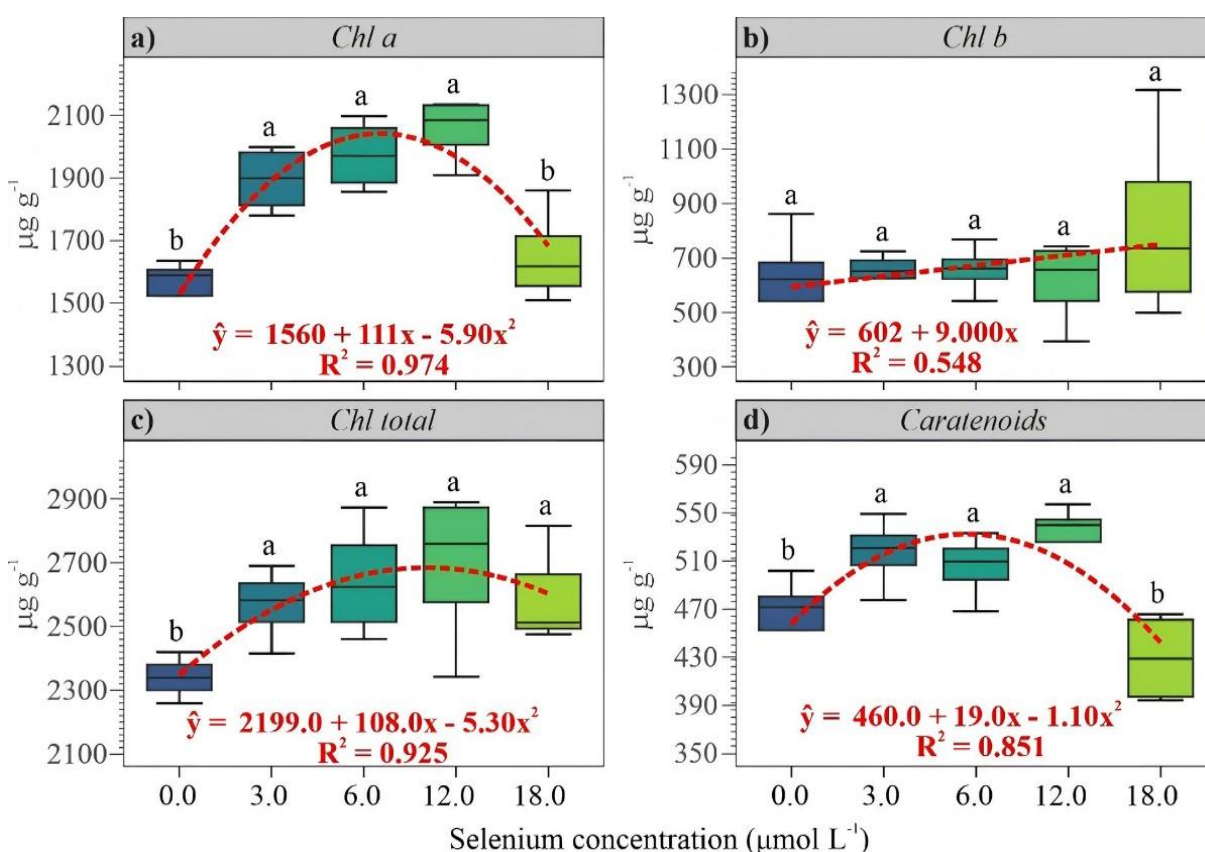


Figura 4 - Teor de clorofila *a* (a), clorofila *b* (b), clorofila total (c), e carotenoides (d) de plantas de maracujazeiro-amarelo sob diferentes concentrações de selênio.

O Se melhora a síntese e a estabilização da clorofila *a*, os níveis da clorofila total, aumentando a eficiência fotossintética e, também proporciona aumento da síntese de

carotenoides, que desempenha um papel fundamental na fotorrespiração das plantas, contribuindo para o equilíbrio na absorção de luz, esses pigmentos ajudam a dissipar o excesso de energia luminosa e de elétrons que estão excitados, prevenindo danos às estruturas fotossintéticas. Em condições de alta intensidade luminosa, sua atuação é essencial para evitar a fotoinibição, protegendo o aparelho fotossintético contra o estresse oxidativo. No entanto, concentrações mais altas de Se reduziu os níveis de clorofila *a*, clorofila total e carotenoides, tal resultado sugere não apenas a presença de toxicidade, mas também a degradação da clorofila e possíveis danos à maquinaria fotossintética (Figura 4a, c, d).

O teor de clorofila *b* apresentou um aumento contínuo com o uso das concentrações de Se. Apresentando uma sensibilidade menor aos possíveis efeitos tóxicos do Se nas concentrações mais elevadas, isso pode ser um indicativo que a clorofila *b* pode se adaptar em condições de estresse de Se (Figura 4b).

As variáveis fotossintéticas analisadas, eficiência do PSII (F_v/F_m), rendimento quântico do PSII (Φ_{PSII}), coeficiente de extinção fotoquímica (qP), dissipação não fotoquímica (NPQ), eficiência de excitação (EXC) e a taxa de transporte de elétrons (ETR), obtiveram melhora significativa da eficiência fotossintética, dissipação e no transporte de elétrons, apresentando uma melhor performance fotossintética, nas concentrações de aproximadamente 10 a 12 $\mu\text{mol L}^{-1}$. Concentrações mais elevadas do Se resulta no declínio da atividade fotossintética, indício que o excesso do Se pode vir a acarretar estresse fotoinibitório, prejudicar a eficiência do PSII, comprometer a capacidade de dissipação da energia e diminuir a velocidade com que os elétrons são transportados, resultando em uma eficiência fotossintética inferior (Figura 5).

A fotossíntese líquida (*A*), transpiração (*E*), condutância estomática (*g_s*) e concentração interna de CO_2 (*C_i*) apresentam aumento em suas taxas até a concentração de aproximadamente 12 $\mu\text{mol L}^{-1}$, ocorrendo declínio com aumento da concentração de Se, no intervalo de 15 dias após sua aplicação (Figura 6a, c, e, g). Concentrações equilibradas de Se aumentam a taxa fotossintética, sugerindo que quando em níveis adequados o Se pode estimular a atividade fotossintética das plantas de maracujazeiro-amarelo, melhorar a transpiração, refletindo em uma regulação estomática mais equilibrada e ocorrência de uma taxa maior de trocas gasosas. Por outro lado, concentrações mais altas causam inibição do processo fotossintético, indicando possível toxicidade, a taxa de transpiração diminui, apontando que o Se em concentrações mais altas pode causar estresse e afetar negativamente a capacidade da planta de regular a perda de água (Figura 6a, c).

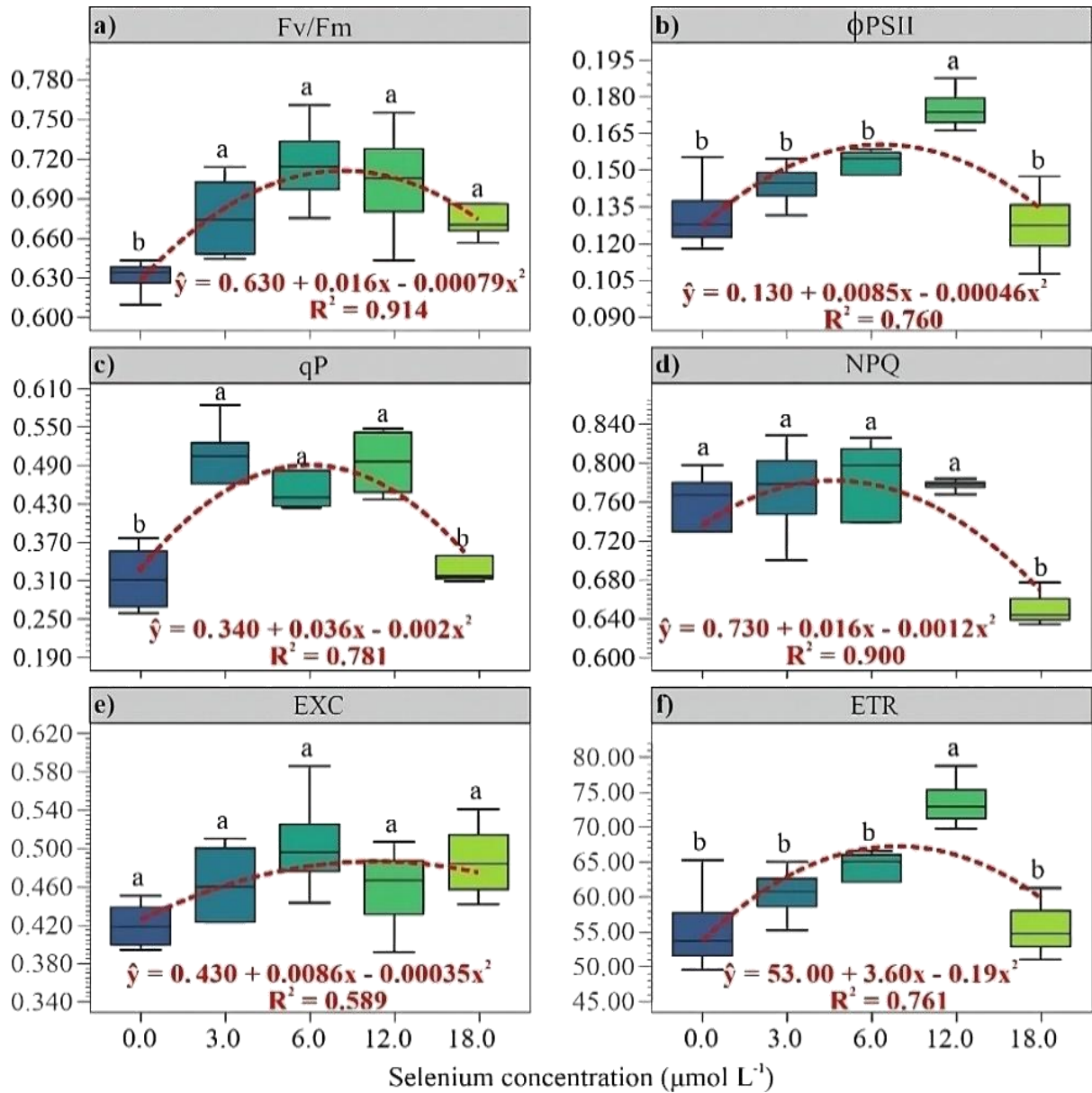


Figura 5 - Eficiência máxima do fotossistema II (PSII, a), eficiência efetiva do PSII (b), coeficiente de extinção fotoquímica (c) e não fotoquímica (d), excesso de energia no PSII (e), e taxa de transporte de elétrons (f) de plantas de maracujazeiro-amarelo sob diferentes concentrações de selênio.

A condutância estomática elevada em concentrações moderadas de Se sugere que os estômatos estão mais abertos, permitindo assim que ocorra uma maior troca de gases (CO₂ e H₂O). Em concentrações mais altas, a condutância diminui, indicando o fechamento estomático devido a estresse (Figura 6e). As concentrações equilibradas de Se aumenta a disponibilidade interna de CO₂ para a fotossíntese. Em níveis mais altos, a redução de Ci indica que a fotossíntese pode estar sendo limitada, devido ao fechamento estomático (Figura 6g).

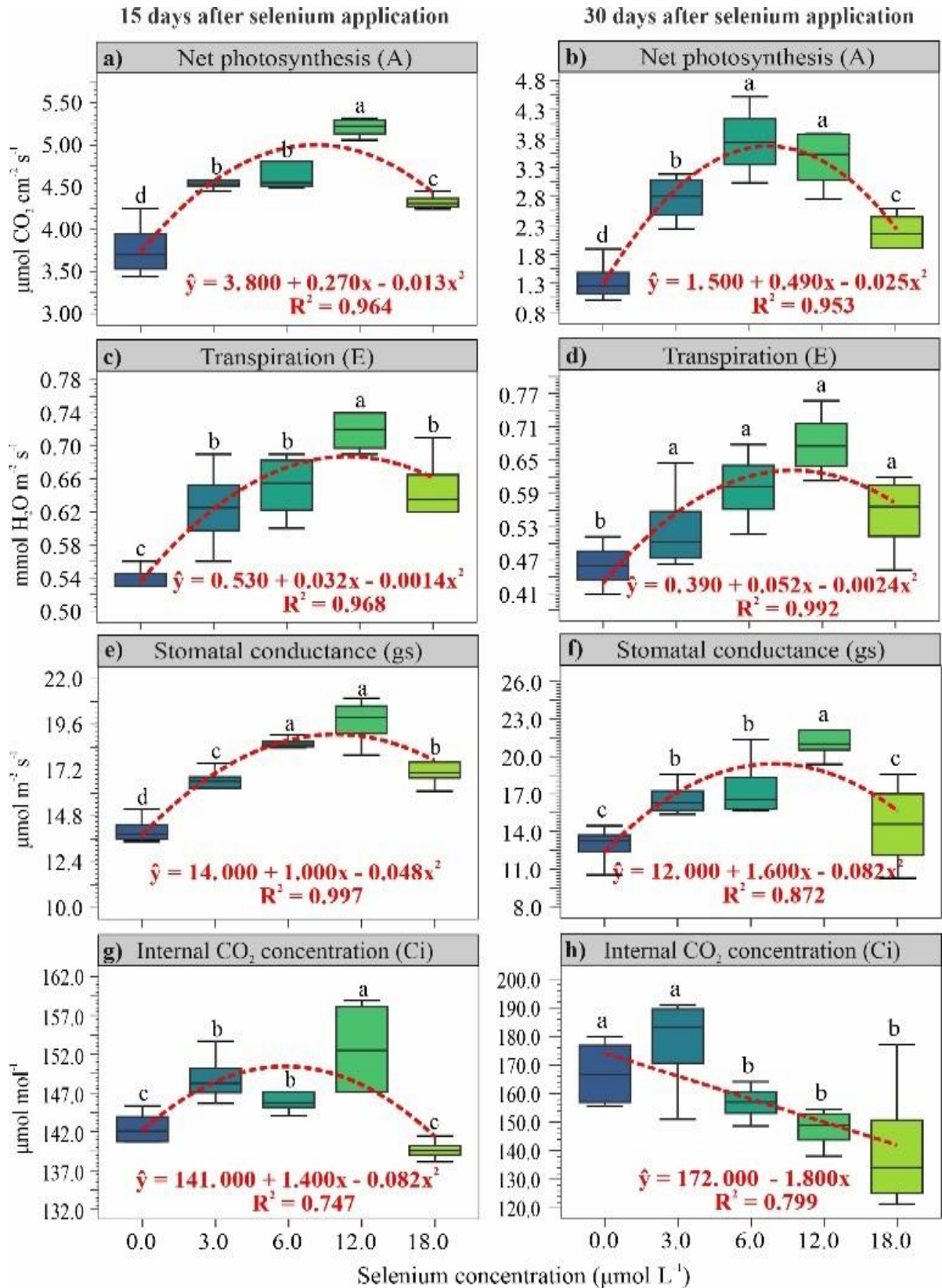


Figura 6 – Taxas de fotossíntese líquida (a, b), transpiração (c, d), condutância estomática (e, f), e concentração interna de CO₂ (g, h) de plantas de maracujazeiro-amarelo após 15 (a, c, e, g) e 30 dias (b, d, f, h) da aplicação dos tratamentos com diferentes concentrações de selênio.

Com 30 dias da aplicação do Se, as variáveis analisadas, com exceção da C_i , obtiveram aumento em suas taxas até aproximadamente $6 \mu\text{mol L}^{-1}$. Mostrando que as taxas são mais sensíveis e otimizadas em concentrações mais baixas do Se, quando comparado ao período de 15 dias. Essa redução das taxas nas concentrações mais elevadas, sugere que a toxicidade do Se pode resultar em efeitos mais pronunciados a longo prazo (Figura 6b, d, f). Enquanto para a C_i resultou em uma queda progressiva com o aumento da concentração de Se, sugerindo que mesmo em doses baixas, o selênio afeta a C_i , resultando no fechamento estomático e, conseqüentemente, na menor entrada de CO_2 nas folhas (Figura 6h).

A capacidade de carboxilação instantânea (A/C_i) aos 15 dias de aplicação do Se tem um aumento inicial, atingindo um pico em torno de $12 \mu\text{mol L}^{-1}$, resultando no aumento da eficiência da carboxilação, ocorrendo otimização da atividade da enzima Rubisco, crucial para a fixação de carbono na fotossíntese. Concentrações superiores à de $12 \mu\text{mol L}^{-1}$ se tornam prejudiciais (Figura 7a). A eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s) reduziu com o aumento da concentração de Se (Figura 7c), sugerindo que o Se não apresenta contribuição para a A/g_s . Em relação a eficiência instantânea do uso da água (A/E) apresenta um aumento até a concentração $6 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se (Figura 7e), inicialmente o Se melhora a fotossíntese em relação à transpiração, tornando a planta mais eficiente quanto ao uso de água.

A longo prazo, os efeitos benéficos do Se podem passar a se tornar deletérios, os efeitos positivos do Se, em concentrações mais baixas, são mais sustentáveis, sendo constatado tais resultados nos 30 dias após a aplicação de Se nas plantas de maracujazeiro-amarelo. A capacidade de carboxilação ainda apresenta aumento com o uso do Se, porém, a sua alta eficiência diminui para uma concentração mais baixa, aproximadamente $6 \mu\text{mol L}^{-1}$ (Figura 7b). Quanto a eficiência intrínseca do uso de água, contrariando o que foi encontrado nos 15 dias de aplicação, apresenta aumento até uma concentração de $6 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se, concentrações superiores a esse valor causa efeitos adversos diminuindo tal eficiência (Figura 7d). A eficiência instantânea do uso de água apresenta resultados semelhantes ao que foi encontrado nos 15 dias de aplicação do Se, sendo que o pico de eficiência ocorreu em concentrações mais baixas de Se e apresentou uma posterior redução em concentrações mais altas desse elemento (Figura 7f).

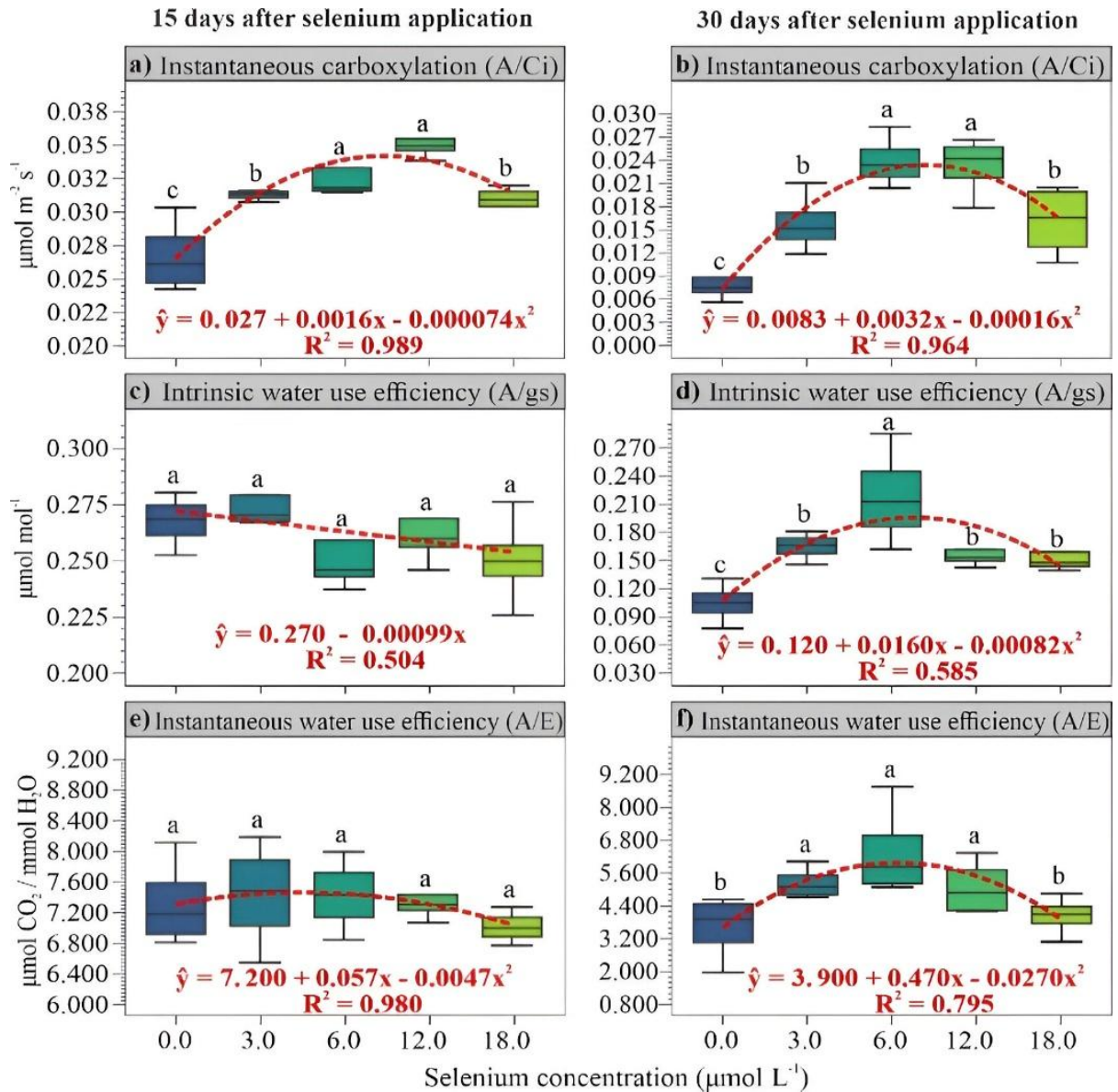


Figura 7 – Eficiência de carboxilação da Rubisco (a, b), eficiência intrínseca do uso da água (c, d), e eficiência instantânea do uso da água (e, f) de plantas de maracujazeiro-amarelo após 15 (a, c, e) e 30 dias (b, d, f) da aplicação dos tratamentos com diferentes concentrações de selênio.

4.4 Crescimento inicial

A taxa de crescimento relativo da altura das plantas apresentou aumento nas concentrações de até $12 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se. Em concentrações superiores a essa, observa-se redução da taxa de crescimento, no período de 15 dias de aplicação do Se (Figura 8a). As respostas ótimas até a concentração de $12 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se, indica que o mesmo tem capacidade de acelerar o crescimento do maracujazeiro-amarelo em sua fase inicial. A redução do crescimento nas concentrações a partir de $6 \mu\text{mol L}^{-1}$ aponta que concentrações mais elevadas

do Se podem ser tóxicas para as plantas de maracujazeiro-amarelo, podendo inibir os processos de alongamento celular. Com 30 dias de aplicação do Se as plantas de maracujazeiro-amarelo tornam-se mais sensíveis quanto ao seu uso, onde os efeitos positivos se sustentam até 6 $\mu\text{mol L}^{-1}$, sendo que doses superiores diminuem o crescimento das plantas (Figura 8d).

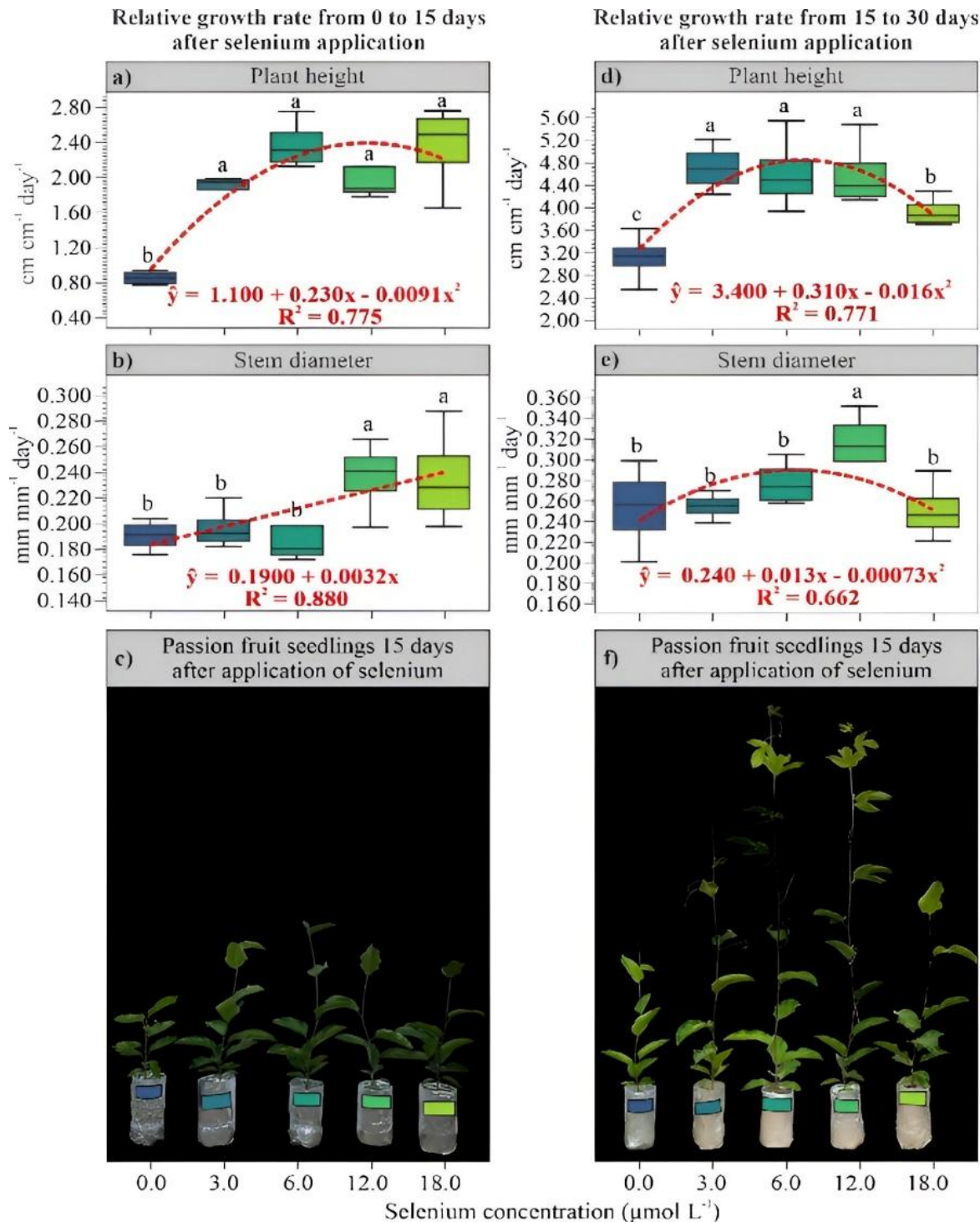


Figura 8 - Altura de plantas (a, d), e diâmetro do caule (b, e), e aparência fenotípica (c, d) de plantas maracujazeiro-amarelo após 15 (a, b, c) e 30 dias (d, e, f) da aplicação dos tratamentos com diferentes concentrações de selênio.

Aos 15 dias de aplicação do Se, a taxa de crescimento relativo em diâmetro do caule das plantas tem aumento progressivo juntamente com o aumento das concentrações de Se (Figura 8b). As concentrações de Se de até aproximadamente $6 \mu\text{mol L}^{-1}$, nos 30 dias de aplicação, os tratamentos aumentaram a espessura do caule de maracujazeiro-amarelo, com uma queda elevada em concentrações mais altas de Se (Figura 8d). A redução do crescimento do diâmetro em maiores concentrações sugere que o excesso de Se interfere de forma negativa na divisão celular.

Em menores concentrações, de 3 a $12 \mu\text{mol L}^{-1}$, o Se promove o crescimento das plantas de macarujazeiro-amarelo e, contrastando com menor crescimento das plantas em concentrações mais elevadas desse elemento (Figura 8c). Aos 30 dias, tais efeitos se tornam ainda mais evidentes, os efeitos benéficos das concentrações moderadas persistem e, nas concentrações mais elevadas os impactos negativos tornam-se mais evidentes (Figura 8f).

4.5 Concentrações de Se sob proporções de NH_4^+ e NO_3^-

O acúmulo de Se nas raízes foi maior na proporção de 100/0 em todas as doses de Se, especialmente nas mais elevadas, de 12 a $18 \mu\text{mol L}^{-1}$, sugerindo que a forma amoniacal do N favorece a absorção e retenção do Se nas raízes das plantas de maracujazeiro-amarelo, provavelmente por causar alteração no pH da rizosfera, o que ajuda o Se a ficar mais disponível para ser absorvido. O tratamento 70/30 apresentou valores intermediários (Figura 9a).

No caule, o conteúdo de Se apresentou resultados semelhantes aos que foram encontrados para a raiz, com maiores acúmulo na proporção de 100/0 e valores mais reduzidos no tratamento 70/30, demonstrando que o amônio não só facilita a absorção do Se pelas raízes, mas também o seu transporte até o caule (Figura 9b).

Para as folhas jovens, o acúmulo de Se foi mais baixo quando comparado as raízes e caules, mesmo na dose de $18 \mu\text{mol L}^{-1}$, é possível observar que as maiores concentrações de Se ocorreu nas doses mais baixas, até $12 \mu\text{mol L}^{-1}$, na proporção de 70/30, em doses mais elevadas o acúmulo de Se tende a cair, apontando que a planta limita a translocação para os tecidos novos (Figura 9c).

O comportamento do Se nas folhas velhas foi distinto das demais partes da planta, havendo um acúmulo expressivo do Se em todas as doses, especialmente nas intermediárias, de 6 a $12 \mu\text{mol L}^{-1}$, na proporção de 70/30, enquanto na proporção de 100/0 o acúmulo foi bastante inferior (Figura 9d), as folhas velhas são o destino do Se, o efeito é notável, especialmente sob uma nutrição nitrogenada mais equilibrada, com a proporção de 70/30.

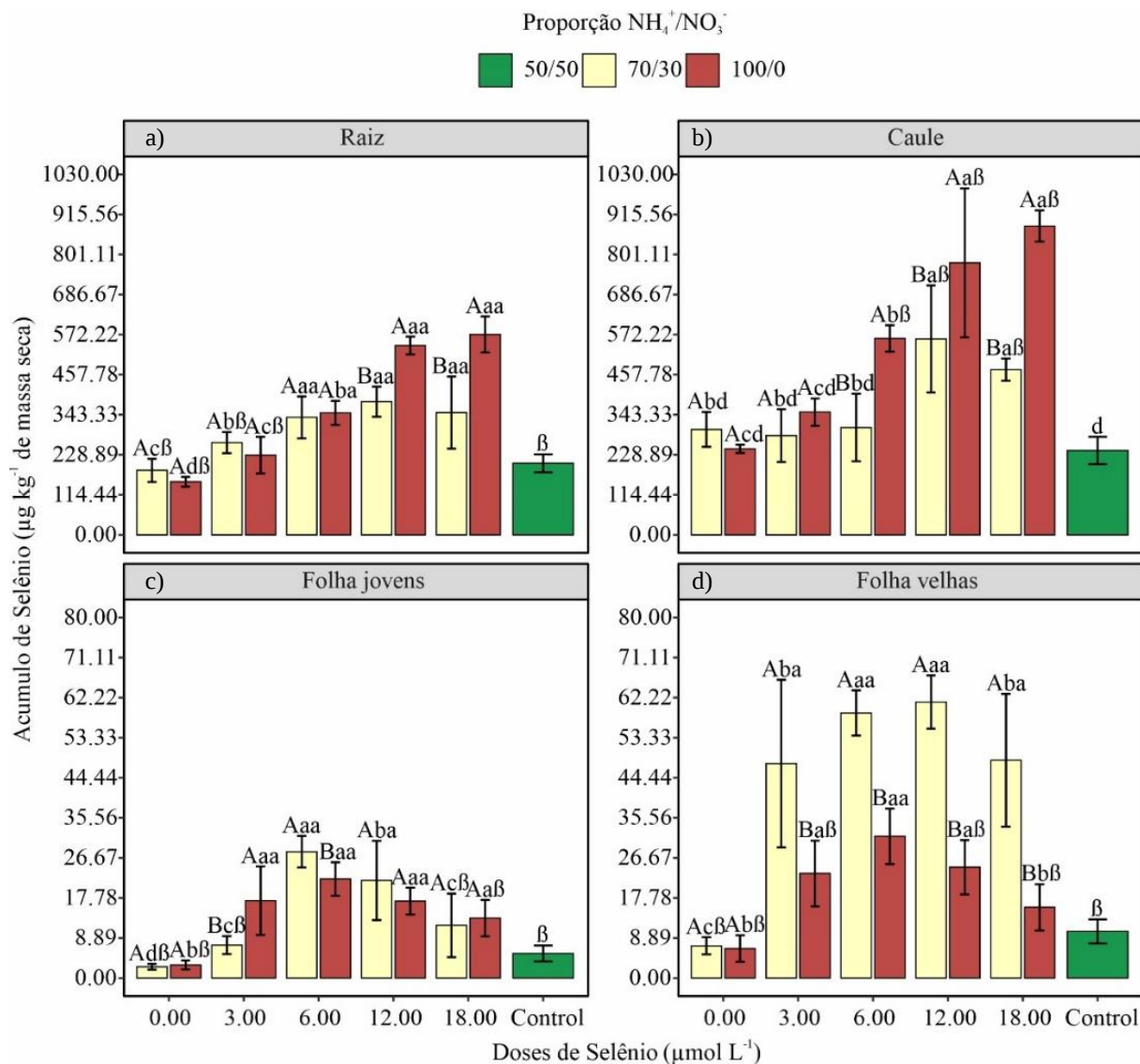


Figura 9 - Acúmulo de Se na raiz (a), caule (b), folhas novas (c) e folhas velhas (d) de plantas de maracujazeiro-amarelo submetidas a diferentes concentrações de selênio e proporções de NH_4^+ e NO_3^- .

4.6 Acúmulo de NH_4^+ e NO_3^- nas plantas tratadas com concentrações de Se

É observado que o maior acúmulo de NH_4^+ na raiz, na proporção 100/0, ocorreu principalmente nas concentrações mais baixa de Se, de $3 \mu\text{mol L}^{-1}$, observa-se uma leve redução nas doses superiores de Se, indicando que as concentrações de Se causa inibição na absorção ou translocação do amônio (Figura 10a). Quanto ao NO_3^- o acúmulo foi menor na proporção 100/0, justamente pela ausência de nitrato na solução, o maior acúmulo foi na proporção 70/30, com aumento contínuo de acordo com as concentrações de Se. Isso sugere que a presença de NO_3^- na solução, juntamente com quantidades equilibradas de NH_4^+ para estimular absorção, favoreceu a assimilação radicular de nitrato (Figura 10b).

O comportamento do NH_4^+ observado no caule foi semelhante ao da raiz, ocorrendo maior acúmulo na proporção 100/0, principalmente a concentração controle e na de $3 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se. Esse resultado demonstra que o amônio foi translocado até o caule com certa eficiência nessas concentrações. Nas doses mais altas (6, 12 e $18 \mu\text{mol L}^{-1}$), o acúmulo diminuiu, isso indica que a presença de Se inibiu a absorção de NH_4^+ (Figura 10c). O acúmulo de NO_3^- foi superior nas proporções 70/30 e 50/50, especialmente na concentração de $12 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se. O Se estimulou a absorção e translocação do nitrato até certo ponto, mas, novamente, em concentrações mais elevadas de Se houve redução, indicando um efeito inibitório em doses altas (Figura 10d).

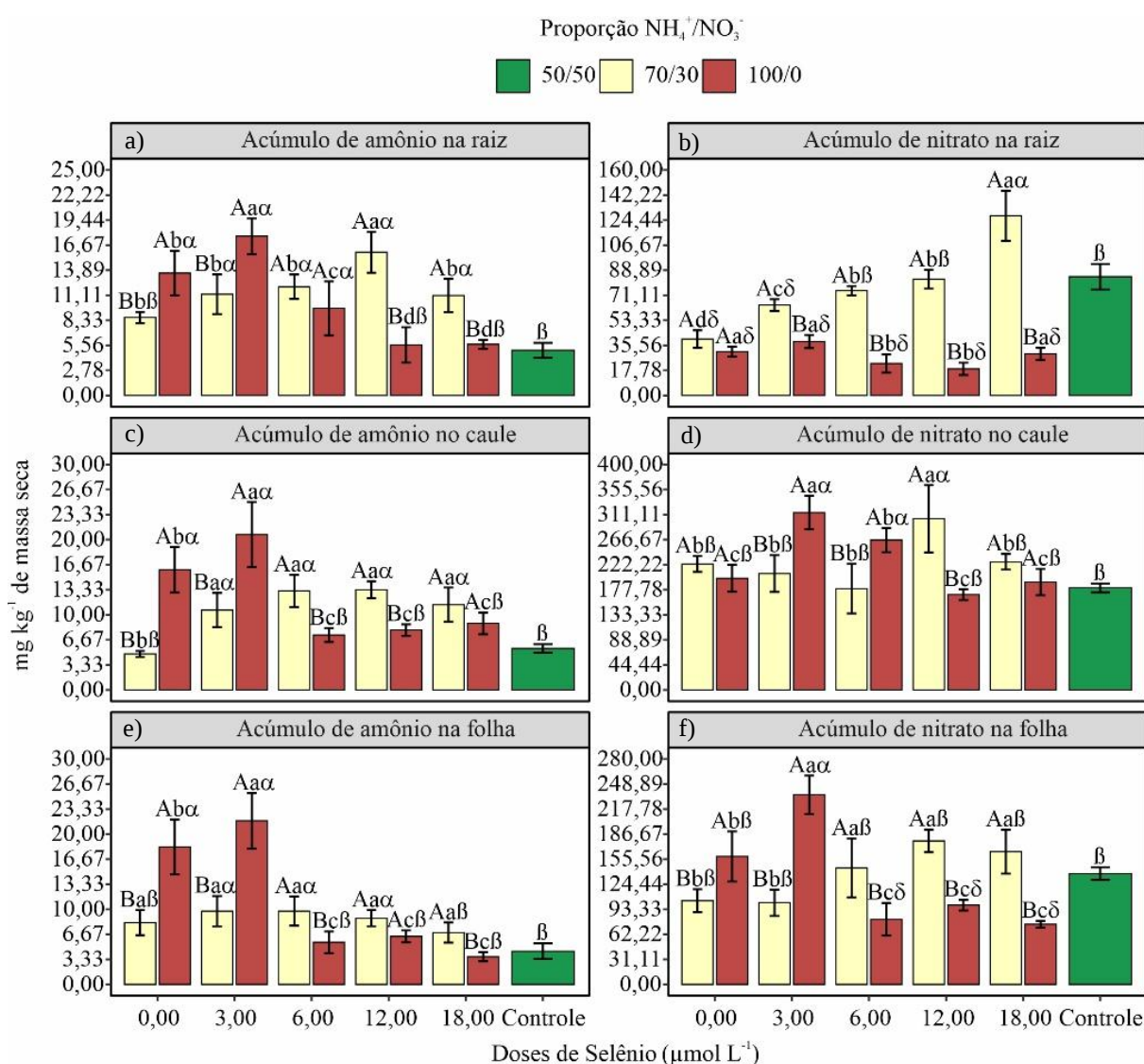


Figura 10 - Acúmulo de NH_4^+ e NO_3^- na raiz (a, b), caule (c, d) e folhas (e, f) de plantas de maracujazeiro-amarelo submetidas a diferentes concentrações de selênio e proporções de NH_4^+ e NO_3^- .

Nas folhas, o acúmulo de NH_4^+ seguiu a mesma tendência geral, mais elevado com a proporção 100/0, na concentração de $3 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se. Entretanto, os valores nas doses mais altas (12 e $18 \mu\text{mol L}^{-1}$) caíram bastante, reforçando a hipótese dos efeitos benéficos/antioxidantes proporcionado pelo Se, causando inibição no transporte e acúmulo de NH_4^+ nas partes aéreas (Figura 10e). O nitrato se acumulou mais nas folhas nas proporções 70/30 e 50/50, especialmente nas concentrações de 3 , 6 e $12 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se. Isso indica que essas condições favoreceram a mobilização de NO_3^- até as folhas (Figura 10f).

5 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste estudo reforçam as evidências científicas já descritas na literatura quanto ao potencial do Se em promover melhorias fisiológicas, bioquímicas e de crescimento em plantas, quando aplicado em concentrações adequadas, comprovado por Huang *et al.* (2023), onde afirma que o uso do Se na agricultura tem potencial de promover melhorias na produção agrícola. A elevação do teor de Se nos tecidos foliares do maracujazeiro-amarelo em resposta ao aumento das doses aplicadas demonstra a capacidade da planta em absorver esse elemento de forma eficiente, principalmente nas doses de 6 a 12 $\mu\text{mol L}^{-1}$.

No setor de produção secundária, as plantas e os microrganismos absorvem o Se do solo e o utilizam para formar matéria orgânica contendo Se, promovendo o crescimento e o desenvolvimento dos vegetais (Tessier *et al.*, 1995). A concentração de 3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Se não foi suficiente para promover mudanças expressivas na absorção foliar, enquanto doses superiores, especialmente 6 $\mu\text{mol L}^{-1}$, resultaram em aumentos notáveis no acúmulo foliar, indicando um limiar mínimo para efeitos fisiológicos relevantes, no entanto, concentrações excessivas podem resultar em efeitos inibitórios, como observado nas doses mais altas em diversas variáveis analisadas, conforme apontado por Mangiapane, Pessione e Pessione (2014), onde em concentrações ideais, o Se estimula o crescimento das plantas, e o inibe em concentrações mais elevadas.

Foi notado um incremento no acúmulo de pigmentos fotossintéticos, com exceção da clorofila *b*, em função do Se, com o pico ocorrendo em concentrações próximas de 10 a 12 $\mu\text{mol L}^{-1}$, concordando com resultados de estudos com outras culturas, onde o Se favorece o crescimento e eleva o conteúdo de pigmentos fotossintéticos em azedinha (*Rumex patientia* $\times$ *R. tianshanicus*) (Xue *et al.*, 2001), alface (*Lactuca sativa*) (Kong; Wang; Bi, 2005), sorgo (*Sorghum bicolor*) (Akbulut; Cakir, 2010) e cevada (*Hordeum vulgare*) (Djanaguiramán *et al.*, 2010). Essa melhora também foi encontrada nos fotossistemas I e II (PSI e PSII) de culturas de pera, uva e pêssego, sugerindo assim que o Se pode promover melhorias na fotossíntese e proteção do PSII de frutíferas. O elemento também aumenta a taxa de fotossíntese líquida, diminui a condutância estomática, a taxa de transpiração e a concentração subestomática de CO_2 das frutíferas citadas (Feng *et al.*, 2015).

A clorofila *b*, por sua vez, manteve tendência de aumento mesmo em doses mais altas de Se, demonstrando maior resistência a estresses oxidativos e sugerindo um possível papel adaptativo sob condições de excesso de Se. A análise das variáveis fotossintéticas mostrou que as concentrações moderadas de 10 a 12 $\mu\text{mol L}^{-1}$ promovem ganhos na eficiência do PSII, na

dissipação de energia e na taxa de transporte de elétrons, refletindo um funcionamento otimizado do aparato fotossintético, Jiang *et al.* (2016) encontraram resultados semelhantes onde o Se interferiu diretamente na fotossíntese das plantas, afetando o acúmulo de EROs e controlando a atividade enzimática necessária para a fotossíntese. Estudos apontam que a suplementação de Se no arroz pode intensificar consideravelmente a taxa fotossintética, levando a um aumento do seu rendimento (Woods *et al.*, 2020). Além de ser importante para o crescimento das plantas o Se aumenta a fotossíntese das plantas, aumentando assim a resistência ao estresse (Chao *et al.*, 2022).

Apesar do aumento no teor de Se, os teores de N e P permaneceram estáveis, sugerindo que esses nutrientes não foram diretamente afetados pelo elemento, mesmo em doses elevadas. Por outro lado, K, Ca e Mg apresentaram comportamento de estímulo moderado em doses baixas, seguido de declínio nas doses mais altas. O S, por sua vez, foi o nutriente mais impactado negativamente, com decréscimos consistentes conforme o aumento da concentração de Se. Evidenciando a já relatada competição entre Se e S por vias de absorção e assimilação, além disso, o Se pode substituir o S em algumas estruturas de proteínas e enzimas vegetais, levando as plantas a apresentarem problemas metabólicos; as propriedades físico-químicas do Se e do S são bastante semelhantes, o que leva a formação de ligações não específicas do Se em lugar do S (Bodnar; Konieczka; Namiesnik, 2012).

Concentrações elevadas de Se no meio de cultivo provocam efeitos colaterais nas plantas, explicado em hiperacumuladores de Se, onde a biomassa de SeMet é restringida pela conversão do precursor SeCys em aminoácidos não proteicos, a captura do Se nesses metabólitos diminui ou cessa completamente a incorporação de SeCys e SeMet em proteínas (Lei *et al.*, 2022)

A toxicidade oriunda de concentrações excessivas de Se impede o crescimento e o desenvolvimento das plantas, além de alterações na ecofisiologia das mesmas, ocasionando clorose e necrose das folhas, crescimento restrito e redução na biossíntese de proteínas (Mroczek-Zdyrska; Strubińska; Hanaka, 2017; Molnár *et al.*, 2018; Pyrzynska; Sentkowska, 2020), logo, a toxicidade, nas doses elevadas, pode estar ligada ao acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs), causando clorose, necrose e ao bloqueio da biossíntese de proteínas.

Os resultados obtidos no estudo demonstram de forma clara que a forma como o nitrogênio é fornecido (amônio/nitrato) exerce influência direta sobre o acúmulo de Se nas diferentes partes do maracujazeiro-amarelo, refletindo em efeitos significativos na absorção, transporte e redistribuição deste elemento na planta, assim pode ser constatado que as doses

moderadas de Se pode ter efeito antioxidante nas plantas sob a toxicidade moderada de 70/30, não exercendo efeito na dose de extrema toxicidade, de 100/0.

A proporção de N intermediária (70/30) promoveu um equilíbrio favorável entre a absorção, translocação e redistribuição do Se. Enquanto o nitrato facilita a translocação, o amônio contribui para manter a disponibilidade do elemento no meio. Dessa forma, a proporção utilizada facilita uma maior movimentação do Se para a parte aérea sem causar acúmulo tóxico nas folhas jovens. A escolha correta da proporção de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ em sistemas de cultivo hidropônico com Se é essencial para maximizar os efeitos benéficos desse elemento, como a promoção de crescimento e a tolerância ao estresse.

Esses dados referentes ao acúmulo de NH_4^+ e NO_3^- nos diferentes órgãos do maracujazeiro-amarelo sugerem que, a proporção 100/0 favoreceu o acúmulo de amônio em todas as partes da planta, principalmente nas concentrações mais baixas de Se, mas perdeu eficiência com o aumento das concentrações, evidenciando o efeito tóxico do excesso de selênio sobre a absorção e translocação de NH_4^+ . Já a proporção 70/30 se destacou como a mais eficiente para o acúmulo de NO_3^- , beneficiada pelo efeito sinérgico entre NO_3^- e NH_4^+ e pela ação estimuladora do Se em doses moderadas. Por sua vez, a proporção 50/50, apesar de apresentar resultados satisfatórios para o acúmulo de nitrato, representa a condição controle, sem adição de Se, sendo, portanto, limitada em comparação às combinações suplementadas com Se no que se refere ao aproveitamento nutricional.

6 CONCLUSÃO

O selênio tem capacidade de regular o aparato fotossintético durante a fase inicial de crescimento do maracujazeiro-amarelo. Porém, doses acima de $6 \mu\text{mol L}^{-1}$, ultrapassam os níveis considerados fisiologicamente favoráveis para a planta de maracujazeiro-amarelo. O selênio exerce um papel importante para o crescimento e eficiência fisiológica das plantas, em concentrações moderadas, de 6 a $12 \mu\text{mol L}^{-1}$, ele otimiza o crescimento das plantas, a fotossíntese e a eficiência do uso da água.

Nas concentrações mais elevadas o Se apresenta toxicidade, dessa forma, para diminuir esses efeitos contrários, é essencial o monitoramento e ajuste das concentrações de Se, afim de maximizar os seus benefícios e diminuir prováveis riscos de toxicidade. Sendo assim, o uso do Se no maracujazeiro-amarelo fortalece o cultivo da cultura, promovendo maior crescimento inicial.

A proporção de N de 70/30 tem uma forte influência sobre o acúmulo e a distribuição de Se no maracujazeiro-amarelo, tendo aproveitamento dos efeitos benéficos proporcionados pelo elemento.

REFERÊNCIAS

- AKBULUT, M.; ÇAKIR, S. The effects of Se phytotoxicity on the antioxidant systems of leaf tissues in barley (*Hordeum vulgare* L.) seedlings. **Plant Physiology Biochemistry**, v. 48, p. 160-166, 2010.
- BAKER, N. R. ROSENQVIST E. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. **Journal of experimental botany**, v. 55, n. 403, p. 1607-1621, 2004.
- BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas**. Jaboticabal: FUNEP. 2003. 41 p.
- BERNACCI, L. C.; NUNES, T.S.; MEZZONATO, A. C.; MILWARD, M. A. A.; IMIG, D. C.; CERVI, A. C. 2020. **Passiflora in Flora do Brasil**. Disponível em: <<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB123051>>. Acesso em 30 de junho de 2025.
- BEZERRA, M. A. F. PEREIRA, W. E.; BEZERRA, F. T. C.; CAVALCANTE, L. F.; MEDEIROS, S. A. S. Nitrogênio como mitigador do estresse salino em mudas de maracujá-amarelo. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 2, p. 611-622, 2019.
- BITTSÁNSZKY, A.; PILINSZKY, K.; GYULAI, G.; KOMIVES, T. Overcoming ammonium toxicity. **Plant Science**, v. 231, p. 184-190, 2015.
- BRITTO, D. T.; KRONZUCKER, H. J. Nitrogen acquisition, PEP carboxylase, and cellular pH homeostasis: new views on old paradigms. **Plant Cell and Environment**, v. 28, p. 1396-1409, 2005.
- BODNAR, M.; KONIECZKA, P.; NAMIESNIK, J. The properties, functions, and use of selenium compounds in living organisms. **Journal of Environmental Science and Health**, v. 30, n. 3, p. 225-252, 2012.
- BORGES, L. C.; FERREIRA, D. F. Poder e taxas de erro tipo I dos testes Scott-Knott, Tukey e Student-newman-keuls sob distribuições normal e não normais dos resíduos. **Revista de Matemática e Estatística**, v. 21, n.1, 2003.
- BOYD, R. Selenium stories. **Nature Chemistry**, v. 3, p. 570, 2011.
- CATALDO, D. A.; HAROON, M.; SCHRADER, L. E.; YOUNGS, V. L. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 6, p. 71-80, 1975.
- CHAO, W.; RAO, S.; CHEN, Q.; ZHANG, W.; LIAO, Y.; YE, J.; CHENG, S. Y.; YANG, X. Y.; XU, F. Advances in research on the involvement of selenium in regulating plant ecosystems. **Plants**, v. 11, n. 20, p. 2712, 2022.
- CHAUHAN, R.; AWASTHI, S.; TRIPATHI, P.; MISHRA, S.; DWIVEDI, S.; NIRANJAN, A.; TRIPATHI, R. D. Selenite modulates the level of phenolics and nutrient element to alleviate the toxicity of arsenite in rice (*Oryza sativa* L.). **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 138, p. 47-55, 2017.

- CHEN, H.; ZHANG, Q.; WANG, X.; ZHANG, J.; ISMAIL, A.; ZHANG, Z. Nitrogen form - mediated ethylene signal regulates root- to shoot K^+ translocation via NRT1.5. **Plant Cell Environ**, v. 44, p. 3576-3588, 2021.
- CIPRIANO, P. E.; SILVA, R. F.; OLIVEIRA, C.; LIMA, A. B.; MARTINS, F. A. D.; CELANTE, G.; SANTOS, A. A.; ARCHILHA, M. V. L. R.; BOTELHO, M. F. P.; FAQUIN, V.; GUILHERME, L. R. G. Sodium selenate, potassium hydroxy-selenide, acetylselenide and their effect on antioxidant metabolism and plant nutrition and yield in sorghum genotypes. **Foods**, v. 12, p. 2034, 2023.
- CRUZ, C.; DOMÍNGUEZ, M. D. V.; APARICIO, P. M. T.; LAMSFUS, C.; BIO, A. MARTINS, M. A. L.; MORAN, J. F. Intra-specific variation in pea responses to ammonium nutrition leads to different degrees of tolerance. **Environmental and Experimental Botany**, v. 70, p. 233-243, 2011.
- CUNHA, J. G.; SILVA, R. F.; SOUZA MIRANDA, R.; PEREIRA, G. A.; ARAÚJO, E. W. C.; SILVA, J. F.; PRASO, R. M.; SILVA JÚNIOR, G. B. Ammonium and nitrate distinctly regulate photosynthetic and growth performance, eliciting antagonistic responses in yellow passion fruit plants. **Scientia Horticulturae**, v. 330, p. 113022, 2024.
- DESOKY, E. S.; MERWAD, A. R.; ABO, M. F. E.; MANSOUR, E.; ARNAOUT, S. M.; AWAD, M. F.; RAMADAN, M. F.; IBRAHIM, A. S. Physiological and biochemical mechanisms of exogenously applied selenium for alleviating destructive impacts induced by salinity stress in bread wheat. **Agronomy**, v. 11, p. 926- 932, 2021.
- DEVI, L.; PANDEY, A.; GUPTA, S.; SINGH, A. The interplay of auxin and brassinosteroid signaling tunes root growth under low and different nitrogen forms. **Plant Physiology**, v. 189, p. 1757–1773, 2022.
- DI, D.; SUN, L.; ZHANG, X.; LI, G.; KRONZUCKER, H.; SHI, W. Involvement of auxin in the regulation of ammonium tolerance in rice (*Oryza sativa* L.). **Plant Soil**, v. 432, p. 373-387, 2018.
- DJANAGUIRAMÁN, M.; PRASAD, P. V. V.; SEPPANEN, M. Selenium protects sorghum leaves from oxidative damage under high temperature stress by enhancing antioxidant defense system. **Plant Physiology Biochemistry**, v. 48, n. 12, p. 999-1007, 2010.
- FANG, G.; YANG, J.; SUN, T.; WANG, X.; LI, Y. Evidence that synergism between potassium and nitrate enhances the alleviation of ammonium toxicity in rice seedling roots. **PLoS One**, v. 16, n. 9, p. 0248796, 2021.
- FENG, T.; CHEN, S. S.; GAO, D. Q.; LIU, G. Q.; BAI, H. X.; LI, A.; PENG, L. X.; REN, Z. Y. Selenium improves photosynthesis and protects photosystem II in pear (*Pyrus bretschneideri*) grape (*Vitis vinifera*), and peach (*Prunus pérsica*). **Photosynthetica**, v. 53, n. 4, p. 609-612, 2015.
- FERREIRA, G. B.; SOUZA, J. S.; CARVALHO, J. G.; ZAMBOLIM, L. SANTOS, R. H. S.; OLIVEIRA, A. C.; BARROS, I.; CECON, P. R. **Adubação de frutíferas**. Viçosa: UFV. 2014. p. 308.
- HACHIYA, T.; INABA, J.; WAKAZAKI, M.; SATO, M.; TOYOOKA, K.; MIYAGI, A.; KAWAI, M. Y.; SUGIURA, D.; NAKAGAWA, T.; KIBA. T.; GOJON, A.; SAKAKIBARA,

A. Excessive ammonium assimilation by plastidic glutamine synthetase causes ammonium toxicity in *Arabidopsis thaliana*. **Nature Communications**, v. 12, p. 4944, 2021.

HACHIYA, T.; WATANABE, C.; FUJIMOTO, M.; ISHIKAWA, T.; TAKAHARA, K.; KAWAI, M. Y.; UCHIMIYA, H.; UESONO, Y.; TERASHIMA, I.; NOGUCHI, K. Nitrate addition alleviates ammonium toxicity without lessening ammonium accumulation, organic acid depletion and inorganic cation depletion in *Arabidopsis thaliana* shoots. **Plant Cell Physiol**, v. 53, p. 577–591, 2012.

HASANUZZAMAN, M.; NAHAR, K.; GARCÍA, P. C.; PARVIN, K.; ZULFIQAR, F.; AHMED, N.; FUJITA, M. Selenium supplementation and crop plant tolerance to metal/metalloid toxicity. **Frontiers In Plant Science**, v. 12, p. 792770, 2022.

HASANUZZAMAN, M.; BHUYAN, M. H. M. B.; RAZA, A.; HAWRYLAK-NOWAK, B.; MOTRASZEK-GOWRON, R.; NAHAR, K.; FUJITAG, M. Selenium toxicity in plants and environment: biogeochemistry and remediation possibilities. **Plants**, v. 9, n. 12, p. 1711, 2020.

HAUCK, M. Ammonium and nitrate tolerance in lichens. **Environmental Pollution**, v. 158, p. 1127-1133, 2010.

HAWRYLAK-NOWAK, B. Beneficial effects of exogenous selenium in cucumber seedlings subjected to salt stress. **Biological Trace Element Research**, v. 132, p. 259-269, 2009.

HE, X.; LUAN, F.; YANG, Y.; WANG, Z.; ZHAO, Z.; FANG, J.; WANG, M.; ZUO, M.; LI, Y. *Passiflora edulis* insight into current researches on phytochemistry and pharmacology. **Frontiers in Pharmacology**, v. 11, p. 617, 2020.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. The water-culture method for growing plants without soil. Circular. **California agricultural experiment station**, v. 347, n. 2, 1950.

HOOPEN, F.; CUIN, T.; PEDAS, P.; HEGELUND, J.; SHABALA, S.; SCHJOERRING, J.; JAHN, T. Competition between uptake of ammonium and potassium in barley and *Arabidopsis* roots: Molecular mechanisms and physiological consequences. **Journal of experimental botany**, v. 61, n. 9, p. 2303-2315, 2010.

HUANG, J. Q.; WANG, Z. H.; SUN, L. H.; WANG, L. L.; YIN, Y. L. Selenium in modern agriculture. **Modern Agriculture**, v.1, n. 1, p. 34- 42, 2023.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2022. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/maracuja/ms>>. Acesso em 10 de julho de 2025.

ISHIKAWA, S.; ANDO, S.; SAKAIGAICHI, T.; TERAJIMA, Y.; MATSUOKA, M. Effects of high nitrogen application on the dry matter yield, nitrogen content and nitrate-N concentration of sugarcane. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 55, p. 485-495, 2009.

JAMPEETONG, A.; BRIX, H.; KANTAWANIKUL, S. Effects of inorganic nitrogen forms on growth, morphology, nitrogen uptake capacity and nutrient allocation of four tropical aquatic macrophytes (*Salvinia cucullata*, *Ipomoea aquatica*, *Cyperus involucratus* and *Vetiveria zizanioides*). **Aquatic Botany**, v. 97, p. 10-16, 2012.

- JIANG, Y.; ZENG, Z. H.; YANG, Q. S.; ZHAO, J.; YANG, Y. D.; HU, Y. G. Selenium (Se) uptake and transformation mechanisms and physiological function in plant: A review. **Journal of Applied Ecology**, v. 27, n. 12, p. 4067-4076, 2016.
- KAWAKAMI, S.; MORINGA, M.; TSUKAMOTO, S. S.; MORI, S.; MATSUI, Y.; KAWAMA, T. Constituent characteristics and functional properties of passion fruit seed extract. **Life (Basel)**, v. 12, n. 1, p. 38, 2021.
- KHAN, Z.; THOUNAOJAM, T. C.; CHOWDHURY, D.; UPADHYAYA, H. The role of selenium and nano selenium on physiological responses in plant: a review. **Plant Growth Regulation**, v. 100, p. 409-433, 2023.
- KOCHANOVÁ, Z.; JAŠKOVÁ, K.; SEDLÁKOVÁ, B.; LUXOVÁ, M. Silicon improves salinity tolerance and affects ammonia assimilation in maize roots. **Biologia**, v. 69, p. 1164-1171, 2014.
- KONG, L.; ZHANG, B.; LI, H.; WANG, Z.; SI, J.; FRAN, S.; FENG, B. Does energy cost constitute the primary cause of ammonium toxicity in plants?. **Planta**, v. 256, p. 62, 2022.
- KONG, L.; WANG, M.; BI, D. Selenium modulates the activities of antioxidant enzymes, osmotic homeostasis and promotes the growth of sorrel seedlings under salt stress. **Plant Growth Regulation**, v. 45, p. 155-163, 2005.
- LEI, X. G.; JÚNIOR, G. F. C.; SUNDE, R. A.; CATON, J. S.; ARTHINGTON, J. D.; VATAMANIUK, M. Z. Dietary selenium across species. **Annual Review of Nutrition**, v. 42, p. 337-375. 2022.
- LI, B.; LI, G.; KRONZUCKER, H. J.; BALUSKA, F.; SHI, W. Ammonium stress in Arabidopsis: signaling, genetic loci, and physiological targets. **Trends in Plant Science**, v. 19, p. 107-114, 2014.
- LI, Q.; LI, B.; KRONZUCKER, H. J.; SHI, W. Root growth inhibition by NH_4^+ in Arabidopsis is mediated by the root tip and is linked to NH_4^+ efflux and GMPase activity. **Plant, cell & environment**, v. 33, n. 9, p. 1529-42, 2010.
- MANGIAPANE, E.; PESSIONE, A.; PESSIONE, E. Selenium and selenoproteins: an overview on different biological systems. **Current Protein Peptide Science**, v. 15, n. 6, p. 598-607, 2014.
- MATTAR, G. S.; MORAES, C. C. D.; MELETTI, L. M. M.; PURQUERIO, L. F. V. Accumulation and exportation of nutrients by yellow Passion fruit cv. IAC 275. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 40, n. 3, p. 178, 2018.
- MELETTI, L. M. M.; OLIVEIRA, J. C.; RUGGIERO, C. **Maracujá**. Jaboticabal: FUNEP, 2010.
- MENDONÇA, V.; NETO, S. E. A.; RAMOS, J. D.; CARVALHO, J. G.; JÚNIOR, V. C. A. Fontes e doses de fósforo para maracujazeiro-amarelo. **Revista Caatinga**, v. 19, p. 1, 2006.
- MOLNÁR, Á.; KOLBERT, Z.; KÉRI, K.; FEIGL, G.; ÖRDÖG, A.; SZÖLLÖSI, R.; ERDEI, L. Selenite-induced nitro-oxidative stress processes in *Arabidopsis thaliana* and *Brassica juncea*. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 148, p. 664-674, 2018.

MROCZEK-ZDYRSKA, M.; STRUBIŃSKA, J.; HANAKA, A. Selenium improves physiological parameters and alleviates oxidative stress in shoots of lead-exposed *Vicia faba* L. minor plants grown under phosphorus-deficient conditions. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 36, p. 186-199, 2017.

PYRZYŃSKA, K.; SENTKOWSKA, A. Selenium in plant foods: Speciation analysis, bioavailability, and factors affecting composition. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 61, n. 8, p. 1340-1352, 2020.

R CORE TEAM: **A language and environment for statistical computing.**, Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024.

REIS, C. C.; MAMEDE, A. M. G. N.; SOARES, A.; FREITAS, S. P. Production of lipids and natural antioxidants from passion fruit seeds. **Grasas y Aceites**, v. 71, p. 4, 2020.

ROOSTA, H. R.; SCHJOERRING, J. K. Effects of nitrate and potassium on ammonium toxicity in cucumber plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 31, p.1270-1283, 2008.

SILVA, D. J.; QUEIROZ, A. C. **Análise de Alimentos: Métodos químicos e biológicos.** Viçosa: Editora UFV. 2009. 235 p.

SILVA, F. C.; SOUZA, E. R. **Nutrição e adubação do maracujazeiro.** Embrapa Solos, 2009.

SILVA JÚNIOR, G. B.; MELLO PRADO, R.; SILVA, S. L. O.; CAMPOS, C. N. S.; CASTELLANOS, L. G.; SANTOS, L. C. N. D.; BARRETO, R. F.; TEODORO, P. E. Nitrogen concentrations and proportions of ammonium and nitrate in the nutrition and growth of yellow passion fruit seedlings. **Journal of Plant Nutrition**, v. 43, p. 2533-2547, 2020.

SILVA JÚNIOR, G. B.; PRADO, R. M.; CAMPOS, C. N. S.; AGOSTINHO, F. B.; SILVA, S. L. O.; SANTOS, L. C. N.; GONZÁLEZ, L. C. Silicon mitigates ammonium toxicity in yellow passionfruit seedlings. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 79, n. 3, p. 425-434, 2019.

SZCZERBA, M.; BRITTO, D.; ALI, S.; BALKOS, K.; KRONZUCKER H. NH_4^+ -stimulated and- inhibited components of K^+ transport in rice (*Oryza sativa* L.). **Journal of experimental botany**, v. 59, p. 3415-3423, 2008.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal.** Sunderland: Sinauer Associates. 2017. 888 p.

TESSIER, F.; HIDA, H.; FAVIER, A.; MARCONNET, P. Muscle GSH-Px activity after prolonged exercise, training, and selenium supplementation. **Biological Trace Element Research**, v. 47, p. 278-285, 1995.

TITOV, A. F.; KAZNINA, N. M.; KARAPETYAN, T. A.; DORSHAKOVA, N. V.; TARASOVA, V. N. Role of selenium in plants, animals, and humans. **Biology Bulletin Reviews**, v. 12, n. 2, p. 189-200, 2022.

TRIPPE, R. C.; SMITS, E. A. H. P. Selenium transport and metabolismo in plants: Phytoremediation and biofortification implications. **Journal of Hazardous Materials**, v. 404, p. 124178, 2021t.

WAN, Y.; WANG, K.; LIU, Z.; YU, Y.; WANG, Q.; LI, H. Effect of selenium on the subcellular distribution of cadmium and oxidative stress induced by cadmium in rice (*Oryza sativa* L.). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 16220-16228, 2019.

WEATHERBURN, M. W. Phenol-hypochlorite reaction for determination of ammonia. **Analytical Chemistry**, v. 39, p. 971-974, 1967.

WELLBURN, A. R. The spectral determination of chlorophylls *a* and *b*, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. **Journal of Plant Physiology**, v. 144, p. 307–313, 1994.

WONG, M. Visual symptoms of plant nutrient deficiencies in nursery and landscape plants. **Soil and Crop Management**, v. 1, p. 1-4, 2005.

WOODS, S. L.; SOBOLEWSKA, S.; ROSE, S. P.; WHITING, I. M.; BLANCHARD, A.; IONESCU, C.; BRAVO, D.; PIRGOZLIEV, V. Effect of feeding different sources of selenium on growth performance and antioxidant status of broilers. **British Poultry Science**, v. 61, n. 3, p. 274-280, 2020.

WROBEL, K.; ESPERANZA, M. G.; BARRIENTOS, E. Y.; ESCOBOSA, A. R. C.; WROBEL, K. Different approaches in metabolomic analysis of plants exposed to selenium: A comprehensive review. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 42, n. 125, 2020.

XIAO, C.; FANG, Y.; WANG, S.; HE, K. The alleviation of ammonium toxicity in plants. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 65, p. 1362-1368, 2023.

XUE, T.; HARTIKAINEN, H.; PIIRONEN, V. Antioxidative and growth-promoting effect of selenium on senescing lettuce. **Plant and Soil**, v. 237, n. 1, p. 55–61, 2001

ZANIN, R. L.; ZAMBONI, A.; MONTE, R.; TOMASI, N.; VARANINI, Z.; CESCO, S.; PINTON, R. Transcriptomic analysis highlights reciprocal interactions of urea and nitrate for nitrogen acquisition by maize. **Plant and Cell Physiology**, v. 56, p. 232-548, 2015.

ZHU, Y. G.; SMITS, E. A. H. P.; ZHAO, F. J.; WILLIAMS, P. N.; MEHARG, A. A. Selenium in higher plants: understanding mechanisms for biofortification and phytoremediation. **Trends in Plant Science**, v. 14, n. 8, p. 436-442, 2009.

ZOU, N.; LI, B.; CHEN, H.; SU, Y.; KRONZUCKER, H.; XIONG, L.; BALUSKA, F.; SHI, W. GSA-1/ARG1 protects root gravitropism in Arabidopsis under ammonium stress. **The New phytologist**, v. 200, n. 1, p. 97–111, 2013.