



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**ANA RENATA ABREU DE MORAES**

**FERTILIZAÇÃO FOLIAR COM ZINCO E COBRE NO DESEMPENHO DE MUDAS  
DE COQUEIRO ANÃO-VERDE**

**BELÉM**

**2024**

ANA RENATA ABREU DE MORAES

**FERTILIZAÇÃO FOLIAR COM ZINCO E COBRE NO DESEMPENHO DE MUDAS  
DE COQUEIRO ANÃO-VERDE**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia para obtenção do título de doutora em Agronomia.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Suzana Romeiro Araújo

**BELÉM**

**2024**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia Gerada automaticamente  
mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

M827f Moraes, Ana Renata Abreu de  
FERTILIZAÇÃO FOLIAR COM ZINCO E COBRE NO DESEMPENHO DE MUDAS  
DE COQUEIRO ANÃO-VERDE / Ana Renata Abreu de Moraes, Suzana Romeiro Araújo.  
- 2024.  
68 f.: il.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGA), Campus  
Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2024.  
Orientador: Profa. Dra. Suzana Romeiro Araújo

1. *Cocos nucifera* L 2. Zinco e Cobre. 3. Nutrição mineral. 4. Fisiologia. I. Araújo, Suzana Romeiro, orient. II. Título

---

CDD

016.63

**ANA RENATA ABREU DE MORAES**

**FERTILIZAÇÃO FOLIAR COM ZINCO E COBRE NO DESEMPENHO DE MUDAS  
DE COQUEIRO ANÃO-VERDE**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte  
das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia, para  
obtenção do título de doutora em Agronomia.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Suzana Romeiro Araújo

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Suzana Romeiro Araújo – Orientadora  
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA

---

Dr. Paulo Manoel Pontes Lins - 1º Examinador  
EMPRESA SOCOCO S/A INDÚSTRIAS DA AMAZÔNIA

---

Dra. Milena Maria Tomaz de Oliveira - 2º Examinadora  
UNIVERSITY OF NEBRASKA LINCOLN, NEBRASKA

---

Dr. Allan Klynger da Silva Lobato - 3º Examinador  
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA

---

Dr. Eduardo César Medeiros Saldanha - 4º Examinador  
RIO TINTO DESENVOLVIMENTO MINERAIS - LTDA

*Aos meus pais, Alzira Abreu de Moraes e Luís Carlos Silva da Rosa e ao meu esposo, Alex Corrêa da Silva.*

**DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus em primeiro lugar.

À Universidade Federal Rural da Amazônia e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia pela oportunidade concedida para realização do doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado.

À Empresa Sococo S/A Indústrias da Amazônia pelo financiamento do trabalho, em especial ao Dr. Paulo Lins e aos colaboradores Samuel Cohen e Lucas Bastos por toda ajuda ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

À minha orientadora Professora. Dra. Suzana Romeiro Araújo pela acolhida quando precisei e por toda ajuda, dedicação e paciência ao longo do processo.

Ao professor Dr. Mário Lopes por ter me dado a oportunidade de fazer parte do programa de doutorado e por toda ajuda e ensinamentos ao longo dos anos.

Ao meu esposo Alex Corrêa da Silva pelo amor, cuidado e paciência ao longo de todo o processo.

À minha mãe Alzira Abreu de Moraes e ao meu pai Luiz Carlos Rosa pelo amor incondicional em todos os momentos da minha vida.

Às amigas Maynara Santos Gomes, Mila Façanha Gomes e Larissa Miranda por toda ajuda e amizade, dentro e fora do programa.

Aos meus irmãos Rodrigo de Abreu Chaves, Pamela Cristina Abreu Rosa e Patrick Abreu Rosa que sempre estiveram dispostos a me ajudar no que fosse preciso

Aos amigos Jonathan Marques, Victor Rodrigues Dias, Natália de Paula Silva e Gabriel da Silva Moura por toda amizade e ajuda ao longo dos experimentos.

Aos discentes e docentes do Programa de Pós-Graduação em Agronomia pelos ensinamentos.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta pesquisa.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>8</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>9</b>
<b>1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>21</b>
<b>2. FERTILIZAÇÃO COM ZINCO MELHORA O CRESCIMENTO E DESEMPENHO FOTOSSINTÉTICO DE MUDAS DE COQUEIRO ANÃO-VERDE.....</b>	<b>25</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>25</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>26</b>
<b>2.1 Introdução.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2 Material e métodos.....</b>	<b>28</b>
<b>2.3 Resultados e discussão .....</b>	<b>31</b>
<b>2.4 Conclusões.....</b>	<b>41</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>41</b>
<b>3. CRESCIMENTO, TROCAS GASOSAS E FLUORECÊNCIA DA CLOROFILA <i>a</i> EM COQUEIRO ANÃO-VERDE EM RESPOSTA À FERTILIZAÇÃO FOLIAR COM COBRE.....</b>	<b>44</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>44</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>45</b>
<b>3.1 Introdução.....</b>	<b>46</b>
<b>3.2 Material e Métodos.....</b>	<b>47</b>
<b>3.3 Resultados e discussão .....</b>	<b>51</b>
<b>3.4 Conclusões.....</b>	<b>64</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>65</b>
<b>4. CONCLUSÕES FINAIS.....</b>	<b>68</b>

## RESUMO

O zinco (Zn) e o cobre (Cu) não fazem parte do programa de adubação do coqueiro pois o solo geralmente supri os teores considerados suficientes para a cultura, 15 mg kg<sup>-1</sup> para o Zn e 5 mg kg<sup>-1</sup> para o Cu. No entanto, estudos mostram que a fertilização de Zn e Cu melhora o desempenho das culturas, inclusive do coqueiro. Em vista disso, buscou-se com este estudo analisar a influência da fertilização de Zn e Cu no estado nutricional, crescimento e parâmetros fisiológicos de mudas de coqueiro anão-verde. O estudo foi realizado a partir da condução de dois experimentos, um com doses de Zn e outro com doses de Cu, conduzidos em casa de vegetação da Universidade Federal Rural da Amazônia. O primeiro experimento foi conduzido entre setembro de 2021 e abril de 2022, os tratamentos foram constituídos por cinco doses de Zn (5, 10, 15, 20 e 25 g por planta) e um tratamento controle (sem Zn), e foram aplicadas via foliar. Os resultados mostraram que o aumento das doses de Zn reduziu o ferro em 45% e o manganês em 38%, e aumentou o Zn para valores acima de 100% com a dose de 25 g em comparação com o tratamento controle. Com relação ao crescimento e trocas gasosas, os maiores aumentos foram observados nas mudas que receberam em torno de 16 g de Zn por planta e que apresentavam teor de Zn em torno de 82 mg kg<sup>-1</sup>, aumentos de 40% na área foliar (AF), 7% na altura (H), 29% na massa seca da parte aérea (MSPA), 22% na massa seca total (MST), 38% na fotossíntese (A), 67% na transpiração (E), 83% na condutância estomática (gs) e 52% na concentração interna de CO<sub>2</sub> (C<sub>i</sub>), quando comparados com as plantas que não receberam Zn. O segundo experimento foi conduzido entre os meses de outubro de 2022 e abril de 2023, os tratamentos foram constituídos por cinco doses de Cu (4, 8, 12, 16 e 20 g por planta) e um tratamento controle. Os resultados mostraram que as doses de 4 e 8 g de Cu proporcionaram maiores teores de nitrogênio e fósforo. Em relação ao crescimento, trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a*, 8 g de Cu proporcionou os melhores resultados na maioria das variáveis, com incrementos de 12% na H, 26% na AF, 27% na MSPA, 23% na MST, 14% na A, 24% na E, 24% na gs, 7% na F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub> e 8% na ETR. Porém, o cálculo da dose para máxima eficiência técnica mostrou que 5 g de Cu por planta é suficiente para obter melhoras no desempenho das mudas. Assim, de forma pioneira, foi identificada a melhor dose de Zn e a melhor dose de Cu para obtenção da máxima eficiência técnica em mudas de coqueiro anão-verde, informações importantes que podem contribuir para o aprimoramento do programa de adubação do coqueiro cultivado no estado do Pará.

**Palavras-chave:** *Cocos nucifera* L., micronutrientes, crescimento, fisiologia

## ABSTRACT

Zinc (Zn) and copper (Cu) are not part of the coconut fertilization program because the soil generally supplies the levels considered sufficient for the crop ( $15 \text{ mg kg}^{-1}$  for Zn and  $5 \text{ mg kg}^{-1}$  for Cu). However, studies show that Zn and Cu fertilization improved the performance of crops, including coconut trees. In view of this, this study sought to analyze the influence of Zn and Cu fertilization on the nutritional status, growth and physiological parameters of green dwarf coconut tree seedlings. The study was carried out by conducting two experiments, one with doses of Zn and the other with doses of Cu, conducted in a greenhouse at the Federal Rural University of the Amazon. The first experiment was conducted between September 2021 and April 2022, the treatments consisted of five doses of Zn (5, 10, 15, 20 and 25 g per plant) and a control treatment (without Zn), and were applied via leaf. The results showed that increasing Zn doses reduced iron by 45% and manganese by 38%, and increased Zn to values above 100% with the 25 g dose compared to the control treatment. Regarding growth and gas exchange, the greatest increases were observed in seedlings that received around 16 g of Zn per plant and that had a Zn content of around  $82 \text{ mg kg}^{-1}$ , increases of 40% in leaf area (LA), 7% in height (H), 29% in shoot dry mass (SDM), 22% in total dry mass (TDM), 38% in photosynthesis (A), 67% in transpiration (E), 83% in stomatal conductance (gs) and 52% in internal CO<sub>2</sub> concentration (Ci), when compared to plants that did not receive Zn. The second experiment was conducted between the months of October 2022 and April 2023, the treatments consisted of five doses of Cu (4, 8, 12, 16 and 20 g per plant) and a control treatment. The results showed that doses of 4 and 8 g of Cu provided higher nitrogen and phosphorus contents. Regarding growth, gas exchange and chlorophyll a fluorescence, 8 g of Cu provided the best results in most variables, with increases of 12% in H, 26% in LA, 27% in SDM, 23% in TDM, 14 % in A, 24% in E, 24% in gs, 7% in Fv/Fm and 8% in ETR. However, the calculation of the dose for maximum technical efficiency showed that 5 g of Cu per plant is sufficient to obtain improvements in seedling performance. Thus, in a pioneering way, the best dose of Zn and the best dose of Cu were identified to obtain maximum technical efficiency in green dwarf coconut seedlings, important information that can contribute to the improvement of the fertilization program for coconut trees cultivated in the state from Pará.

**Keywords:** *Cocos nucifera* L., micronutrient, growth, physiology

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 2. FERTILIZAÇÃO COM ZINCO MELHORA O CRESCIMENTO E DESEMPENHO FOTOSSINTÉTICO DE MUDAS DE COQUEIRO ANÃO-VERDE

**Figura 1.** Produção das mudas realizada na Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) a partir de sementes provenientes da empresa Sococo.....28

**Figura 2.** Formulação dos tratamentos compostos pelas doses de zinco .....29

**Figura 3.** Influência das doses de zinco no nitrogênio - N (A), fósforo – P (B), potássio - K (C), cálcio - Ca (D), magnésio - Mg (E) presente no tecido foliar de mudas de coqueiro anão-verde. ns: não significativo pelo teste F;  $R^2$ : coeficiente de determinação; CV: coeficiente de variação. As barras verticais indicam erro padrão das médias (n = 5).....31

**Figura 4.** Influência das doses de zinco no boro - B (A), cobre – Cu (B), ferro - Fe (C), manganês - Mn (D) e zinco - Zn (E) presente no tecido foliar de mudas de coqueiro anão- verde. ns: não significativo; \* significativo a  $p \leq 0,05$ , \*\* significativo a  $p \leq 0,01$  pelo teste F;  $R^2$ : coeficiente de determinação; CV: coeficiente de variação. As barras verticais indicam erro padrão das médias (n = 5).....32

**Figura 5.** Influência das doses de zinco na área foliar (AF), Altura (H), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca total (MST). \*- significativo a  $p \leq 0,05$ , \*\* - significativo a  $p \leq 0,01$  pelo teste F;  $R^2$  – coeficiente de determinação; CV – coeficiente de variação. As barras verticais indicam erro padrão das médias (n = 5).....34

**Figura 6.** Influência das doses de zinco na fotossíntese (A), condutância estomática (gs) concentração interna de  $CO_2$  (Ci), transpiração (E), eficiência instantânea do uso da água (EisUA), eficiência intrínseca do uso da água (EicUA). \*- significativo a  $p \leq 0,05$ , \*\* - significativo a  $p \leq 0,01$  pelo teste F;  $R^2$  – coeficiente de determinação; CV – coeficiente de variação. As barras verticais indicam erro padrão das médias (n = 5).....36

**Figura 7.** Análise de componentes principais (ACP) das variáveis estudadas em função das doses de zinco: 0 ( sem zinco), 10 (10 gramas de zinco planta<sup>-1</sup>), 15 (15 gramas de zinco planta<sup>-1</sup>), 20 (20 gramas de zinco planta<sup>-1</sup>), 25 (25 gramas de zinco planta<sup>-1</sup>). Área foliar (AF), altura (H), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST), fotossíntese (A), transpiração (E), condutância estomática (gs), concentração interna de  $CO_2$  (Ci), eficiência instantânea do uso da água (EisUA) e eficiência intrínseca do uso da água (EicUA).....39

**Figura 8.** Matriz de correlação mostrando área foliar (AF), Altura (H), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST), fotossíntese (A), condutância estomática (gs), concentração interna de  $CO_2$  (Ci), transpiração (E), eficiência instantânea do uso da água (EisUA), eficiência intrínseca do uso da água (EicUA). A inclinação dos círculos e o grau de coloração são proporcionais à correlação de Pearson de acordo com a legenda na parte inferior da figura. \*significativo a  $p \leq 0,05$ , \*\*significativo a  $p \leq 0,01$ .....40

### CAPÍTULO 3. CRESCIMENTO, TROCAS GASOSAS E FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA A EM MUDAS DE COQUEIRO ANÃO-VERDE FERTILIZADAS COM COBRE

- Figura 1.** Formulação dos tratamentos compostos por cinco doses de cobre.....48
- Figura 2.** Obtenção da área foliar com a utilização de um integrador de área (LI-3100, Li-Cor, Inc. Lincoln, NE, USA).....49
- Figura 3.** Avaliação das trocas gasosas com auxílio de um analisador de gases infravermelho portátil (IRGA, modelo LI-6400XT, da marca LICOR®).....50
- Figura 4.** Influência das doses de cobre no nitrogênio - N (A), fósforo – P (B), potássio - K (C), cálcio - Ca (D), magnésio - Mg (E) e enxofre – S (F) presente no tecido foliar de mudas de coqueiro anão-verde. ns: não significativo pelo teste F;  $R^2$ : coeficiente de determinação; CV: coeficiente de variação. As barras verticais indicam erro padrão das médias (n = 5).....52
- Figura 5.** Influência das doses de cobre no boro - B (A), ferro - Fe (B), manganês - Mn (C), cobre - Cu (D) e zinco - Zn (E) presente no tecido foliar de mudas de coqueiro anão-verde. ns: não significativo; \* significativo a  $p \leq 0,05$ , \*\* significativo a  $p \leq 0,01$  pelo teste F;  $R^2$ : coeficiente de determinação; CV: coeficiente de variação. As barras verticais indicam erro padrão das médias (n = 5).....53
- Figura 6.** Influência das doses de Cu na altura – H (A), área foliar – AF (B), número de folhas – NF (C), diâmetro do coleto – DC (D), massa seca da parte aérea – MSPA €, comprimento da raiz - CR (F), volume da raiz - VR (G), massa seca da raiz - MSR (H) e massa seca total - MST (I) presente no tecido foliar de mudas de coqueiro anão verde. \* significativo a  $p \leq 0,05$ ; \*\* significativo a  $p \leq 0,01$ ; ns: não significativo pelo teste F;  $R^2$ : coeficiente de determinação; CV: coeficiente de variação. As barras verticais indicam erro padrão das médias (n = 5).....55
- Figura 7.** Influência das doses de Cu na fotossíntese - A (A), transpiração – E (B), condutância estomática – gs (C), concentração interna de  $CO_2$  -  $C_i$  (D), eficiência instantânea do uso da água –  $E_{isUA}$  (E), e eficiência intrínseca do uso da água -  $E_{icUA}$  (F), presente no tecido foliar de mudas de coqueiro anão verde. \* significativo a  $p \leq 0,05$ ; \*\* significativo a  $p \leq 0,01$ ; ns: não significativo pelo teste F;  $R^2$ : coeficiente de determinação; CV: coeficiente de variação. As barras verticais indicam erro padrão das médias (n = 5).....57
- Figura 8.** Influência das doses de Cu na fluorescência inicial -  $F_0$  (A), coeficiente de extinção fotoquímica –  $q_p$  (B), rendimento quântico da regulação da dissipação de energia – NPQ (C), eficiência fotoquímica máxima -  $F_v/F_m$  (D), fluorescência máxima emitida -  $F_m$  (E), rendimento quântico efetivo do PSII -  $\Phi_{PSII}$  (F), taxa de transporte de elétrons – ETR (G) e índice SPAD (H), presente no tecido foliar de mudas de coqueiro anão verde. \* significativo a  $p \leq 0,05$ ; \*\* significativo a  $p \leq 0,01$ ; ns: não significativo pelo teste F;  $R^2$ : coeficiente de determinação; CV: coeficiente de variação. As barras verticais indicam erro padrão das médias (n = 5).....59
- Figura 9.** Análise de componentes principais (ACP) das variáveis estudadas em função das doses de cobre: 0 (sem cobre), 4 (4 gramas de cobre planta<sup>-1</sup>), 8 (8 gramas de cobre planta<sup>-1</sup>),

12 (12 gramas de cobre planta<sup>-1</sup>), 16 (16 gramas de cobre planta<sup>-1</sup>), 20 (20 gramas de cobre planta<sup>-1</sup>). Nitrogênio (N), fósforo (P), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu), fotossíntese (A), transpiração (E), condutância estomática (gs), concentração interna de CO<sub>2</sub> (Ci), área foliar (AF), altura (H), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca total (MST), fluorescência inicial (F<sub>0</sub>), coeficiente de extinção fotoquímica (q<sub>p</sub>), rendimento quântico da regulação da dissipação de energia (NPQ), eficiência fotoquímica máxima (F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>), fluorescência máxima emitida (F<sub>m</sub>), rendimento quântico efetivo do PSII – (Φ<sub>PSII</sub>), taxa de transporte de elétrons (ETR) e índice SPAD (SPAD).....62

**Figura 10.** Matriz de correlação mostrando área foliar (AF), Altura (H), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST), fotossíntese (A), condutância estomática (gs), concentração interna de CO<sub>2</sub> (Ci), transpiração (E), eficiência instantânea do uso da água (EisUA) e eficiência intrínseca do uso da água (EicUA). O grau de coloração são proporcionais à correlação de Pearson de acordo com a legenda na parte inferior da figura. \*significativo a  $p \leq 0,05$ , \*\*significativo a  $p \leq 0,01$ .....63

## LISTA DE TABELAS

### **CAPÍTULO 2. FERTILIZAÇÃO COM ZINCO MELHORA O CRESCIMENTO E DESEMPENHO FOTOSSINTÉTICO DE MUDAS DE COQUEIRO ANÃO-VERDE**

**Tabela 1.** Características químicas e granulométricas do Neossolo Quartzarênico, camada 0-20 cm.....29

### **CAPÍTULO 3. CRESCIMENTO, TROCAS GASOSAS E FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA A EM MUDAS DE COQUEIRO ANÃO-VERDE FERTILIZADAS COM COBRE**

**Tabela 1.** Características químicas e granulométricas do Neossolo Quartzarênico, camada 0-20 cm.....47

## 1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O cultivo do coqueiro (*Cocos nucifera* L.) é considerado uma das mais importantes atividades agrícolas do mundo gerando emprego, renda e divisas para vários países (FRÓES JUNIOR et al., 2019). Além disso, o coco é uma importante fonte nutricional na alimentação humana e animal (BENASSI et al., 2013). Esta cultura tem como centro de origem o sudeste Asiático (Malásia, Filipinas e Indonésia) e nas ilhas localizadas entre os oceanos Pacífico e Índico (LIMA et al., 2015). A área mundial colhida com coco é de 11,8 milhões de hectares, produzindo 62,9 milhões de toneladas (FAOSTAT, 2021), sendo que apenas três produtores, Indonésia, Filipinas e Índia ocupam 73,0% dessa área e participam com 74,1% da produção (BRAINER, 2021).

A cultura do coqueiro pertence à classe Monocotiledoneae; Ordem Arecales; Família Arecaceae; subfamília cocosoideae e Gênero *Cocos* (BENASSE et al., 2013). O coqueiro possui uma espécie, *Cocos nucifera* L. que é composta por algumas variedades, entre as quais duas são as mais importantes do ponto de vista socioeconômico e agroindustrial: *Cocos nucifera* var. *typica*, conhecida no Brasil como Gigante e *Cocos nucifera* var. *nana* denominada Anã (AZEVEDO et al., 2018). A variedade Anã é composta das cultivares verde, amarela e vermelha. um terceiro tipo, o híbrido, é resultante de cruzamentos dessas variedades (ARAGÃO et al., 2002).

A variedade Gigante ainda é bastante explorada, principalmente pelos pequenos produtores de coco (RIBEIRO et al., 2021). Apresentam fase vegetativa longa, cerca de 5 a 7 anos para florescer, seu crescimento é rápido com plantas atingindo mais de 30 m de altura (BENASSI et al., 2013). Apresenta fecundação cruzada, rendimento em torno de 80 frutos/planta/ano, os frutos variam entre médios e grandes e possuem o endocarpo espesso e firme, próprio para a agroindústria de alimentos (farinha de coco, leite de coco etc.) ou para uso culinário in natura (doces e bolos) (RIBEIRO et al., 2021). As principais cultivares de Gigante existentes no Brasil são: Gigante-do-oeste-Africano, Gigante-de-Renell, Gigante-da-malásia, Gigante-da-costa-oeste e Gigante-da-Praia-do-Forte (BENASSI et al., 2013).

O coqueiro-anão originou-se de uma mutação gênica ocorrida na variedade Gigante na ilha de Java (DIAS, 1980). É uma planta autógama, reproduzindo-se predominantemente por autofecundação, possui crescimento vegetativo lento, podendo atingir altura entre 10 e 12 metros, sua fase vegetativa é curta, iniciando o florescimento entre 2 e 3 anos (ARAGÃO et al., 2010). Possui estipe delgado, numerosas folhas na copa, produz um grande número de frutos cujo destino principal é a produção de água de coco, além disso apresenta grande

importância nos trabalhos de melhoramento genético para a produção de híbridos (BENASSI et al., 2013). Os coqueiros-anões, quando comparados aos gigantes, são mais sensíveis ao ataque de pragas, como ácaros, e doenças foliares e são mais exigentes quanto ao clima e solo (RIBEIRO et al., 2021). Entre os coqueiros-anões, o anão-verde é o mais tolerante às condições desfavoráveis do ambiente, os principais representantes são: anão-verde-do-Brasil e anão-verde-de-Jequi (BENASSI et al., 2013).

O Brasil, na década de 1970, era o 9<sup>o</sup> maior produtor de coco, hoje é o 4<sup>o</sup> maior produtor de coco do mundo (FAO, 2018). O estado da Bahia, região Nordeste, tem sido apontada como o local de introdução da cultura no País, por isso a denominação coco-da-baía (BARROS, 2022), desde então, a cococultura assumiu importante papel no desenvolvimento econômico e social em todas as regiões brasileiras (BRAINER, 2021).

A Região Nordeste é a principal produtora nacional de coco, cuja posição foi conquistada desde a introdução do coqueiro no país e que ainda vem se mantendo devido às condições edafoclimáticas favoráveis nas zonas litorâneas, nela, concentram-se 80,9% da área colhida de coco do País e 73,5% de sua produção (BARROS et al., 2022). Ainda segundo Barros et al. (2022), na década de 1990, a Região Nordeste participava com 92,6% da área colhida de coco no Brasil, percentual que foi caindo à medida que o cultivo de coco foi se expandindo para outras regiões sem tradição de cultivo e com características de produção diferenciadas daquelas empregadas nos primeiros plantios, nas regiões litorâneas do Nordeste.

O deslocamento da cultura ocorreu, principalmente para o Norte e Sudeste (EMBRAPA, 2023). A expansão do coqueiro para outras regiões se deu em função de uma crescente demanda por água de coco e consequente elevação de seu preço (BARROS et al., 2022). O aumento significativo da demanda por água de coco, atribuído em parte ao crescimento da renda per capita e a um estilo de vida mais saudável, exigiu, nas últimas décadas, uma rápida expansão da produção para o atendimento dessa demanda (CUENCA, 2023). A utilização do coqueiro-anão, pelo seu alto poder produtivo, foi de fundamental importância para o aumento da produção e da produtividade, o que gerou inúmeras oportunidades de negócios no aproveitamento desse novo nicho de mercado, garantindo maior rentabilidade e atratividade para novos empreendimentos nesse agronegócio (CUENCA, 2023). Esse fato gerou uma grande mudança na cultura do coqueiro no Brasil, a partir da modernização do seu processo produtivo, com utilização intensiva de insumos, de tecnologia, implantação de grandes projetos em perímetros irrigados e utilização da variedade de coqueiro anão-verde, ampliando a produção e a produtividade por área plantada (BRAINER, 2018).

A região Norte não tinha relevância na produção brasileira de coco, contudo, no final da década de 1970 e início da década de 1980, algumas empresas do Nordeste brasileiro descobriram grandes oportunidades para abrir novos negócios na região Amazônica (FRÓES JUNIOR et al., 2019). Uma destas empresas com significativa importância econômica na região, o grupo Sococo com sede em Maceió, Estado de Alagoas, realizou grande investimento no cultivo do coco no Município de Moju, estado do Pará visando vantagens devido as condições edafoclimáticas favoráveis e à possibilidade de integração vertical (REBELLO et al., 2003).

Atualmente, o estado do Pará é responsável por 95,1% da área plantada e 95,7% da produção de coco, o que o coloca no patamar de terceiro maior produtor do País, ficando atrás apenas do Ceará e da Bahia (IBGE, 2021). O Pará como terceiro maior produtor nacional participa com 10,2% da área plantada, 11,6% da produção e 18,1% do valor da produção nacional (IBGE, 2021). As seis mesorregiões paraenses desenvolvem o cultivo do coqueiro, sendo o Nordeste Paraense o principal centro de produção (LINS e VIÉGAS, 2008). O Nordeste Paraense engloba 48 municípios, dos quais dois são os mais representativos em termos de volume de produção estadual de coco: Moju (com 42,61% da produção) e Acará (11,78%), concentrando 54,39% da produção estadual (FRÓES JÚNIOR et al., 2019).

Entre os insumos considerados imprescindíveis à produção do coco, a muda destaca-se como aquele de maior relevância, sendo um insumo básico de grande importância para a viabilidade econômica de um coqueiral (BENASSI et al., 2013). É comum observar plantios de coqueiros adultos cujas plantas, mesmo recebendo tratamentos culturais adequados, não apresentam produção satisfatória em virtude das limitações do seu potencial genético (FONTES e FERREIRA, 2006). Porém, para se obter uma boa muda de coqueiro, não se deve considerar apenas as características genéticas da semente, mas também critérios mais específicos como a velocidade de germinação, o tamanho, a idade e o vigor da plântula, caso contrário, as mudas apresentarão atraso em seu desenvolvimento, com reflexos quase sempre negativos na precocidade e na produtividade das plantas, comprometendo a viabilidade econômica do empreendimento. (FONTES e FERREIRA, 2006).

Na seleção de plantas fornecedoras de sementes, devem-se observar diversas características, entre elas: planta com alta produção, vigorosa, com baixo índice de ataque de pragas e doenças, com boa conformação de copa, com grande número de folhas, folhas com a raque curta, tronco com cicatrizes foliares bem próximas, Inflorescência com grande número de flores femininas, cacho bem posicionado sobre sua folha de sustentação, tamanho, formato e coloração dos frutos de acordo com a cultivar em questão (BENASSI et al., 2023).

Além do cuidado na seleção das matrizes para a produção de sementes, para se obter mudas de qualidade é necessário a realização de diversos tratamentos culturais, tais como: irrigação em dois turnos: no início da manhã e ao final da tarde, utilizando-se o sistema de aspersão convencional ou a miniaspersão; todo o viveiro deve ser mantido livre de ervas daninhas, principalmente gramíneas, por serem consideradas plantas hospedeiras de insetos vetores de doenças, a limpeza da área deve ser feita regularmente, inclusive externamente, numa faixa mínima de 10 m; a utilização de cobertura-morta no germinadouro, utilizando-se fibra de coco, que apresenta como vantagens melhor conservação da umidade do solo e maior eficiência de controle de plantas daninhas (FONTES e FERREIRA, 2006). Além dessas práticas, no processo de produção de mudas, o fornecimento de fertilizantes é indispensável para a obtenção de plantas mais produtivas (LINS e VIÉGAS, 2008). No período de viveiro (6 a 8 meses), recomendam-se três adubações com intervalos de 60 dias, no primeiro, terceiro e quinto mês de idade, com a utilização de ureia, superfosfato simples, cloreto de potássio, óxido de magnésio e boráx (LINS e VIÉGAS, 2008).

Embora o estado do Pará se destaque entre os principais produtores de coco no Brasil, ainda existem muitos desafios no desenvolvimento da cultura no estado, entre elas a carência de informações sobre a nutrição e adubação nas condições locais (LINS; VIEGAS, 2008), principalmente para coqueiro anão-verde (TEIXEIRA, 2005). Sabe-se que o fator nutricional é um dos que mais influenciam no desenvolvimento das plantas, principalmente quando se trata de culturas de interesse comercial (PRADO, 2020). As plantas necessitam para seu crescimento e desenvolvimento, além de carbono, oxigênio e hidrogênio, fornecidos pelo ar e pela água, de determinados elementos minerais, sem os quais seu ciclo de vida não é completado, esses elementos são denominados de nutrientes essenciais e estão divididos em macro e micronutrientes (FERNANDES, 2006). São considerados macronutrientes os elementos exigidos em maior quantidade (nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre), e micronutrientes os exigidos em menores quantidades (boro, cloro, cobre, ferro, manganês, molibdênio, níquel e zinco) (FERNANDES, 2006).

As necessidades nutricionais das culturas variam de acordo com as quantidades requeridas para seu pleno desenvolvimento (BRASIL et al., 2020). Os coqueiros têm crescimento contínuo e demandam grandes quantidades de nutrientes em todas as fases de crescimento e desenvolvimento (LINS et al. 2020), e o suprimento nutricional adequado do coqueiro requer fornecimento tanto de macro como de micronutrientes (WIJEBANDARA et al., 2014). Porém, embora na produção de mudas de coqueiro seja realizado o fornecimento de todos os macronutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre, magnésio e cálcio), com

relação aos micronutrientes, somente o boro é fornecido via adubação, isso porque acredita-se que os demais sejam supridos pelas concentrações presentes no solo (BRASIL et al., 2020).

O nitrogênio é o nutriente que geralmente as plantas utilizam em maior quantidade, encontra-se, quase na sua totalidade, dentro da planta, em formas orgânicas, representadas principalmente pelas proteínas e aminoácidos (VIEIRA, 2017). Seus efeitos na coloração das plantas são visíveis, plantas bem nutridas têm coloração verde intenso, são bem desenvolvidas e alcançam altas produtividades, caso os outros fatores de produção estejam em condições adequadas, incluindo os demais nutrientes (FERREIRA et al., 2020).

O fósforo está particularmente envolvido na transferência de energia, pois o ATP é necessário para a fotossíntese, translocação e muitos outros processos metabólicos de relevância (BROETTO, 2017), sendo um dos nutrientes mais limitantes ao desenvolvimento das plantas nos solos da região Amazônica, uma vez que há predominância de solos intemperizados, normalmente com baixos teores disponíveis desse nutriente, em razão da grande capacidade de retenção de P nos colóides desses solos ((FERREIRA et al., 2020).

O potássio é um dos macronutrientes exigido em maior quantidade pelo coqueiro, tendo atuação na fotossíntese, respiração das plantas, auxílio na formação do sistema radicular, aumento da tolerância às doenças, auxílio no transporte de açúcares melhorando a qualidade dos frutos e das sementes, regulação da utilização da água via controle da abertura e do fechamento estomático (RIBEIRO et al., 2016).

Os nutrientes cálcio, magnésio e enxofre em razão de suas menores exigências pelas plantas em comparação com nitrogênio, fósforo e potássio, são considerados macronutrientes secundários, entretanto, possuem a mesma importância para as plantas que os demais (BRASIL et al., 2020). Culturas frutíferas apresentam elevada demanda por cálcio (RIBEIRO et al., 2016). O cálcio é indispensável para a manutenção da estrutura e o funcionamento normal das membranas celulares, influenciando diretamente na sua permeabilidade e na absorção dos outros nutrientes (FAQUIM, 2006). Outras participações importantes do Ca na planta são seu estímulo ao desenvolvimento das raízes, na germinação do grão de pólen e no crescimento do tubo polínico, redução do abortamento floral e aumento da tolerância às pragas e doenças (PRADO, 2020). O magnésio é um elemento de grande importância para o desenvolvimento vegetativo, uma função de destaque é sua participação na formação da molécula da clorofila, no entanto atua também na formação de açúcares e lipídeos, funcionando como carregador do fósforo nas membranas celulares e, também, no auxílio à absorção de outros nutrientes. (RIBEIRO et al., 2016). O enxofre participa de estruturas orgânicas nas plantas e de diversas reações enzimáticas, sendo requerido na síntese proteica,

sua deficiência pode causar acúmulo de nitrogênio promovendo uma redução no teor de proteínas nas plantas e redução do crescimento vegetal (PRADO, 2020).

Entre os micronutrientes indispensáveis ao crescimento do coqueiro, o boro é considerado o mais importante, pois a sua deficiência ocasiona anormalidades no desenvolvimento da cultura (PINHO et al., 2008)), sendo por isso o único micronutriente que consta atualmente na tabela de adubação do coqueiro (BRASIL et al., 2020). Porém, o zinco também é considerado um micronutriente limitante para a maioria das culturas devido sua baixa concentração no solo (PRADO, 2020) e sua deficiência é um problema mundial na produção agrícola (CAKMAK et al., 2010). Além do problema da baixa concentração do zinco no solo, a sua disponibilidade é influenciada por diversos fatores (PRADO, 2020). O fator mais importante é o valor do pH do solo, geralmente em solos arenosos que recebem altas doses de calcário a disponibilidade do zinco é bastante afetada devido ao aumento do pH, desse modo, quanto maior o pH, menor a disponibilidade de Zn na solução do solo (NOVAIS et al., 2007). Além do pH, altas doses de fertilizantes fosfatados, nitrogenados e potássicos podem introduzir problemas de deficiência de Zn nos sistemas agrícolas (WIJEBANDARA et al., 2014).

O zinco participa de inúmeras formas no metabolismo do vegetal (TAIZ et al., 2017). Embora não apresente função estrutural definida, é ativador de várias enzimas (CAKMAK et al., 2010), além disso, participa diretamente da síntese do ácido indolacético (AIA) (BROETTO et al., 2017). A literatura indica que a deficiência de zinco pode degradar o AIA existente na planta (aumento da atividade AIA oxidase) ou reduzir a sua síntese (PRADO, 2020), nesse caso, o zinco é requerido para a síntese do aminoácido triptofano, um precursor da síntese do AIA (TAIZ et al., 2017). Geralmente, a deficiência de zinco resulta em diminuição do volume celular e menor crescimento apical, pelo distúrbio no metabolismo das auxinas como AIA (redução da síntese ou própria degradação), assim, em plantas submetidas à deficiência de zinco tem-se queda drástica da concentração de auxina, mesmo antes do aparecimento dos sintomas visuais (PRADO, 2020).

Outro problema da deficiência de zinco no desenvolvimento das plantas é a diminuição no nível de RNA, o que resulta na menor síntese de proteínas e dificuldade na divisão celular (PRADO, 2020). Isso é explicado pelo fato do nutriente inibir a RNAase (desintegradora de RNA), e ainda fazer parte da RNA polimerase, que sintetiza RNA, desse modo, em plantas deficientes de zinco, têm-se em geral, acúmulo de aminoácidos, diminuição da síntese de proteínas associadas à diminuição do AIA, decrescendo assim, a produção de matéria seca (PRADO, 2020).

Além da influência no crescimento das plantas, o zinco, juntamente com outros nutrientes como o cobre, faz parte da estrutura da enzima dismutase de superóxido e de outras (BROETTO et al., 2017). A manutenção da atividade da dismutase superóxido é importante porque decompõe radicais oxidantes produzidos a partir do oxigênio, protegendo a célula de seu efeito prejudicial (degradação do AIA, oxidação de lipídeos) que pode afetar a integridade das membranas (BROETTO et al., 2017). Outra enzima que o zinco influencia como ativador é a anidrase carbônica, que catalisa a dissolução de CO<sub>2</sub>, como passo prévio a sua assimilação, além disso, o zinco atua na ativação da ribulose 1,5-difosfato carboxilase (presente nos cloroplastos) (PRADO, 2020). Dessa forma, a deficiência de zinco causa diversas alterações nas características morfológicas e nos processos fisiológicos, como redução da taxa fotossintética e diminuição da atividade de síntese de amido e proteína, resultando na menor produção agrícola (ABDOLI e ESFANDIARI, 2020).

Além do zinco, o cobre também é um micronutriente de grande importância para a cultura do coqueiro (SOBRAL e ANJOS, 2022). O elevado grau de intemperismo observado em solos brasileiros influi na baixa disponibilidade de cobre, problema constantemente descrito para diversas culturas agrícolas, a exemplo, os cereais e as leguminosas (MOREIRA et al., 2019). Nos cultivos de coqueiro, os baixos teores de cobre no solo e a constante remoção do nutriente pela cultura têm ocasionado deficiência de cobre em plantios de coqueiro anão, o que prejudica a produção de frutos (SOBRAL e ANJOS, 2022).

O cobre é um micronutriente multifuncional, com atuação em diversos processos fisiológicos vegetais (BHAGAT et al., 2021). É constituinte da plastocianina, proteína transportadora de elétrons durante o processo fotossintético; atua como cofator redox ativo em uma ampla variedade de proteínas como citocromo c oxidase e Cu/Zn-superóxido dismutase (Cu/Zn-SOD), enzima que atua na desintoxicação de espécies reativas de oxigênio (SANTOS et al., 2017). Assim, processos biológicos vitais, como fotossíntese, respiração mitocondrial, proteção contra estresse oxidativo, metabolismo da parede celular e metabolismo do etileno, são interrompidos em plantas com deficiência de cobre (MOREIRA et al., 2019), resultando em menores índices produtivos (SCHROTH, 2019).

Teixeira et al. (2003) avaliaram o estado nutricional de sete genótipos do coqueiro e concluíram que, embora o boro seja o micronutriente mais limitante para a cultura do coqueiro, o cobre e o zinco estavam limitando a cultura devido os teores foliares desses nutrientes estarem abaixo do nível crítico estabelecido, sugerindo que o solo não estava suprindo as necessidades de zinco e cobre do coqueiro (SOBRAL e ANJOS, et al., 2020).

No Pará, mesmo os solos sendo naturalmente pobres em micronutrientes devido à predominância de solos altamente intemperizados, caracterizados como de baixa fertilidade química natural e elevada acidez, e mesmo o cultivo do coqueiro sendo realizado predominantemente em solo com textura arenosa, onde a deficiência de micronutrientes ocorre com maior frequência por serem lixiviados com maior facilidade (DECHEN e NACHTIGALL, 2006), o zinco e o cobre não fazem parte do programa de adubação da cultura do coqueiro presente no Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Pará (BRASIL et. al., 2022).

Isto porque há uma escassez de informações sobre respostas do coqueiro à fertilização com micronutrientes (SOBRAL e ANJOS, 2022), principalmente para o estado do Pará, pois o estabelecimento da necessidade nutricional do coqueiro foi baseado em informações existentes na literatura (BRASIL et al., 2020), voltadas principalmente para as regiões Sudeste e Nordeste (TEIXEIRA et al., 2005). Segundo Lins et al. (2020) em plantas jovens de coqueiro, o teor de zinco em torno de  $15 \text{ mg kg}^{-1}$  e de cobre em torno de  $5 \text{ mg kg}^{-1}$  de massa seca é suficiente para o bom crescimento e desenvolvimento da cultura, e a fertilização é realizada somente quando os teores estão abaixo desses valores (BRASIL et al., 2020).

Contudo, um estudo mostrou que o suplemento de zinco e cobre melhora significativamente a germinação, crescimento e desenvolvimento de mudas de coqueiro, resultando em mudas de maior qualidade (WIJEBANDARA et al., 2014). A qualidade das mudas é fator essencial para o estabelecimento de uma planta produtiva, capaz de produzir frutos de qualidade durante longo tempo e rentável para o produtor (HOFEMANN et al., 2005). Além de melhorar o crescimento de mudas de coqueiro (WIJEBANDARA et al., 2014), estudos demonstraram que a fertilização com zinco pode melhorar o incremento de massa seca e o funcionamento do sistema fotossintético em outras plantas, tais como o Paricá (CALLEGARI et al., 2022); melhora o conteúdo de clorofila e atributos de trocas gasosas em arroz (AHMED et al., 2022); e melhora o rendimento e a qualidade nutricional de vários genótipos de feijão (ALMEIDA et al., 2020). Por fim, estudos envolvendo a fertilização com cobre demonstraram melhoras nas características morfológicas e bioquímicas em plantas de manjeriço (ABBASIFAR et al., 2020) e melhores aportes nutricionais, maior capacidade fotossintética, melhores taxas transpiratórias, maior condutância estomática, além de incrementos na concentração de clorofila em plantas de soja (CASATI et al., 2018).

Uma das formas de disponibilizar micronutrientes para as plantas é através da aplicação via foliar (NICCHIO et al., 2020). A fertilização de micronutrientes via foliar proporciona

alto índice de utilização dos nutrientes pelas plantas, pois, como as doses em geral são menores, as respostas das plantas são rápidas, sendo uma forma mais eficiente de correção de deficiência (ABREU et al., 2007). Somado a isso, a associação entre a aplicação de defensivos agrícolas e a fertilização de micronutrientes via foliar pode reduzir os custos desse tipo de fertilização (FERREIRA et al., 2020).

Assim, considerando a escassez de informações relacionadas à necessidade de fertilização com zinco e cobre em mudas de coqueiro anão-verde, tem-se o questionamento: seriam os teores citados na literatura para adubação, de 15 mg de zinco e 5 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de massa seca (valores supridos pelo solo), suficientes para que plantas de coqueiro anão-verde em fase de muda expressem seu potencial máximo de crescimento e o seu melhor desempenho fisiológico?

Dessa forma, este estudo parte da hipótese geral de que a suplementação com zinco e com cobre é capaz de melhorar a taxa de crescimento e os parâmetros fisiológicos de mudas de coqueiro anão-verde, tornando-as de melhor qualidade. Objetivou-se com este estudo analisar a influência de diferentes doses de zinco e diferentes doses de cobre, aplicadas via foliar, no crescimento, estado nutricional e fisiológico de mudas de coqueiro anão-verde cultivadas no estado do Pará.

Para testar as hipóteses, estudos específicos foram conduzidos (um experimento somente com aplicação de zinco e um experimento somente com aplicação de cobre) e serão apresentados em dois capítulos com os seguintes títulos:

Capítulo 2: Fertilização com zinco melhora o crescimento e desempenho fotossintético de mudas de coqueiro anão-verde.

Capítulo 3: Crescimento, trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a* em mudas de coqueiro anão-verde fertilizadas com cobre.

## REFERÊNCIAS

ARAGÃO, W. M.; TUPINAMBA, E. A.; ANGELO, P. C. da S.; RIBEIRO, F. E. Seleção de cultivares de coqueiro para diferentes ecossistemas do Brasil. In: QUEIROZ, M. A.; GOEDERT, C. O.; RAMOS, S. R. R. (Ed.). Recursos genéticos e melhoramento de plantas para o Nordeste Brasileiro. Petrolina, PE: Embrapa Semiárido, p.709-735, 2010.

ARAGÃO, W. M.; COSTA, A. S. da.; SANTOS, H. C. A. C.; PEDROSO, G. T. Florescimento, produção e composição morfológica de frutos de cultivares de coqueiro. *Agrotrópica*, Ilhéus, v. 14, n. 3, p. 151-158, 2002.

ABBASIFAR, A. SHAHRABADI, F.; VALIZADEHKAJI, B. Effects of green synthesized

zinc and copper nano-fertilizers on the morphological and biochemical attributes of basil plant. **Journal of Plant Nutrition**, v. 43, n.8, p.1104-1118, 2020.

ABREU, C. A.; LOPES, A. S.; SANTOS, G. C. G. Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. Fertilidade do solo. Viçosa, MG: SBCS, 2007.

ABDOLI, M. ESFANDIARI, E. Selecting High Zinc-efficient and Assessment of Zinc Stress Tolerance of the Wheat Durum Genotypes. **J Genet Resour**2020; v.6: p. 106-121, 2020.

AHMED, N.; HUSSAIN, H. Z.; ALI, M. A.; RAHI, A. A.; SALEEM, M.; AHMAD, F. Effect of zinc on chlorophyll contents, gas exchange attributes and zinc concentration in rice. **Pakistan Journal of Botany**, v.54, p.14-22, 2022.

AZEVEDO, A. O. N.; AZEVEDO, C. D. de O.; SANTOS, P. H. A. D.; RAMOS, H. C. C.; BOECHAT, M. S. B.; ARÊDES, F. A. S.; RAMOS, S. R. R; MIRISOLA, L. A.; PERERA, L.; ARAGÃO, W. M.; PEREIRA, M. G. Selection of legitimate dwarf coconut hybrid seedlings using DNA fingerprinting. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 18, n. 4, p. 409-416, 2018.

BARROS, S. R. A. de F. Cocoicultura: um enfoque mundial, nacional e no estado de Alagoas. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental.**, v. 11, n. 4, p. 333-343, dez. 2022.

BHAGAT, M. et al. Multifunctional Copper Nanoparticles: Synthesis and Applications. **ECS Journal of Solid State Science and Technology**, v. 10, n. 1, p. 1-11, 2021.

BRAINER, M. S. C. P. Coco: produção e mercado. Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste ETENE. 2021.

BRASIL, E. c., CRAVO, M. S.; VIÉGAS, I. de J. M. Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará. 2a edição, revista e atualizada. Brasília, DF: Embrapa; 419 p. 2020.

BROETTO, F.; GOMES, E. R.; JOCA, T. A. C. O estresse das plantas: teoria & prática – São Paulo: cultura Acadêmica, 2017.

BENASSI, A. C; FANTON, C. J.; SANTANA, E. N. O cultivo do coqueiro-anão-verde: tecnologias de produção. Incaper - Instituto capixaba de Pesquisa, Assistência técnica e extensão Rural, Vitória-ES, 2013.

CABOT, C.; MARTOS, S.; LLUGANY, M.; GALLEGO, B.; TOLRÁ, R.; POSCHENRIEDER, C. A role for zinc in plant defense against pathogens and herbivores. **Frontiers in plant Science**. v. 10, p. 181-190, 2019.

CALLEGARI, D. M.; SILVA, B. do C.; SANTOS, L. R. dos; PEREIRA JUNIOR, E. M.; BATISTA, B. L.; LOBATO, A. K. da S.; LOBATO, E. M. S. G. Physiological, biochemical and nutritional aspects in *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) plants under different zinc supplies. **Brazilian Journal of Botany**, v.45, p.845-855, 2022.

CASATI, D. F. G.; BUSI, M. V.; PAGANI, M. A. Plant frataxin in metal metabolism. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, n. 1, p. 1-8, 2018.

CAKMAK, I.; KALAYCI, M.; KAYA, Y.; TORUN, A. A.; AYDIN, N.; WANG, Y.; ARISOY, Z.; ERDEM, H.; YAZICI, A.; GOKMEN, O.; OZTURK, L.; HORST, W. J. Biofortification and localization of zinc in wheat grain. *Journal Agric. Food Chem*, v.25; p.092-102, 2010.

CUENCA, M. A. G. A cultura do coqueiro. Sistema de produção Embrapa, 2023.

DECHER, A. R.; NACHTIGALL, G. L. Micronutrientes. In: FERNANDES, M. S. Nutrição mineral de plantas. Viçosa, MG: SBPC, p.327-354, 2006.

DIAS, B. C. Subsídios ao grupo de trabalho para a elaboração de diretrizes da política nacional e coco (cocos nucifera L.), CEPLAC, Maceió, 1980.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2018). Production of Coconuts: Top 10 producers. Retrieved from.

FERREIRA, C. P.; CRAVO, M. da S.; FERREIRA, E. V. de O. Fertilizantes minerais. In: BRASIL, E. c., CRAVO, M. S.; VIÉGAS, I. de J. M. Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará. 2a edição, revista e atualizada. Brasília, DF: Embrapa; 419 p. 2020

FRÓES JÚNIOR, P.S.M.; AVIZ, W.L.C.; REBELLO, F.K.; SANTOS, M.A.S. Sources of growth and spatial concentration of coconut crop in the state of Pará, Brazilian Amazon. **Journal of Agricultural Science**, v.11, p.159-168, 2019.

HOFFMANN, A.; BERNARDI, J.; NACHTIGAL, J. C. Sistema de produção de ameixa Européia. Embrapa Uva e Vinho. 2005.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Produção de coco-da-baía. 2021. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/coco-da-baia/br> >. Acesso em: janeiro de 2023.

LIMA, E.B.C., SOUSA, C.N.S., MENESES, L.N., XIMENES, N.C., SANTOS-JUNIOR, M.A. Cocos nucifera Linn (Arecaceae): a phytochemical and pharmacological review. **Brazilian Journal of Medical and Biological Research**, p.1–12. 2015.

LINS, P. M. P. & VIÉGAS, I. J. M. Adubação do coqueiro no Pará. Belém-PA: Embrapa Amazônia Oriental, 28 p., 2008.

LINS, P. M. P.; VIEGAS, I. J. M.; F. E. V. O. Nutrition and production of coconut palm cultivated with mineral fertilization in the state of Pará. **Revista Brasileira de Fruticultura**. 2020.

LINS, P. M. P.; VIEGAS, I. J. M. Coqueiro. In: BRASIL, E. c., CRAVO, M. S.; VIÉGAS, I. de J. M. Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará. 2a edição, revista e atualizada. Brasília, DF: Embrapa; 419 p. 2020.

MOREIRA, A.; MORAES, L. A. C.; SCHROTH, G. Copper fertilization in soybean-wheat intercropping under no-till management. **Soil & Tillage Research**. v. 193, p. 133-141. 2019.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI,

- R. B.; NEVES, J. C. L. Fertilidade do solo. Viçosa, MG: SBCS, 2007.
- NICCHIO, B; SANTOS, G. A.; LINO, A. C. M.; RAMOS, L. A.; PEREIRA, H. S.; KORNDÖRFER, G. H. Efeito da adubação foliar em soqueira de cana-de-açúcar. **Acta Iguazu**, v.9, p.10-24.2020.
- QUEIROZ, M. A.; GOEDERT, C. O.; RAMOS, S. R. R. (Ed.). Recursos genéticos e melhoramento de plantas para o Nordeste Brasileiro. Petrolina, PE: Embrapa Semiárido, p.709-735. 2010.
- PRADO, R. M. Nutrição de plantas. São Paulo: Editora Unesp, 2a Edição, 2020. 414p. 2020.
- RIBEIRO, F. E.; COSTA, E. F. N.; ARAGÃO, W. M. Melhoramento Genético. Embrapa Tabuleiros Costeiro. 2021.
- RIBEIRO, G.; MONNERAT, P. H.; CAMPANHARO, M.; RABELLO, W. S. Adubação potássica aplicada na axila foliar e no solo em coqueiro anão verde. **Revista Ceres**, v. 63, n.1, p. 068-075, 2016.
- REBELLO, F. K., REALE FILHO, H. B., & FIGUEIREDO, R. N. (2003). Diagnóstico e perspectiva econômica da cadeia produtiva do coco-da-baía no Estado do Pará. In H. Graça (Eds.), *O meio Amazônico em Desenvolvimento: Exemplos de alternativas econômicas* (pp. 133-198). Banco da Amazônia S/A.
- SANTOS, T. D. P. Análise agroclimática da cultura do coqueiro para a cidade de Rio Real (BA). Dissertação, Centro Universitário AGES, Paripiranga, 69 p., 2021.
- SCHROTH, G.; MOREIRA, A.; MORAES, L. A. C. Copper fertilization in soybean–wheat intercropping under no–till management. **Soil and Tillage Research**, v. 193, n. 1, p. 133-141, 2019.
- SOBRAL, L. F.; ANJOS, J. L. Teores de cobre no solo e na folha e a produção do coqueiro anão verde. Embrapa Tabuleiros Costeiro. 21.ed. Aracajú, SE, 2022. 41p.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. 6.ed. Porto Alegre: ArtMed, 2017. 888p.
- TEIXEIRA, L. A. J.; Bataglia, O. C.; Buzetti, S.; Furlani Junior, E.; Isepon, J. dos S. NPKfertilization on dwarf green coconut (*Cocos nucifera* L.) – yield and fruit quality. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.27, p.120-123, 2005.
- VIEIRA, R. F. Ciclo do Nitrogênio em sistemas agrícolas. Embrapa Meio Ambiente. 2027.
- WIJEBANDARA, D. M. D. I.; VIDHANAARACHCHI, V. R. M.; GUNATHILAKA, T. R.; Tennakoon, N. A. Effect of Copper and Zinc on Embryo Germination and Seedling Growth of Coconut (*Cocos nucifera* L.). **Fifth Symposium on Plantation Crop Research**, Sri Lanka.2014.

## 2. FERTILIZAÇÃO COM ZINCO MELHORA O CRESCIMENTO E DESEMPENHO FOTOSSINTÉTICO DE MUDAS DE COQUEIRO ANÃO-VERDE

(Artigo publicado na Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental)

DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n11p864-872>

### RESUMO

O zinco é um micronutriente de importância essencial para o metabolismo vegetal, é estudado para diversas culturas de interesse econômico para o Brasil, porém sem evidências de estudo para mudas de coqueiro anão-verde cultivadas no estado do Pará. Objetivou-se com este estudo avaliar a influência da fertilização com diferentes doses de zinco via foliar em mudas de coqueiro anão-verde, por meio do estado nutricional, atributos de crescimento e trocas gasosas. Para isso foi conduzido um experimento em casa de vegetação, entre setembro de 2021 e abril de 2022, no estado do Pará. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, os tratamentos constituídos por doses de zinco (0, 5, 10, 15, 20 e 25 g planta<sup>-1</sup>), com cinco repetições. As mudas foram influenciadas positivamente pelas doses de Zn principalmente nos parâmetros de crescimento e nas trocas gasosas. No estado nutricional as doses de Zn afetaram de maneira decrescente o ferro e o manganês, com reduções de 45% e 38% na dose de 25 g de Zn por planta, respectivamente, e aumentaram o Zn para valores acima de 100% no tecido foliar, quando comparado com o tratamento controle. Nas variáveis de crescimento a dose de 16 g de Zn proporcionou incrementos de 40% na área foliar, 7% na altura, 29% massa seca da parte aérea e 22% na massa seca total. Nas trocas gasosas a dose de 16 g de Zn melhorou a fotossíntese em 38%, a transpiração em 67%, a condutância estomática em 83% e a concentração interna de CO<sub>2</sub> em 52%. A melhora nesses índices de crescimento e trocas gasosas, na maioria das variáveis, foi maior nas plantas que receberam 16 g de Zn por planta e apresentaram teor de 82 mg kg<sup>-1</sup>, mostrando que 15 mg kg<sup>-1</sup> não é suficiente para que mudas de coqueiro anão-verde expressem seu máximo potencial de crescimento e máximo funcionamento do seu sistema fotossintético.

**Palavras-chave:** Cocos nucifera L., micronutriente, manejo da fertilização, melhor dose de zinco, mudas

## **ABSTRACT**

Zinc is an essential micronutrient for plant metabolism and has been studied in several crops of economic interest. However, there is no evidence of its use in coconut crops. The objective of this study was to evaluate the influence of foliar zinc fertilization with doses of zinc on dwarf green coconut seedlings based on their nutritional status, growth attributes, and gas exchange. The experimental design consisted of randomized blocks, and the treatments consisted of different zinc doses (0, 5, 10, 15, 20, and 25 g per plant) with five replicates. Seedlings were positively influenced by zinc dose, mainly in terms of growth variables and gas exchange. In terms of nutritional status, Zn doses had a decreasing effect on iron and manganese, with reductions of 45% and 38% at a dose of 25 g of Zn per plant, respectively, and increased Zn to values above 100% in leaf tissue, when compared with the control treatment. In the growth variables, the dose of 16 g of Zn provided increases of 40% in leaf area, 7% in height, 29% dry mass of the shoot and 22% in total dry mass. In gas exchange, a dose of 16 g of Zn improved photosynthesis by 38%, transpiration by 67%, stomatal conductance by 83% and internal CO<sub>2</sub> concentration by 52%. The improvement in these growth and gas exchange rates, in most variables, was greater in plants that received 16 g of Zn per plant and reached a content of 82 mg kg<sup>-1</sup>, showing that 15 mg kg<sup>-1</sup> is not enough for seedlings of green dwarf coconut palm expresses its maximum growth potential and maximum functioning of its photosynthetic system.

**Keywords:** *Cocos nucifera* L., micronutrient, fertilization management, best dose of zinc, seedlings

## 2.1 Introdução

O cultivo do coqueiro (*Cocos nucifera* L.) é uma atividade agrícola de importância econômica no Brasil (LINS et al., 2021). O Estado do Ceará é o maior produtor nacional, seguido pela Bahia, Pará e Sergipe (IBGE, 2021). O Pará, estado onde esta pesquisa foi desenvolvida, apresenta 17.646 hectares plantados e produtividade em torno de 9.501 frutos por hectare (IBGE, 2021). Embora existam locais com altos níveis de tecnologia, o aumento da produção de coco no Pará está relacionado principalmente ao aumento da área plantada e dentre os atuais desafios para o cultivo de coco, está o ganho de produção pelo incremento na produtividade (FRÓES JUNIOR et al., 2019).

A adubação mineral é utilizada para promover o crescimento e aumentar a produtividade da cultura (LINS et al., 2021), no caso das variedades anões, a necessidade de fertilização é ainda maior porque extrai mais nutrientes do solo do que os genótipos cultivados tradicionalmente (TEIXEIRA et al., 2005). Estudos no Brasil que avaliaram a resposta de fertilização mineral em coqueiro anão-verde são voltados principalmente para os macronutrientes nitrogênio, fósforo e potássio (RIBEIRO et al., 2016), poucos relatos de estudos com o zinco (Zn).

A importância da fertilização com Zn é relatada para diversas culturas de importância econômica, a exemplos o milho (*Zea mays* L.) e paricá (*Schizolobium amazonicum*) (MOREIRA et al., 2020; CALLEGARI et al., 2022). Estudos têm confirmado que a fertilização com Zn afeta positivamente o crescimento e o desempenho fotossintético das culturas (KHAN e AHMED et al., 2022; AHMED et al., 2022). O Zn é de importância essencial para o crescimento das culturas e maior produção (DAS et al., 2018), é componente de inúmeras enzimas como anidrases, oxidases e peroxidases, e desempenha importante papel na divisão celular, fotossíntese e síntese de auxinas (NOULAS et al., 2018).

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência da fertilização com diferentes doses de Zn via foliar em mudas de coqueiro anão-verde, por meio do estado nutricional, atributos de crescimento e trocas gasosas.

## 2.2 Material e métodos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada na Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém-PA (1°27'07''S e 48°26'07''W, altitude 52 metros) entre setembro de 2021 a abril de 2022. Durante o experimento, a temperatura e a umidade relativa do ar foram medidas por meio de um termo-higrômetro instalado na casa de vegetação, sendo 35,3°C a temperatura média máxima, 21,8°C a mínima e 77,1% a umidade relativa média. Foram utilizadas mudas de coqueiro da variedade anão-verde, com 2 meses de idade, produzidas a partir de sementes provenientes da empresa Sococo - S.A (Figura 1).



**Figura 1.** Produção das mudas realizada na Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), a partir de sementes provenientes da empresa Sococo – S.A.

**Fonte:** Moraes (2021)

O substrato utilizado no ensaio foi um Neossolo Quartzarênico distrófico coletado na fazenda Reunidas Sococo, no município de Santa Isabel, estado do Pará, Brasil. O substrato foi coletado na camada arável (0-20 cm) e apresentava antes da instalação do experimento as seguintes características químicas e granulométricas (Tabela 1). Antes do plantio das mudas de coqueiro, as amostras de solos foram secas ao ar e peneiradas em malha de 4 mm e acondicionadas em vasos de 17 kg de capacidade. A preparação das amostras e as análises químicas foram realizadas de acordo com Teixeira et al. (2017). A irrigação foi realizada diariamente, o teor de umidade do solo foi mantido durante todo o experimento de forma manual, com uso de becker de 1 litro, e a quantidade de água foi de acordo com a necessidade de cada planta.

Tabela 1. Características químicas e granulométricas do Neossolo Quartzarênico, camada 0-20 cm

pH H <sub>2</sub> O	pH CaCl <sub>2</sub>	H+Al	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Al <sup>+3</sup>	K <sup>+</sup>	CTC pH7	P	S	V%	m%
-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----						-----mg dm <sup>-3</sup> -----					
4.2	3.4	2.8	0.8	0.3	0.3	0.02	3.92	1.5	3	29	20.3
Baixo	Baixo	Médio	Baixo	Baixo	Médio	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo
B		Cu		Fe	Mn	Zn	Areia	Silte		Argila	
-----mg dm <sup>-3</sup> -----							-----g kg <sup>-1</sup> -----				
0.25		0.5		330	4.7	1	861.7	47.6		90.7	
Baixo		Baixo		Alto	Baixo	Médio					

Fósforo (P), manganês (Mn), ferro (Fe), cobre (Cu), zinco (Zn) – Extrator Mehlich 1; cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) – Extrator Resina; boro (B) – Método água quente. Potencial hidrogeniônico em água (pH H<sub>2</sub>O); potencial hidrogeniônico em cloreto de cálcio (pH CaCl<sub>2</sub>); acidez potencial (H+Al); alumínio (Al); capacidade de troca catiônica (CTC); enxofre (S); saturação por bases (V%); saturação por alumínio (m%).  
 Fonte: Brasil et al., (2020); Ribeiro et al., (1999)

Empregou-se o delineamento experimental blocos ao acaso, com tratamentos constituídos por doses de Zn (0, 5, 10, 15, 20 e 25 g planta<sup>-1</sup>), com cinco repetições, perfazendo 30 unidades experimentais. 60 dias antes do transplântio, cada vaso recebeu 13,6 g de calcário dolomítico a fim de elevar a saturação por bases de 29% para 60%. As mudas foram adubadas no primeiro, terceiro e quinto meses de idade com 1,35; 2,7 e 4,05 g planta<sup>-1</sup> de nitrogênio; 7,2; 14,4 e 21,6 g planta<sup>-1</sup> de fósforo; 6, 12 e 18 g planta<sup>-1</sup> de potássio; 1,5; 3 e 4,5 g planta<sup>-1</sup> de magnésio, respectivamente e 0,3 g planta<sup>-1</sup> de boro no quinto mês (LINS e VIÉGAS, 2008). Os adubos utilizados para a fertilização foram ureia (45% de N), superfosfato simples (18% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), cloreto de potássio (60% de K<sub>2</sub>O), óxido de magnésio (30% de Mg) e borax (10% de B). As doses de zinco foram aplicadas via foliar de acordo com os tratamentos definidos e a fonte utilizada foi óxido de zinco (40% de Zn) (Figura 2).



**Figura 2.** Formulação dos tratamentos compostos pelas cinco doses de zinco  
**Fonte:** Moraes (2021).

Os efeitos dos tratamentos foram avaliados 210 dias após o transplântio com análise do estado nutricional, crescimento e trocas gasosas. O estado nutricional das plantas foi avaliado por meio da concentração de macro e micronutrientes no tecido foliar. Os macronutrientes avaliados foram: nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), enxofre (S), cálcio (Ca) e magnésio (Mg); e micronutrientes: boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn). Para avaliação da concentração dos nutrientes na folha amostras de tecido foliar foram coletadas e submetidas a secagem em estufa com circulação de ar a 60 ° C até peso constante. O material seco foi triturado em moinho do tipo Willey (modelo MA 340, Marconi, BR). As análises foram realizadas de acordo com EMBRAPA (2000).

O crescimento da planta foi avaliado por mensuração da altura (H), área foliar (AF), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR) e massa seca total (MST). A H (cm) das plantas foi mensurada com o auxílio de uma trena métrica graduada, considerando-se a distância vertical entre o coleto da planta e a extremidade da maior folha esticada. A AF (cm<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>) foi obtida logo após a coleta das plantas, utilizando-se um integrador de área (LI-3100, Li-Cor, Inc. Lincoln, NE, USA), as folhas foram retiradas da planta e analisadas individualmente no aparelho. Para a obtenção da MSR, MSPA e MST as plantas foram colhidas e após separação das partes aérea e radicular, foram acondicionadas e secas em estufa com circulação de ar, a 70°C, até peso constante. Cada amostra teve sua biomassa seca (g) quantificada em balança analítica-

As trocas gasosas foram determinadas com base na fotossíntese (A), transpiração (E), condutância estomática (gs), concentração interna de CO<sub>2</sub> (Ci), eficiência instantânea do uso da água por meio da A/E (EisUA) e eficiência intrínseca do uso da água por meio da A/gS (EicUA). Foram avaliadas no terceiro folíolo da quarta folha totalmente expandida de cada planta, com auxílio de um analisador de gases infravermelho portátil (IRGA, modelo LI-6400XT, da marca LICOR®). A intensidade luminosa artificial utilizada nas avaliações das trocas gasosas foi de 1.000 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> e foram mantidas as condições ambientais de temperatura do ar e concentração de CO<sub>2</sub>. As avaliações foram realizadas no turno da manhã, entre 9:00 e 11:00 h, com temperatura de 34,51 °C e umidade relativa do ar de 59,12% dentro da casa de vegetação.

A análise estatística foi realizada utilizando o programa estatístico R versão 4.2.0. Para resultados de nutrição, crescimento e trocas gasosas foram realizadas análises de regressão (linear e quadrática) e as equações foram escolhidas com base na significância dos coeficientes. A análise de componentes principais (factoextra package) e correlação de Pearson (ggcorrplot2 package) foram realizadas por análise multivariada com as variáveis de crescimento e trocas

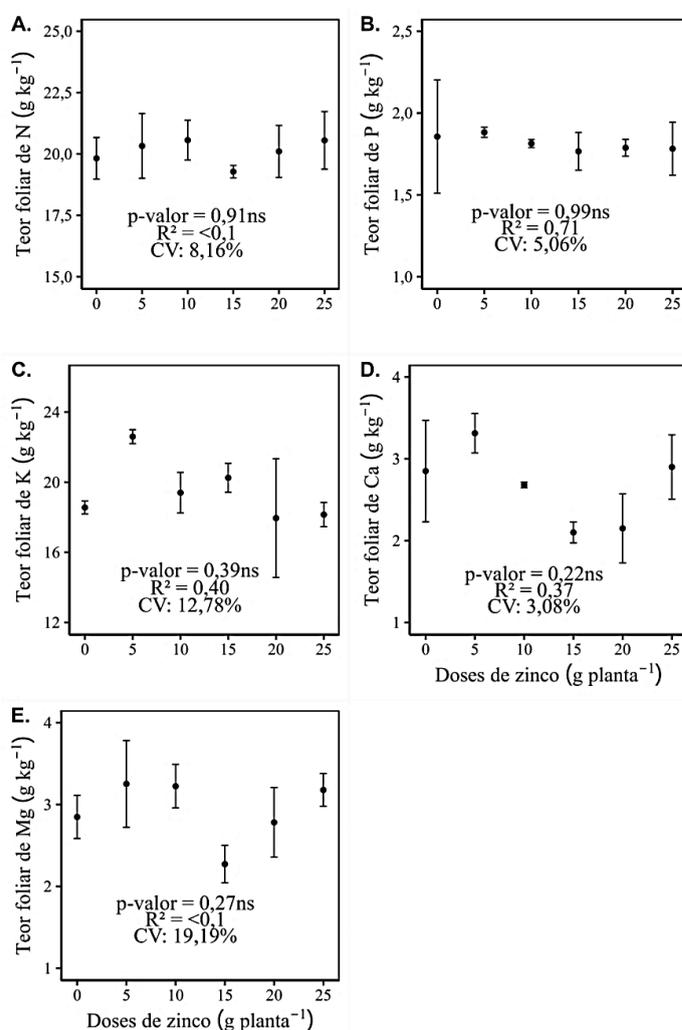
gasosas. Nas variáveis com comportamento quadrático foi determinado, por meio da derivação da equação, o ponto de máximo, ou seja, o cálculo da máxima eficiência técnica.

### 2.3 Resultados e discussão

Devido à escassez de informações relacionadas à nutrição de mudas de coqueiro anão-verde, os dados de literatura que serão citados na comparação dos resultados obtidos neste estudo serão dados referentes à coqueiro anão adulto e dados estimados para plantas em campo.

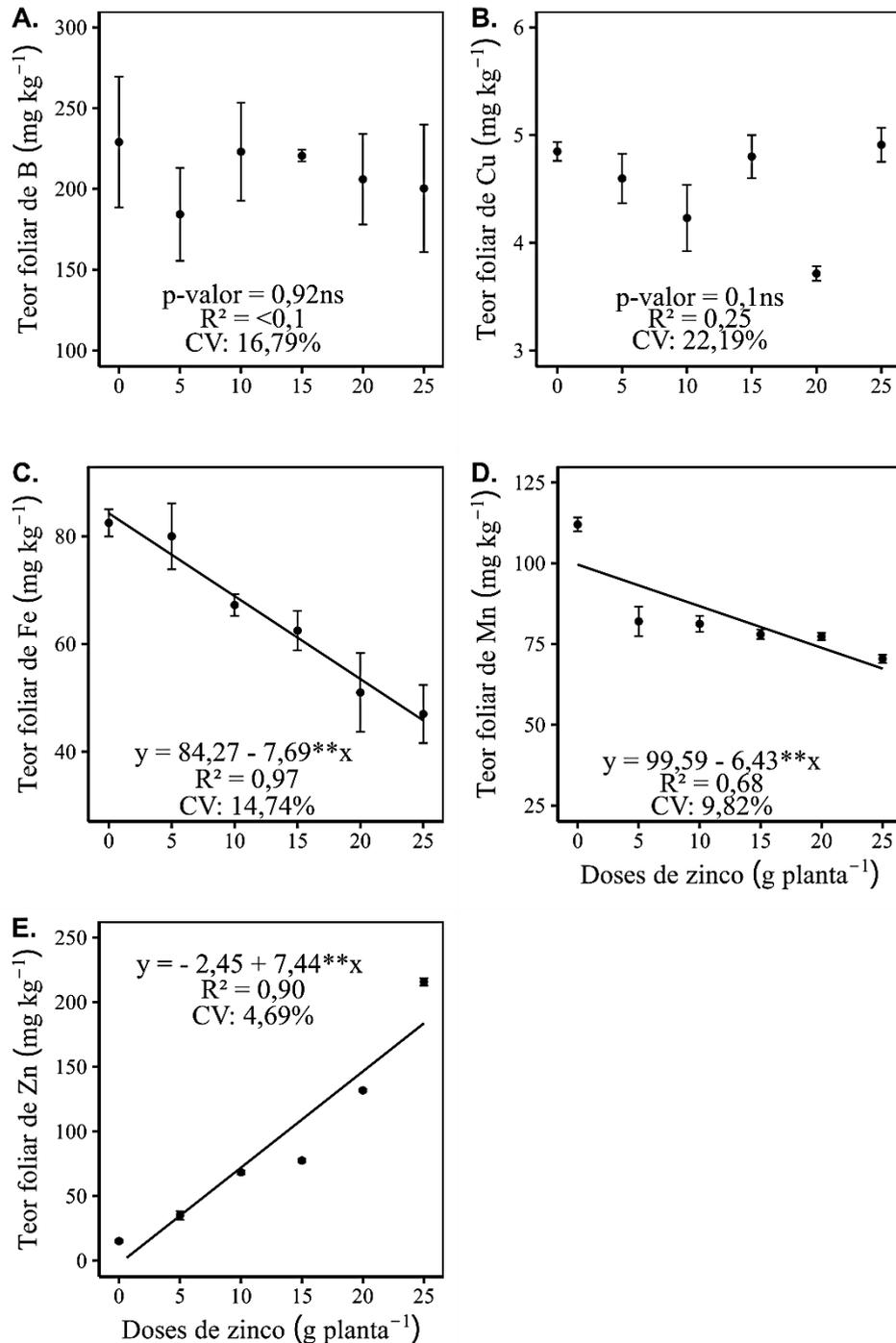
#### Influência do zinco no estado nutricional

De acordo com os resultados obtidos neste estudo as doses de Zn não influenciaram nos teores de macronutrientes no tecido foliar das mudas de coqueiro (Figura 3).



**Figura 3.** Influência das doses de zinco no nitrogênio - N (A), fósforo – P (B), potássio - K (C), cálcio - Ca (D), magnésio - Mg (E) presente no tecido foliar de mudas de coqueiro anão-verde. ns: não significativo pelo teste F; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; CV: coeficiente de variação. As barras verticais indicam erro padrão das médias (n = 5).

Já nos micronutrientes a fertilização com doses de Zn influenciou nos teores de Fe, Mn e Zn (Figura 4). As concentrações de Fe e Mn foram afetadas de maneira linear e decrescente pelas doses de Zn (Figura 4C e 4D) e o Zn foi influenciado de maneira linear e crescente (Figura 4E).



**Figura 4.** Influência das doses de zinco no boro - B (A), cobre - Cu (B), ferro - Fe (C), manganês - Mn (D) e zinco - Zn (E) presente no tecido foliar de mudas de coqueiro anão-verde. ns: não significativo; \* significativo a  $p \leq 0,05$ , \*\* significativo a  $p \leq 0,01$  pelo teste F;  $R^2$ : coeficiente de determinação; CV: coeficiente de variação. As barras verticais indicam erro padrão das médias ( $n = 5$ ).

As plantas fertilizadas com Zn apresentaram menores concentrações de Fe e Mn quando comparadas com as plantas não fertilizadas. As maiores reduções ocorreram na dose de 25 g de Zn por planta, em que o teor de Fe reduziu 45% (Figura 4C) e o teor de Mn 38% (Figura 4D). Resultados semelhantes foram relatados por Callegari et al. (2022) para paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*) e Kume et al. (2021) em plantas de milho (*Zea mays* L.), com reduções nas concentrações foliares de Fe e Mn em função da fertilização com Zn. Isso pode ser atribuído ao efeito antagonico entre Zn e Fe e Zn e Mn no processo de absorção, transporte e reação química dentro das células vegetais (RAI et al., 2021; ALMENDROS et al., 2022).

A redução do teor de Fe em função da aplicação de Zn permitiu que o teor desse micronutriente ficasse mais próximo do valor de 40 mg kg<sup>-1</sup> considerado adequado para a cultura do coqueiro (LINS et al., 2020). O teor de Fe encontrado no tecido foliar das plantas controle foi de 82,50 mg kg<sup>-1</sup>, ou seja, 100% acima do nível recomendado para a cultura, porém não foram identificados sintomas visuais de toxidez na planta. O excesso de Fe no tecido foliar pode causar desbalanços nutricionais nas plantas induzindo deficiência de nutrientes como P, Ca, K, e Mg, e também, pode induzir a formação de espécies reativas de oxigênio e causar severas reduções no crescimento e na produtividade das plantas (JUCOSKI et al., 2016).

Em relação aos teores de Mn, as plantas fertilizadas com Zn apresentaram valores entre 82 e 70,40 mg kg<sup>-1</sup>, considerados abaixo do adequado por LINS et al. (2020), que é de 100 mg kg<sup>-1</sup>. No entanto, nenhuma planta apresentou sintoma visual de deficiência de Mn, que se caracteriza por clorose da superfície das folhas jovens (PRADO, 2020).

Já com relação ao Zn, a cada 1 grama de zinco aplicado houve o incremento de 7,44 mg de Zn no tecido foliar de mudas de coqueiro anão-verde. Na maior dose utilizada (25 g por planta), houve aumento acima de 100%, atingindo concentração de 215 mg kg<sup>-1</sup> de massa seca (Figura 4E).

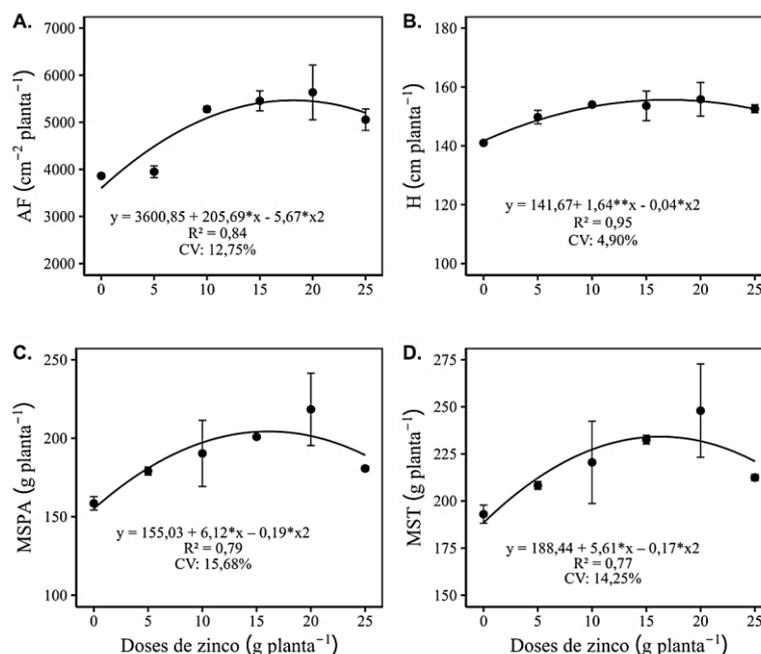
Estudos mostram que a sensibilidade ao Zn varia conforme a dose aplicada e a espécie vegetal (GELSLEICHTER et al., 2021). Os resultados que serão apresentados a seguir mostram que o aumento da dose de zinco mesmo aumentando o conteúdo de zinco foliar em todas as doses utilizadas (Figura 4E), permitiu que a maioria das variáveis de crescimento e trocas gasosas aumentassem apenas até a dose estimada de aproximadamente 16 g por planta, cuja concentração de Zn na folha se apresentou em torno de 82 mg kg<sup>-1</sup> de massa seca, decrescendo gradativamente com o aumento da dose e aumento da concentração de zinco na folha, esse comportamento também foi observado para a cultura da ervilha por Borah e Saikia (2022).

Isso mostra a importância do manejo da fertilização de Zn para mudas de coqueiro anão-verde. É importante ressaltar que segundo Lins et al. (2020) a exigência nutricional do coqueiro

anão adulto é de 15 mg kg<sup>-1</sup>, portanto as concentrações de Zn presentes nas plantas que apresentaram os maiores incrementos nas variáveis analisadas estão acima do valor mínimo exigido pela cultura na fase adulta, valores entre 68 e 82 mg kg<sup>-1</sup>.

### Influência do zinco no crescimento

A fertilização com Zn via foliar influenciou a AF, H, MSPA e MST e não influenciou na MSR e todas as variáveis foram afetadas de forma quadrática pelas doses de Zn (Figura 5). Para AF a dose de Zn estimada no ponto de máximo foi 18,14 g de Zn por planta, com ganho de 205,6 cm<sup>2</sup> por planta a cada grama de Zn aplicado e permitiu um incremento de 40% quando comparada com o tratamento controle, decrescendo após esta dose (Figura 5A). Para H a dose de máxima eficiência técnica foi em torno de 16,87 g de Zn por planta, com aumento de 1,64 cm por planta a cada grama aplicada, permitindo ganho de 7% ao comparar com as plantas não fertilizadas, com decréscimo a partir desse valor (Figura 5B). A MSPA teve seu máximo incremento na dose estimada de 16,10 g de Zn, aumentando 6,12 g por planta a cada grama de Zn adicionada e apresentou aumento de 29% e decréscimo com dose acima de 16,10 g de Zn (Figura 5C). E a MST foi beneficiada até a dose estimada de 16,29 g de Zn por planta, com ganho de 5,61 g por cada grama de zinco aplicada, com aumento de 22% ao comparar com o tratamento controle (Figura 5 D).



**Figura 5.** Influência das doses de zinco na área foliar (AF), Altura (H), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca total (MST). \*- significativo a  $p \leq 0,05$ , \*\* - significativo a  $p \leq 0,01$  pelo teste F; R<sup>2</sup> – coeficiente de determinação; CV – coeficiente de variação. As barras verticais indicam erro padrão das médias (n = 5).

Os resultados obtidos neste estudo condizem com estudos desenvolvidos com feijão verde (*Phaseolus vulgaris* L.) por Almeida et al. (2020); beringela (*Solanum melongena* L.) por Semida et al. (2021); e paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*) por Callegari et al. (2022) e mostram a importância da fertilização com zinco, porém em doses adequadas.

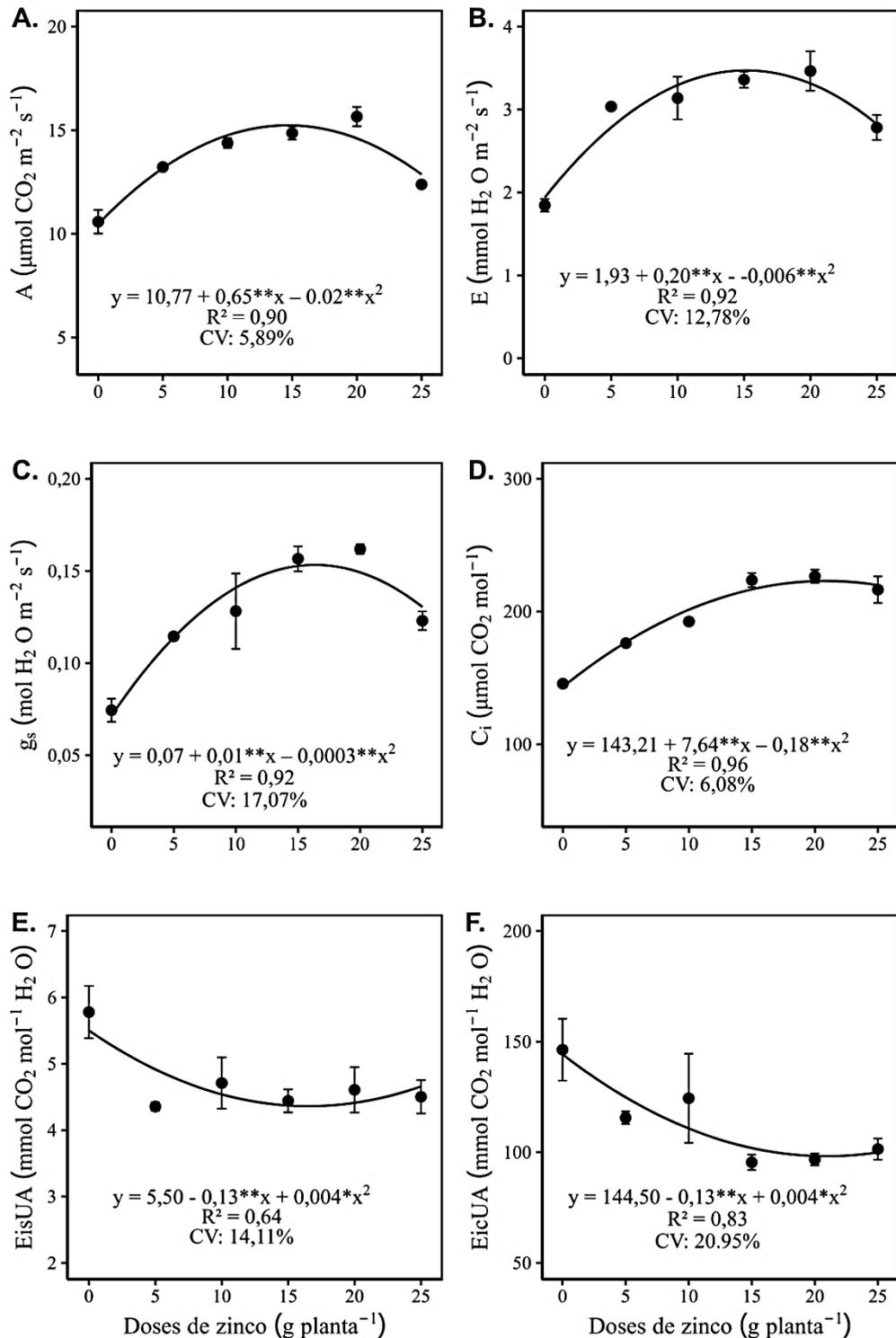
Acredita-se que os incrementos obtidos no crescimento das mudas de coqueiro devem-se ao fato do Zn ser regulador de genes envolvidos na síntese de aminoácidos, proteínas, carboidratos e síntese do triptofano (LIU et al., 2022), o qual é precursor do ácido indolacético (AIA), hormônio de crescimento dos vegetais, que estimula o desenvolvimento e o alongamento celular das partes jovens das plantas (TAIZ et al., 2017; CASTILLO-GONZÁLEZ et al., 2018). Além disso, pode-se atribuir o crescimento das mudas de coqueiro à função de ativador enzimático que o Zn possui. O mesmo foi sugerido por Ahmed et al. (2018) e Khan e Ahmed (2022) que descobriram que o Zn melhorou o crescimento de mangueiras (*Mangifera indica* L.) com a ativação das reações enzimáticas. O Zn é cofator de mais de 300 enzimas, incluindo álcool desidrogenase, anidrase carbônica e RNA polimerase (CASTILLO-GONZÁLEZ et al., 2018). A RNA polimerase sintetiza RNA, então, em plantas com baixo suprimento de Zn há a diminuição da síntese de proteínas devido à falta de RNAs mensageiro e transportador o que compromete diretamente o crescimento das plantas (PRADO, 2020).

A nutrição adequada com Zn é crucial para aumentar o crescimento das plantas (ULLAH et al., 2019). Assim como a deficiência de zinco compromete o crescimento das plantas, o excesso também pode causar redução nas taxas de crescimento devido a distúrbios fisiológicos, conforme relatado em outras plantas (KHAN et al., 2022). Esta constatação explica os resultados obtidos neste estudo. As taxas de crescimento das mudas de coqueiro melhoraram com o incremento de zinco proporcionado pela fertilização via foliar, no entanto, como mencionado anteriormente, a maior parte das variáveis de crescimento se beneficiaram da fertilização com zinco até a dose de 16 g por planta, reduzindo nas plantas que receberam dose acima dessa. Assim, tanto a ausência como o excesso de aplicação de Zn podem comprometer o crescimento de mudas de coqueiro. Portanto, é necessário ajustar o manejo deste micronutriente para a cultivar anão-verde.

### **Influência do zinco nas trocas gasosas**

As doses de zinco tiveram efeitos positivos sobre A, E, gs, Ci, EisUA e EicUA de mudas de coqueiro anão-verde. As mudanças nas principais variáveis de trocas gasosas foram semelhantes às observadas para a produção de biomassa vegetal, as plantas controle exibiram os menores valores de A, E, gs e Ci, aumentando de forma quadrática com o aumento das doses

de Zn via foliar (Figura 6).



**Figura 6.** Influência das doses de zinco na fotossíntese (A), condutância estomática ( $g_s$ ) concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ), transpiração (E), eficiência instantânea do uso da água ( $E_{isUA}$ ), eficiência intrínseca do uso da água ( $E_{icUA}$ ). \*- significativo a  $p \leq 0,05$ , \*\* - significativo a  $p \leq 0,01$  pelo teste F;  $R^2$  – coeficiente de determinação; CV – coeficiente de variação. As barras verticais indicam erro padrão das médias ( $n = 5$ ).

Na variável A, a fertilização com zinco influenciou positivamente até a dose estimada de 14,77 g de Zn por planta, com aumento de 0,65  $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  para cada 1 grama de Zn aplicado, isto equivale a aumento de 38% na taxa fotossintética em comparação com o tratamento controle (Figura 6A). Após a dose de 14,77 g de Zn por planta a taxa fotossintética decaiu 0,02  $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  para cada 1 grama de Zn aplicado (Figura 6A). Portanto, a fertilização com Zn na cultura do coqueiro deve ser realizada com moderação para que as plantas não sejam prejudicadas pelo excesso de Zn.

Estudos mostram que a fertilização com doses adequadas de Zn melhora significativamente os processos fotossintéticos das plantas (CALLEGARI et al., 2022; MOREIRA et al., 2020; AHMED et al., 2022). Os resultados obtidos no presente estudo corroboram com resultados observados para outras culturas. Sugere-se que o aumento na A dos coqueiros que receberam Zn é relacionado aos seguintes fatores: 1) o Zn é um cofator da metaloenzima vegetal denominada anidrase carbônica (TAIZ et al., 2017); 2) o Zn melhora a concentração de clorofila nas plantas (AHMED et al., 2022; REHMAN et al., 2018); 3) o Zn é um ativador da aldolase, enzima chave na glicólise (CASTILLO-GONZÁLEZ et al., 2018); e 4) o Zn atua na ativação da ribulose 1,5-difosfato carboxilase, uma enzima de fundamental importância no processo fotossintético das plantas (PRADO, 2020).

A anidrase carbônica catalisa a dissolução do dióxido de carbono que por sua vez, participa da neutralização do pH celular e facilita a transferência de  $\text{CO}_2/\text{HCO}_3$  para a fixação fotossintética do gás carbônico (TAIZ et al., 2017). Além disso, a anidrase carbônica desempenha papel fundamental na formação de clorofila (AHMED et al., 2022), o que melhora o conteúdo de clorofila e afeta positivamente a fotossíntese das plantas (AHMED et al., 2022; DAS et al., 2018). A aldolase ajuda a aumentar a capacidade fotossintética, a taxa de crescimento e a eficiência da biomassa e requer que a planta seja bem nutrida com Zn para funcionar (CASTILLO-GONZÁLEZ et al., 2018), e por fim, o Zn atua na ativação da ribulose 1,5-difosfato carboxilase, uma enzima presente em cloroplastos, e sua presença em quantidades adequadas no tecido foliar das culturas afeta significativamente sua taxa fotossintética (PRADO, 2020). Assim, acredita-se que a fertilização com Zn em dose de até 14,77 g por planta foi suficiente para melhorar os processos realizados pela anidrase carbônica, aldolase, ribulose e clorofila o que permitiu que as mudas de coqueiro anão tivessem suas taxas fotossintéticas melhoradas.

Na E, a fertilização com Zn apresentou influência positiva até a dose 15,32 g de Zn por planta, com acréscimo de 0,20  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  na taxa transpiratória para cada 1 g de Zn aplicado, com aumento em torno de 67% quando comparado com as plantas que não receberam

Zn (Figura 6B). Com dose acima de 15,32 g de Zn por planta, a E reduziu em torno de 0,0066  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$  para cada 1 g de Zn aplicado (Figura 6B). Com relação a gs, a fertilização com Zn provocou aumento de 0,010  $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$  para cada grama de Zn aplicado até uma dose estimada de 16,73 g de Zn por planta, proporcionando aumento de 83% em comparação com o tratamento controle e, a partir desta dose, o Zn causou diminuição de 0,0003  $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$  para cada grama aplicada (Figura 6C). Para Ci, o maior valor obtido pela fertilização de Zn foi estimado na dose de 20,88 g de Zn por planta e esta dose permitiu que o incremento de Zn aumentasse o Ci em 7,64  $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$  por grama aplicada (Figura 6D).

Assim, ressalta-se que, a dose de 16 g de Zn por planta foi suficiente para obter os ganhos máximos na maioria das variáveis estudadas, tanto na análise de crescimento quanto de trocas gasosas. Portanto, 16 g de Zn por planta é a dose ideal para o coqueiro anão-verde em fase de muda.

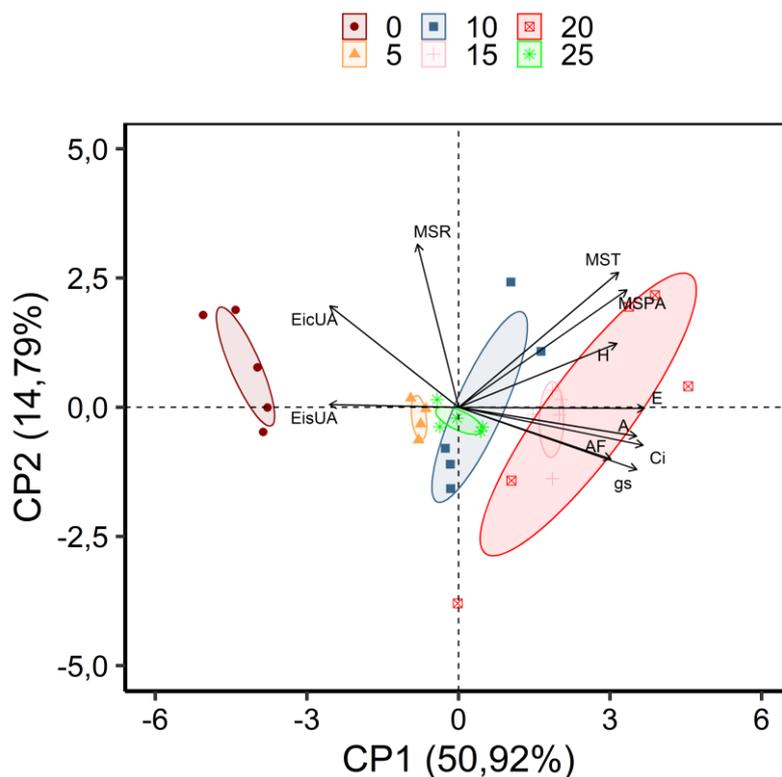
Os ganhos observados na E, gs e Ci foram relacionados com o envolvimento do Zn na regulação de células guarda (TAIZ et al., 2017). Moreira et al. (2020) encontraram aumento de 31% na gs de plantas de milho em função da fertilização com Zn e atribuíram este resultado ao fato do Zn está envolvido no funcionamento da enzima anidrase carbônica, que mantém adequado os níveis de ácido carbônico nas células guardas, controla a captação de ions potássio ( $\text{K}^+$ ) e mantém o bom funcionamento dos estômatos. O grau de abertura estomática determina a taxa de trocas gasosas através da epiderme (TAIZ et al., 2017).

EisUA e EicUA diminuíram nas plantas tratadas com Zn com o melhor ajuste para o modelo quadrático (Figuras 6E e 6F, respectivamente). Resultado semelhante foi relatado por Moreira et al. (2020), sugerindo que incrementos de Zn podem aumentar a eficiência no uso da água, mas o excesso de Zn pode resultar em plantas com menor tolerância ao déficit hídrico. Neste estudo, o decréscimo observado para EiUA e EicUA pode ser explicado pelos incrementos na E e gs nas plantas que receberam Zn e também são decorrentes do fornecimento de água em quantidades adequadas, permitindo que as mudas de coqueiro mantivessem elevado o grau de abertura estomática e a taxa transpiratória, o que foi confirmado pela forte correlação negativa entre a EiUA e a EicUA com E, Ci e gs (Figura 8).

### **Análise de Componentes Principais e Correlação de Pearson**

A representação bidimensional conhecida como biplot mostra o gradiente de influência das variáveis de crescimento e trocas gasosas e grupos de correlação para cada dose de Zn utilizada no estudo (Figura 7). O modelo incluindo os componentes principais representaram 65,71% da variância total explicada para as cinco doses de Zn aplicadas e para o controle

(50,92% para PC1 e 14,79 para PC2). O primeiro componente (PC1) explicou 50,92% da variância e foi correlacionado positivamente com MSPA, MST, H, E, A, Ci, AF e gs e, negativamente, com MSR, EicUA e EisUA. O segundo componente principal (PC2) foi correlacionado positivamente com MST, MSPA, EicUA e MSR e, negativamente com gs e AF, representando 14,79% da variância total dos dados (Figura 7).

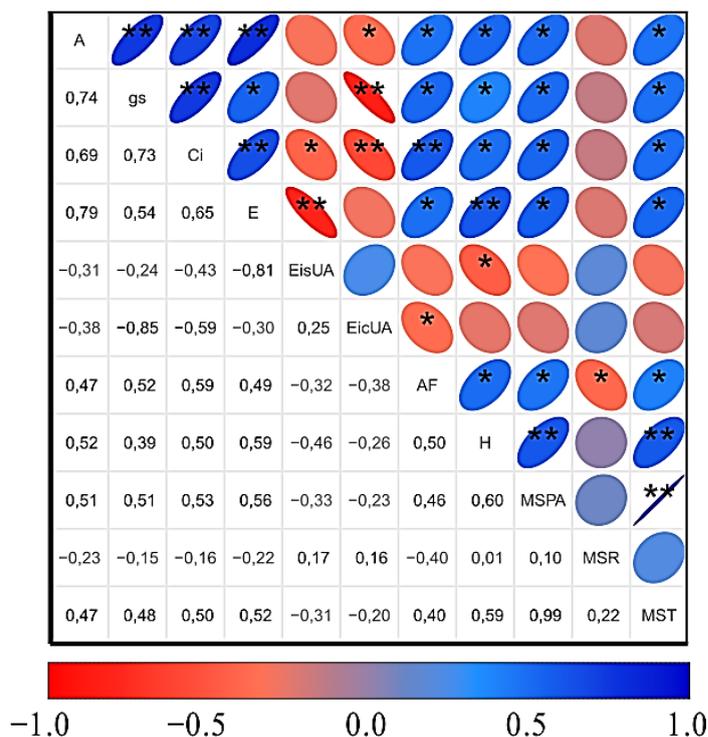


**Figura 7.** Análise de componentes principais (ACP) das variáveis estudadas em função das doses de zinco: 0 ( sem zinco), 10 (10 gramas de zinco planta<sup>-1</sup>), 15 (15 gramas de zinco planta<sup>-1</sup>), 20 (20 gramas de zinco planta<sup>-1</sup>), 25 (25 gramas de zinco planta<sup>-1</sup>). Área foliar (AF), altura (H), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST), fotossíntese (A), transpiração (E), condutância estomática (gs), concentração iinterna de CO<sub>2</sub> (Ci), eficiência instantânea do uso da água (EisUA) e eficiência intrínseca do uso da água (EicUA).

A PCA mostrou que as variáveis de crescimento e trocas gasosas estão positivamente correlacionadas e foram influenciadas pela dose 20 g de Zn por planta. A AF e as variáveis de trocas gasosas (A, Ci e gs) foram separadas no terceiro quadrante, e as demais variáveis de crescimento permaneceram juntas no primeiro quadrante. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato que durante o ciclo de desenvolvimento, a planta depende das folhas como órgãos fotossintetizantes, e a taxa de crescimento depende tanto de expansão da área foliar como da taxa de fotossíntese por unidade de área foliar (GUERRA et al., 2020). Desta forma,

a avaliação dos atributos de crescimento e de trocas gasosas é uma estratégia chave para entender a importância da fertilização com Zn em mudas de coqueiro anão-verde.

Na curva de regressão foi observada uma clara semelhança entre as curvas de MSPA e MST (Figura 5C e 5E), de tal forma que essas variáveis foram fortemente correlacionadas (Figura 8). Isso mostra que o aumento da MSPA foi determinante para o resultado obtido na MST. Essas duas variáveis também se correlacionaram positivamente com AF e H (Figura 8).



**Figura 8.** Matriz de correlação mostrando área foliar (AF), Altura (H), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST), fotossíntese (A), condutância estomática (gs), concentração interna de CO<sub>2</sub> (Ci), transpiração (E), eficiência instantânea do uso da água (EisUA), eficiência intrínseca do uso da água (EicUA). A inclinação dos círculos e o grau de coloração são proporcionais à correlação de Pearson de acordo com a legenda na parte inferior da figura. \*significativo a  $p \leq 0,05$ , \*\*significativo a  $p \leq 0,01$

A produtividade das plantas é em grande parte determinada por sua capacidade de manter o crescimento e funcionamento normal do seu sistema fotossintético ativo (KAZNINA et al., 2022). Esses resultados demonstram a importância da fertilização com doses adequadas de Zn para o crescimento e as trocas gasosas de mudas de coqueiro anão-verde, e a necessidade de adequação do manejo nutricional do coqueiro para inserção do Zn como parte do programa de adubação da cultura em fase de muda. Isto provavelmente resultará em plantas mais vigorosas e conseqüentemente, plantas mais produtivas.

## 2.4 Conclusões

1. O teor de zinco de 15 mg kg<sup>-1</sup> no tecido foliar estipulado para plantas adultas não supri as necessidades do coqueiro anão-verde em fase de muda.
2. Mudanças de coqueiro anão-verde se desenvolveram melhor com teor de 82 mg kg<sup>-1</sup> de zinco.
3. A fertilização com zinco até a dose 16 g por planta melhorou a taxa de crescimento e desempenho fotossintético das mudas, sendo essa a dose recomendada para máxima eficiência técnica de mudas de coqueiro anão-verde.
4. Dose de zinco acima de 16 g por planta e teor acima 82 mg kg<sup>-1</sup> pode comprometer o crescimento e eficiência fotossintética de mudas de coqueiro anão-verde

## REFERÊNCIAS

- AHMAD, I.; BIBI, F.; ULLAH, H.; MUNIR, T. Mango fruit yield and critical quality parameters respond to foliar and soil applications of zinc and boron. **Plants**, v.7, p.97-108, 2018.
- AHMED, N.; HUSSAIN, H. Z.; ALI, M. A.; RAHI, A. A.; SALEEM, M.; AHMAD, F. Effect of zinc on chlorophyll contents, gas exchange attributes and zinc concentration in rice. **Pakistan Journal of Botany**, v.54, p.14-22, 2022.
- ALMEIDA, H. J. de; CARMONAB, V. M. V.; INOCENCIO, M. F.; NETOC, A. E. F.; MAUADA, M. Zinc application improves the yield and nutritional quality of three green bean genotypes grown in a Red Latosol. **Scientia Horticulturae**, v. 274, p.304-314, 2020.
- BRASIL, E. C.; CRAVO, M. da S.; VIÉGAS, I. de J. M. Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará. 2.ed. Brasília, DF : Embrapa, 2020. 419p.
- CALLEGARI, D. M.; SILVA, B. do C.; SANTOS, L. R. dos; PEREIRA JUNIOR, E. M.; BATISTA, B. L.; LOBATO, A. K. da S.; LOBATO, E. M. S. G. Physiological, biochemical and nutritional aspects in *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) plants under different zinc supplies. **Brazilian Journal of Botany**, v.45, p.845-855, 2022.
- CASTILLO-GONZÁLEZ, J.; OJEDA-BARRIOS, D.; HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, A.; GONZÁLEZ-FRANCO, A. C.; ROBLES-HERNÁNDEZ, L.; LÓPEZ-OCHOA, G. R. Zinc metalloenzymes in plants. **Interciencia**, v.43, p. 242-248, 2018.
- DAS, S. K.; AVASTHE, R. K. SINGH, M.; DUTTA, S. K.; ROY, A. Zinc in plant-soil system and management strategy. **Agrica**, v.7, p. 130-136, 2018.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Métodos de análise de tecidos

vegetais utilizados na Embrapa Solos. 21.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000. 41p.

FERREIRA NETO, M.; HOLANDA, J. S. de; DIAS, N. da S.; GHEYI, H. R.; FOLEGATTI, M. V. Crescimento e produção de coqueiro Anão verde fertigado com nitrogênio e potássio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.657-664, 2011.

FRÓES JÚNIOR, P.S.M.; AVIZ, W.L.C.; REBELLO, F.K.; SANTOS, M.A.S. Sources of growth and spatial concentration of coconut crop in the state of Pará, Brazilian Amazon. **Journal of Agricultural Science**, v.11, p.159-168, 2019.

GUERRA, A. M. N. de M.; EVANGELISTA, R. S.; SILVA, M. G. M.; SANTOS, D. S. dos. Nitrogen influences biomass accumulation and basil essential oil yield. **Brazilian Journal of Development**, v.6, p.24739-24756, 2020.

HONORIO, A. B. M.; LOPES, M. B. S.; SIEBENEICHLER, S. C.; SOUZA, C. M; LEAL, T. C. A. de B. Growth analysis and physiologicas parameters in *Dipteryx alata* Vogel seedlings. **Applied Research & Agrotechnology**, v.12, p.41-52, 2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Produção Agrícola Municipal. 2018. Available on: < <http://www.ibge.gov.br> > , Accessed on: Set. 2022

JUCOSKI, G. de O.; CAMBRAIA, J.; RIBEIRO, C.; OLIVEIRA, J. A. de. Excess iron on growth and mineral composition in *Eugenia uniflora* L. **Revista Ciência Agronômica**, v.47, p.720-728, 2016.

KHAN, M. M. H.; AHMED, N. Synchronization of zinc rates through soil and foliar application with synthetic fertilizer to maximize growth, yield and quality attributes of mango. **Pakistan Journal of Botany**, v.54, p.563-568, 2022.

KUME, W. T.; CAMPO, L. M.; RIBEIRO, R.; CAIONE, G. Nutritional disorders caused by deficiency and excess of zinc in maize plants. **Científica**, v.49, p.165-173, 2021.

LINS, P. M. P.; VIEGAS, I. de J. M.; FERREIRA, E. V. de O. Nutrition and production of coconut palm cultivated with mineral fertilization in the state of Pará. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.43, p.113-128, 2021

LIU, S.; LIU, C.; LI, Y.; Liu, Y. Determination of Zn Responsive Genes Involved in Zn Fertilization in Peanuts Based on Transcriptome Analysis. **Journal of Plant Growth Regulation**, 2022.

MOREIRA, V. O. G.; SOUSA, H. H. de F.; CASTAÑÓN, T. H. F. M.; AQUINO, B. F. de. Zinc and boron doses and effects of gas exchange during maize vegetative phase. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v.14, p.639-650, 2021.

NOULAS, C.; TZIOUVALEKAS, M.; KARYOTIS, T. Zinc in soils, water and food crops. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v.49, p.252-260, 2018.

PRADO, R. M. Nutrição de plantas. São Paulo: Editora Unesp, 2a Edição, 2020. 414p. 2020.

PEREIRA, T. de A. SOUTO, L. S.; SÁ, F. V. da S.; DUTRA FILHO, J. A.; SOUZA, T. M.

A. de; PAIVA, E. P. de. Growth and production of dwarf coconut in saline-sodic soil under doses of potassium sulfate. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, p.454-458, 2017.

RAI, S.; SINGH, P. K.; MANKOTIA, S.; SWAIN, J.; SATBHAI, S. B. Iron homeostasis in plants and its crosstalk with copper, zinc, and manganese. **Plan Stress**, v.1, p.064-073, 2021.

RIBEIRO, G.; MONNERAT, P. M.; CAMPANHARO, M.; RABELLO, W. S. Adubação potássica aplicada na axila foliar e no solo em coqueiro anão verde. **Revista Ceres**, v.63, p.068-075, 2016

RUGELES-REYES, S. M.; CECÍLIO FILHO, A. B.; AGUILAR, M. A. L.; SILVA, P. H. S. Foliar application of zinc in the agronomic biofortification of arugula. **Food Sci. Technol**, v.39, p. 1011-1017, 2019.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2022.

SEMIDA, W. M.; ABDELKHALIK, A.; MOHAMED, G. F.; EL-MAGEED, T. A. A.; EL MAGEED, S. A. A.; RADY, M. M.; ALI, E. F. Foliar Application of Zinc Oxide Nanoparticles Promotes Drought Stress Tolerance in Eggplant (*Solanum melongena* L.). **Plants**, v.10, p.421-438, 2021.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. 6.ed. Porto Alegre: ArtMed, 2017. 888p.

TEIXEIRA, L. A. J.; BATAGLIA, O. C.; BUZETTI, S.; FURLANI JUNIOR, E.; ISEPON, J. dos S. NPK fertiliation on dwarf green coconut (*Cocos nucifera* L.) – yield and fruit quality. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.27, p.120-123, 2005.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo. 3.ed. Brasília, DF : Embrapa, 574p. 2017.

### 3. CRESCIMENTO, TROCAS GASOSAS E FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA A EM MUDAS DE COQUEIRO ANÃO-VERDE FERTILIZADAS COM COBRE

#### RESUMO

O cobre é um micronutriente que desempenha papel crucial como componente de diversas metaloproteínas, e sua deficiência afeta diretamente o desenvolvimento das plantas. Objetivou-se com este estudo avaliar os efeitos da aplicação via foliar de diferentes doses de cobre em mudas de coqueiro anão-verde, por meio da avaliação do estado nutricional, de atributos de crescimento, de trocas gasosas e da fluorescência da clorofila *a*. Para tanto, foi conduzido um experimento em casa de vegetação, entre os meses de outubro de 2022 e abril de 2023, no estado do Pará. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso e, os tratamentos foram constituídos por cinco doses de cobre (4, 8, 12, 16 e 20 g planta<sup>-1</sup>) e um tratamento controle (sem cobre), com cinco repetições. A fertilização com cobre influenciou positivamente nos atributos avaliados. No estado nutricional observou-se que as menores doses de cobre testadas (4 e 8 g) resultaram em maiores teores de nitrogênio e fósforo. Em relação ao crescimento, a fertilização com 8 g de cobre por planta proporcionou incrementos de 26% na área foliar, 12% na altura, 7% na massa seca da parte aérea e 23% na massa seca total. Nas trocas gasosas, a dose de 8 g de cobre por planta proporcionou aumento de 14% na taxa de fotossíntese, 24% na transpiração e 24% na condutância estomática. Além disso, o 8 g de cobre melhorou em 7% a eficiência do fotossistema II e 8% a taxa de transporte de elétrons. Porém, o cálculo da dose para máxima eficiência técnica mostrou que 5 g de Cu por planta é suficiente para obter melhoras no desempenho das mudas, sendo esta a dose considerada ideal para melhorar o crescimento e funcionamento do sistema fotossintético em mudas de coqueiro anão-verde. É importante ressaltar que doses acima de 8 g de cobre por planta afetaram negativamente os processos metabólicos e fisiológicos das plantas avaliadas.

**Palavras-chave:** *Cocos nucifera* L., micronutriente, fotossistema II, aporte nutricional

## ABSTRACT

Copper is a micronutrient that plays a crucial role as a component of several metalloproteins, and its deficiency directly affects plant development. The objective of this study was to evaluate the effects of foliar application of different doses of Cu on Brazilian dwarf coconut tree seedlings, through the assessment of nutritional status, growth attributes, gas exchange and chlorophyll a fluorescence. To this end, an experiment was conducted in a greenhouse, between the months of October 2022 and April 2023, in the state of Pará. The experimental design was in randomized blocks and the treatments consisted of doses of copper (0, 4, 8, 12, 16 and 20 g plant<sup>-1</sup>) with five replications. Copper fertilization positively influenced the evaluated attributes. In terms of nutritional status, it was observed that the lowest doses of copper tested (4 and 8 g) resulted in higher levels of nitrogen and phosphorus. Regarding growth, fertilization with 8 g of copper per plant provided increases of 26% in leaf area, 12% in height, 7% in aerial part dry mass and 23% in total dry mass. In gas exchange, a dose of 8 g of copper per plant provided an increase of 14% in the rate of photosynthesis, 24% in transpiration and 24% in stomatal conductance. Furthermore, the 8 g of copper improved the efficiency of photosystem II by 7% and the electron transport rate by 8%. However, the dose calculation for maximum technical efficiency showed that 5 g of Cu per plant is sufficient to obtain improvements in seedling performance, this being the dose considered ideal for improving the growth and functioning of the photosynthetic system in dwarf green coconut tree seedlings. . It is important to highlight that doses above 8 g of copper per plant affect the varieties of metabolic and physiological processes in the plants evaluated.

**Keyword:** *Cocos nucifera* L., micronutrient, photosystem II, nutrition contribution

### 3.1 Introdução

O cultivo do coqueiro (*Cocos nucifera* L.) é uma atividade agrícola de interesse mundial (WIJEBANDA et al., 2014) e com importância econômica e social no Brasil (LINS et al., 2021). Na região amazônica os solos são naturalmente ácidos e de baixa fertilidade natural (PEREIRA et al., 2023), o que torna a nutrição mineral essencial à produção agrícola. Os micronutrientes são determinantes no crescimento e desenvolvimento vegetal (JATAV et al., 2020). Por isso, as deficiências de micronutrientes são potenciais limitantes da produtividade do coqueiro (MALHOTRA et al., 2017), sendo o cobre (Cu) um dos micronutrientes mais limitantes para a cultura, cuja deficiência prejudica a produção de frutos (SOBRAL e ANJOS, 2022).

O Cu é componente de metaloproteínas responsáveis pela fotossíntese, processo de respiração, transporte de elétrons, biossíntese da parede celular e metabolismo secundário (TAVANTI et al., 2021), sendo fundamental para o desenvolvimento da planta (KUMAR et al., 2021). Mas por se tratar de um nutriente que as plantas necessitam em pequenas quantidades (ABBASIFAR et al., 2020) e por estar naturalmente presente na maioria dos solos (BRASIL et al., 2020), a fertilização com Cu não faz parte do programa de adubação padrão da cultura do coqueiro (BRASIL et al., 2020).

No entanto, destaca-se a relevância da investigação sobre a disponibilidade de Cu para diversas culturas de importância econômica, tais como, a soja (*Glycine max*), a laranja (*Citrus sinenses*.) e o trigo (*Triticum aestivum*) (NETO e BERT, 2022). Estudos recentes demonstram que a fertilização com Cu afeta positivamente o estado nutricional, o crescimento e o desempenho fotossintético de diversas culturas (MOREIRA et al., 2019; EL-GIOUSHY et al., 2021; SAQUEE et al., 2023). A necessidade de fertilizar com Cu ocorre porque a aplicação contínua de fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos, associados à exaustão da matéria orgânica do solo ao longo dos anos de cultivo agravam a depleção de micronutrientes nos solos cultivados com coco (WIJEBANDARA et al., 2014). Além disso, se a disponibilidade de micronutrientes for limitada, coqueiros não respondem adequadamente a insumos externos, como fertilizantes, irrigação e outras práticas de manejo (WIJEBANDARA et al., 2014). Assim, objetivou-se com este estudo avaliar os efeitos da aplicação via foliar de diferentes doses de cobre em mudas de coqueiro anão-verde, por meio do estado nutricional, atributos de crescimento, trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a*

### 3.2 Material e métodos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada na Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém-PA (1°27'07''S e 48°26'07''W, altitude 52 metros) entre outubro de 2022 e abril de 2023. Durante o experimento, a temperatura e a umidade relativa do ar foram medidas por meio de um termo-higrômetro instalado na casa de vegetação, sendo que os valores de temperatura foram de 30,1°C para máxima, 24,2°C para a mínima; e de 78,1% de umidade relativa. Foram utilizadas mudas de coqueiro da variedade anão-verde, com 2 meses de idade, produzidas a partir de sementes provenientes da empresa Sococo - S.A.

O substrato utilizado no ensaio foi um Neossolo Quartzarênico distrófico coletado na fazenda Reunidas Sococo, no município de Santa Isabel, estado do Pará, Brasil. O substrato foi coletado na camada arável (0-20 cm) e apresentava antes da instalação do experimento as características químicas e granulométricas mostradas na Tabela 1. Antes do plantio das mudas de coqueiro, as amostras de solos foram secas ao ar e peneiradas em malha de 4 mm e acondicionadas em vasos de 17 kg de capacidade. A preparação das amostras e as análises químicas foram realizadas de acordo com Teixeira et al. (2017). As mudas foram irrigadas manualmente de acordo com a necessidade de cada planta (unidade experimental).

**Tabela 1.** Características químicas e granulométricas do Neossolo Quartzarênico, camada 0-20 cm

pH H <sub>2</sub> O	pH CaCl <sub>2</sub>	H+Al	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Al <sup>+3</sup>	K <sup>+</sup>	CTC pH7	P	S	V%	m%
-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----							-----mg dm <sup>-3</sup> -----				
4.2	3.4	2.8	0.8	0.3	0.3	0.02	3.92	1.5	3	29	20.3
Baixo	Baixo	Médio	Baixo	Baixo	Médio	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo
B	Cu	Fe	Mn	Zn	Areia		Silte		Argila		
-----mg dm <sup>-3</sup> -----					-----g kg <sup>-1</sup> -----						
0.25	0.5	330	4.7	1	861.7		47.6		90.7		
Baixo	Baixo	Alto	Baixo	Médio							

Fósforo (P), manganês (Mn), ferro (Fe), cobre (Cu), zinco (Zn) – Extrator Mehlich 1; cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) – Extrator Resina; boro (B) – Método água quente. Potencial hidrogeniônico em água (pH H<sub>2</sub>O); potencial hidrogeniônico em cloreto de cálcio (pH CaCl<sub>2</sub>); acidez potencial (H+Al); alumínio (Al); capacidade de troca catiônica (CTC); enxofre (S); saturação por bases (V%); saturação por alumínio (m%).

Fonte: Brasil et al., (2020); Ribeiro et al., (1999).

Empregou-se o delineamento experimental blocos ao acaso, com tratamentos constituídos por doses de cobre (0, 4, 8, 12, 16 e 20 g planta<sup>-1</sup>), com cinco repetições, perfazendo 30 unidades experimentais. Sessenta (60) dias antes do transplante, cada vaso recebeu 13,6 g de calcário

dolomítico a fim de elevar a saturação por bases de 29% para 60%. As mudas foram adubadas no primeiro, terceiro e quinto meses de idade com 5,33 g planta<sup>-1</sup> de Zn (óxido de zinco – 40% de Zn); 1,35; 2,7 e 4,05 g planta<sup>-1</sup> de nitrogênio (ureia – 45% de N); 7,2; 14,4 e 21,6 g planta<sup>-1</sup> de fósforo (superfosfato simples - 18% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>); 6, 12 e 18 g planta<sup>-1</sup> de potássio (cloreto de potássio - 60% de K<sub>2</sub>O); 1,5; 3 e 4,5 g planta<sup>-1</sup> de magnésio (óxido de magnésio - 30% de Mg), respectivamente, e 0,3 g planta<sup>-1</sup> de boro no quinto mês (boráx - 10% de B). A dose de Zn utilizada neste estudo (16 g de Zn planta<sup>-1</sup>) foi a dose estimada como ótima para mudas de coqueiro anão-verde por Moraes et al. (2023), e foi aplicado via foliar. Os demais adubos foram aplicados via solo de acordo com o recomendado por Lins e Viégas (2008). As doses de cobre foram aplicadas via foliar de acordo com os tratamentos definidos e a fonte utilizada foi óxido de cobre (33% de Cu).

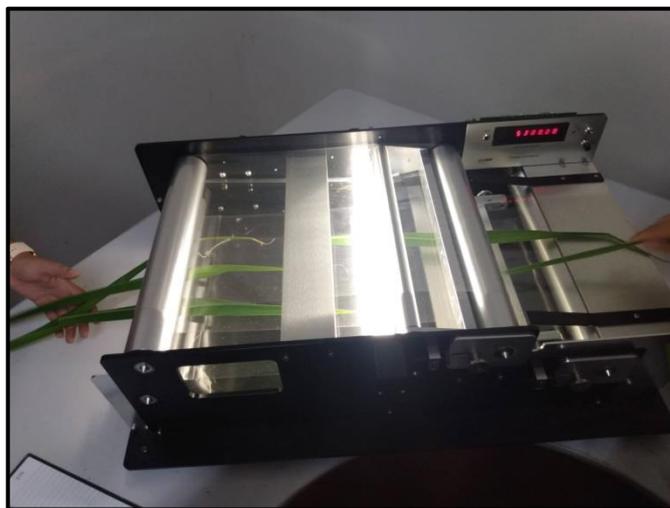


**Figura 1.** Formulação dos tratamentos compostos por cinco doses de cobre  
**Fonte:** Moraes (2023).

Os efeitos dos tratamentos foram avaliados 180 dias após o transplântio com análise do estado nutricional, crescimento, trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a*. O estado nutricional das plantas foi avaliado por meio da concentração de macro e micronutrientes no tecido foliar. Os macronutrientes avaliados foram: nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), enxofre (S), cálcio (Ca) e magnésio (Mg); e micronutrientes: boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn). Para avaliação da concentração dos nutrientes na folha, amostras de tecido foliar foram coletadas e submetidas à secagem em estufa com circulação de ar a 60 °C até peso constante. O material seco foi triturado em moinho do tipo Willey (modelo MA 340, Marconi, BR). As análises foram realizadas de acordo com EMBRAPA (2000).

O crescimento da planta foi avaliado por mensuração da altura (H), área foliar (AF),

massa seca da parte aérea (MSPA), comprimento da raiz (CR), volume da raiz (VR), massa seca da raiz (MSR) e massa seca total (MST). A H (cm) das plantas foi mensurada com o auxílio de uma trena métrica graduada, considerando-se a distância vertical entre o coleto da planta e a extremidade da maior folha esticada. Após a coleta das plantas, as folhas foram retiradas e analisadas individualmente para obtenção da AF ( $\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$ ) em um integrador de área (LI-3100, Li-Cor, Inc. Lincoln, NE, USA). Para a obtenção da MSR, MSPA e MST as plantas foram colhidas e após separação das partes aérea e radicular, o material vegetal foi acondicionado e seco em estufa com circulação de ar, a  $70^\circ\text{C}$ , até peso constante. Cada amostra teve sua biomassa seca (g) quantificada em balança analítica. O CR (cm) foi mensurado com o auxílio de uma trena métrica graduada e o VR ( $\text{cm}^3$ ) foi mensurado pelo princípio de Arquimedes (método de flutuabilidade). Para a determinação do VR, foi utilizado um recipiente plástico com dimensões de 34,2 cm x 23 cm x 27,5 cm (comprimento x largura x altura) com um volume conhecido de água destilada. As amostras foram completamente imersas e o deslocamento da água foi medido com auxílio de um paquímetro digital. O volume foi calculado pela equação  $VD = C \times L \times D$ , onde C = comprimento (34,2 cm), L = largura (23 cm) e D = deslocamento em cm.



**Figura 2.** Obtenção da área foliar com a utilização de um integrador de área (LI-3100, Li-Cor, Inc. Lincoln, NE, USA).

**Fonte:** Moraes (2023).

As trocas gasosas foram determinadas com base na fotossíntese (A), transpiração (E), condutância estomática (gs), concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ), eficiência instantânea do uso da água por meio da A/E (EisUA) e eficiência intrínseca do uso da água por meio da A/gs (EicUA). As trocas gasosas foram avaliadas no terceiro folíolo da quarta folha totalmente expandida de cada planta, com auxílio de um analisador de gases infravermelho portátil (IRGA, modelo LI-

6400XT, da marca LICOR®). A intensidade luminosa artificial utilizada nas avaliações das trocas gasosas foi de  $1.000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e foram mantidas as condições ambientais de temperatura do ar e concentração de  $\text{CO}_2$ . As avaliações foram realizadas no turno da manhã, entre 9:00 e 11:00 h, com temperatura de  $30,1 \text{ }^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar de 78,1% dentro da casa de vegetação.



**Figura 3.** Avaliação das trocas gasosas com auxílio de um analisador de gases infravermelho portátil (IRGA, modelo LI-6400XT, da marca LICOR®).

**Fonte:** Moraes (2023).

A fluorescência da clorofila *a* foi determinada no terceiro folíolo da quarta folha totalmente expandida de cada planta, utilizando-se uma câmara de fluorescência (IG 6400-40; LI-COR Inc.) integrada ao sistema portátil de fluxo aberto de trocas gasosas. As folhas previamente adaptadas no escuro (3 h) foram inicialmente expostas a um fraco pulso de luz vermelho-distante ( $0,03 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) para a determinação da fluorescência inicial ( $F_0$ ). Em seguida, um pulso de luz saturante ( $6000 \mu\text{mol}$  de fótons  $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$  por 0,8 s) foi aplicado para estimar a fluorescência máxima emitida ( $F_m$ ), a partir da qual a eficiência fotoquímica máxima ( $F_v/F_m$ ) foi calculada como  $F_v/F_m = [(F_m - F_0)/F_m]$ . Em folhas adaptadas na luz, o rendimento da fluorescência no estado estacionário ( $F_v$ ) foi determinado após um pulso de luz saturante ( $6000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  por 0,8 s) que foi aplicada para atingir a fluorescência máxima adaptada na luz ( $F_m'$ ). Em seguida um pulso de luz vermelho-distante ( $2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) foi aplicado para determinar a fluorescência inicial adaptada na luz ( $F_0'$ ). O coeficiente de extinção fotoquímica ( $q_p$ ) foi calculado como  $q_p = (F_m' - F_s)/(F_m' - F_0')$ , enquanto que o rendimento quântico da regulação da dissipação de energia (NPQ) foi calculado como  $\text{NPQ} = (F_s/F_m') - (F_s/F_m)$ . O

rendimento quântico efetivo do PSII ( $\Phi_{PSII}$ ) foi calculado como  $\Phi_{PSII} = (F_m' - F_s)/F_m'$ , a partir do qual o ETR foi calculado como  $ETR = \Phi_{PSII} \cdot PPFD \cdot f \cdot \alpha$ , onde  $f$  é o fator responsável pela partição de energia entre PSII e PSI e é atribuído o valor de 0,5; o que indica uma distribuição igual de energia de excitação entre os dois fotossistemas, e  $\alpha$  é a absorvância dos tecidos fotossintéticos da folha e é assumido o valor de 0,84 (Maxwell e Johnson, 2000).

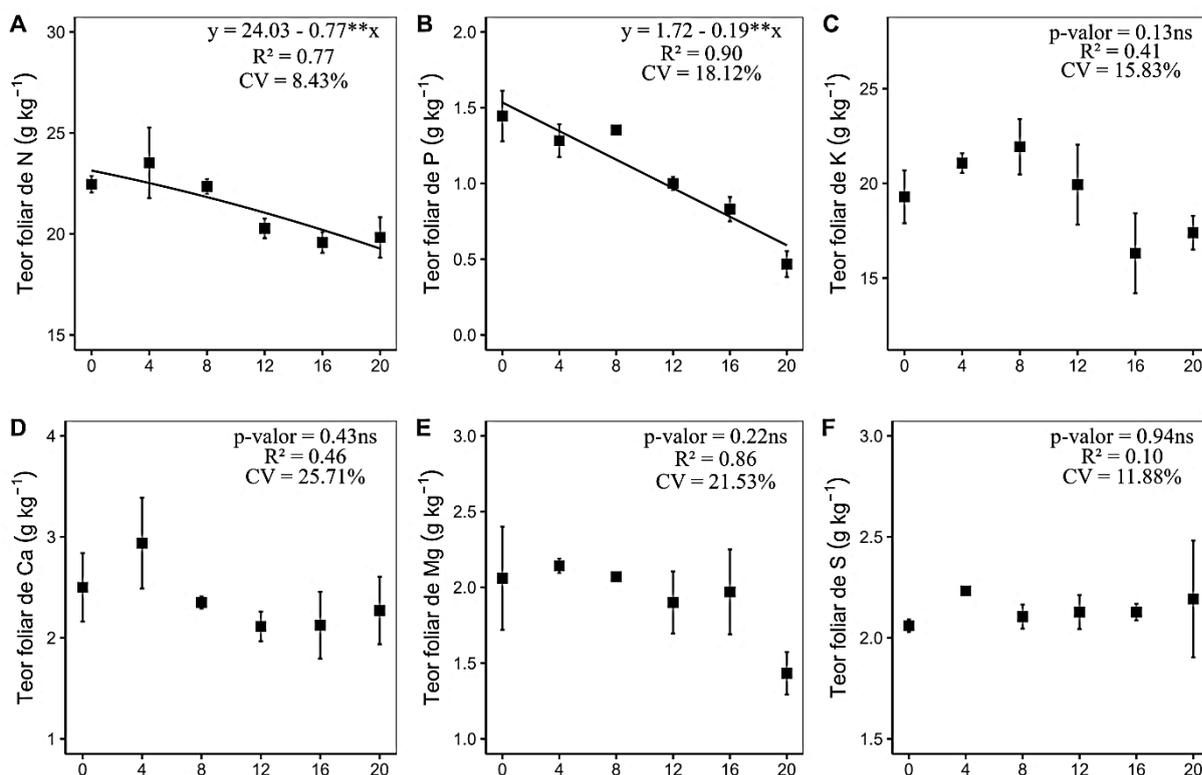
A análise estatística foi realizada utilizando o programa estatístico R versão 4.3.2. Para resultados de nutrição, crescimento, trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a* foram realizadas análises de regressão (linear e quadrática) e as equações foram escolhidas com base na significância dos coeficientes. A análise de componentes principais (factoextra package) e correlação de Pearson (corrplot package) foram realizadas somente com as variáveis significativas pelo teste F. A máxima eficiência técnica foi determinada para variáveis com comportamento quadrático.

### **3.3 Resultados e discussão**

Devido a escassez de informações relacionadas à nutrição de mudas de coqueiro anão-verde, os dados de literatura que serão citados na comparação dos resultados obtidos neste estudo serão dados referentes à coqueiro anão adulto em condições de campo.

#### **Influência do cobre no estado nutricional**

As doses de cobre influenciaram no estado nutricional das mudas de coqueiro anão-verde (Figura 4). Em relação aos macronutrientes foi observado efeito significativo para o N e P (Figura 4A e 4B), e não significativo para os teores de K, Ca, Mg e S (Figura 4C, 4D, 4E e 4F).

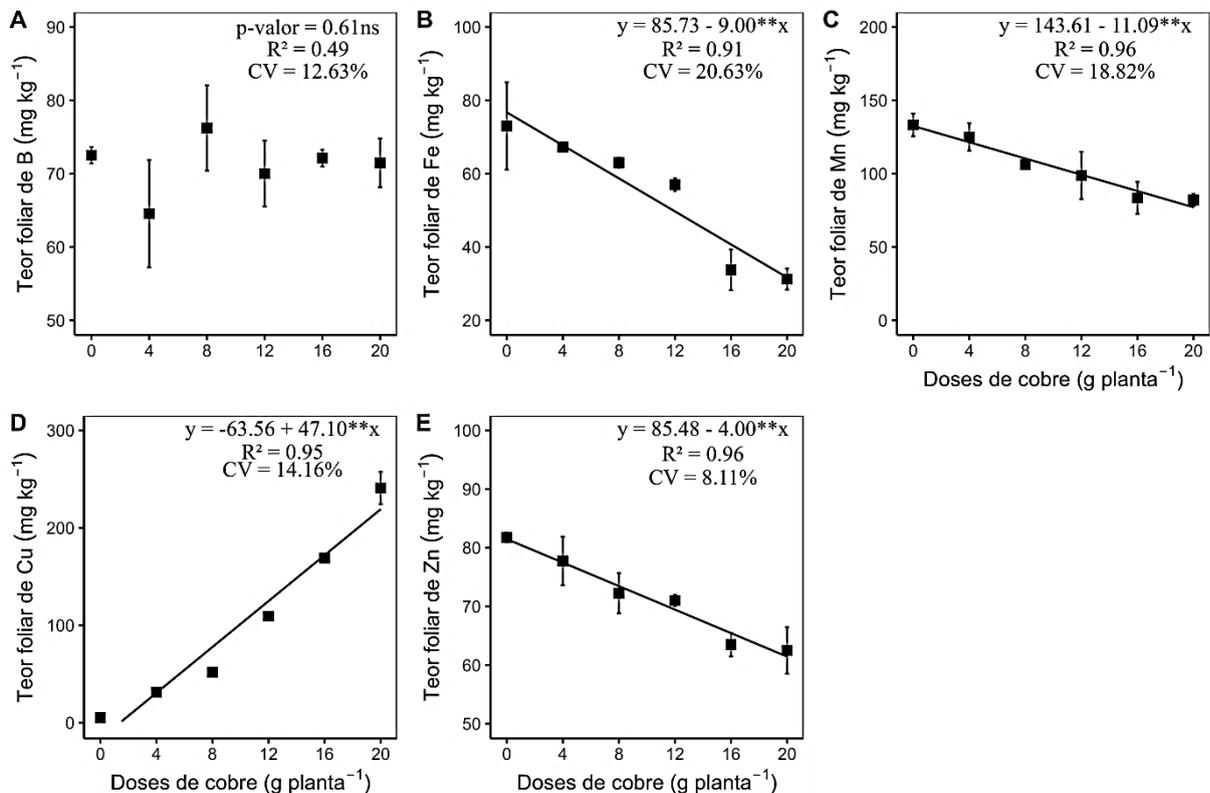


**Figura 4.** Influência das doses de cobre no nitrogênio - N (A), fósforo – P (B), potássio - K (C), cálcio - Ca (D), magnésio - Mg (E) e enxofre – S (F) presente no tecido foliar de mudas de coqueiro anão-verde. ns: não significativo pelo teste F;  $R^2$ : coeficiente de determinação; CV: coeficiente de variação. As barras verticais indicam erro padrão das médias ( $n = 5$ ).

As concentrações de N foram afetadas de forma linear decrescente (Figura 4A). As plantas controle e as que receberam 4 e 8 g de Cu por planta (menores doses de Cu), apresentaram valores de N em torno de 22, 23 e 22  $\text{g kg}^{-1}$  de massa seca (MS), respectivamente. Esses valores são elevados quando considerados dentro da classificação de nível crítico para o coqueiro em fase adulta, tendo como referência os padrões considerados adequados para a folha 4 do coqueiro adulto em condições de campo, valores situados entre 18 e 20  $\text{g kg}^{-1}$  de MS (LINS et al., 2020). As plantas que receberam 12, 16 e 20 g de Cu por planta (maiores doses de Cu), apresentaram valores de N em torno de 20,27; 19,57 e 19,82  $\text{g kg}^{-1}$  de MS, respectivamente, valores considerados adequados para plantas de coqueiro.

O P foi influenciado de maneira linear e decrescente pelas doses de Cu (Figura 4B). As mudas que receberam 4g e 8g de Cu por planta apresentaram valores adequados de P, valores de 1,28 e 1,35  $\text{g kg}^{-1}$  de MS, respectivamente. Os valores de P considerados adequados para a cultura do coqueiro no primeiro ano de idade variam de 1,2 a 1,4  $\text{g kg}^{-1}$  de MS (LINS et al., 2020). Já as doses 12, 16 e 20 g de Cu por planta induziram reduções de P para valores abaixo do considerado adequado (1,0; 0,83; 0,46  $\text{g kg}^{-1}$  de MS), respectivamente.

Nos micronutrientes, as diferentes doses de Cu provocaram alterações nos teores de Fe, Mn, Cu e Zn (Figura 5H, 5I, 5J e 5K). O teor de Fe foi afetado de maneira linear e decrescente pelos tratamentos, apresentando reduções que variaram entre 8% e 57%, na menor e maior dose de Cu, respectivamente, quando comparado com as plantas controle (Figura 5B). As plantas que receberam 4, 8 e 12 g de Cu por planta apresentaram teores de Fe entre 73 e 57 mg kg<sup>-1</sup> de MS, valores considerados adequados para a cultura do coqueiro que não deve ter valores abaixo de 40 mg kg<sup>-1</sup> de MS (LINS et al., 2020). As plantas que receberam as maiores doses, 16 e 20 g de Cu por planta, apresentaram valores de Fe em torno de 33 e 31 mg kg<sup>-1</sup> de MS, valores abaixo do necessário para a cultura.



**Figura 5.** Influência das doses de cobre no boro - B (A), ferro - Fe (B), manganês - Mn (C), cobre - Cu (D) e zinco - Zn (E) presente no tecido foliar de mudas de coqueiro anão-verde. ns: não significativo; \* significativo a  $p \leq 0,05$ , \*\* significativo a  $p \leq 0,01$  pelo teste F; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; CV: coeficiente de variação. As barras verticais indicam erro padrão das médias (n = 5).

O manganês (Mn) também apresentou uma resposta linear decrescente, com reduções que variaram entre 6% e 38% na dose mais baixa e mais alta de Cu, respectivamente, em comparação com as plantas que não foram submetidas à aplicação de Cu (Figura 5I). As plantas que receberam 4 e 8 g de Cu por planta apresentaram valores de Mn de 125 e 106 mg kg<sup>-1</sup> de

MS, respectivamente, valores considerados adequados para a cultura, tendo como referência o nível crítico de  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  de MS (LINS et al., 2020). As maiores doses de Cu (12, 16 e 20 g de Cu por planta) reduziram o teor de Mn para valores entre 98 e  $82 \text{ mg kg}^{-1}$  de MS, valores abaixo do mínimo para o bom crescimento e desenvolvimento da cultura.

O teor de Zn foi influenciado de maneira linear e decrescente pelas doses de Cu (Figura 5K). Os valores variaram entre 81 e  $62 \text{ mg kg}^{-1}$  de MS, na menor e na maior dose de Cu testada, respectivamente, valores acima de  $15 \text{ mg kg}^{-1}$  de MS são considerados adequado para plantas de coqueiro (LINS et al., 2020).

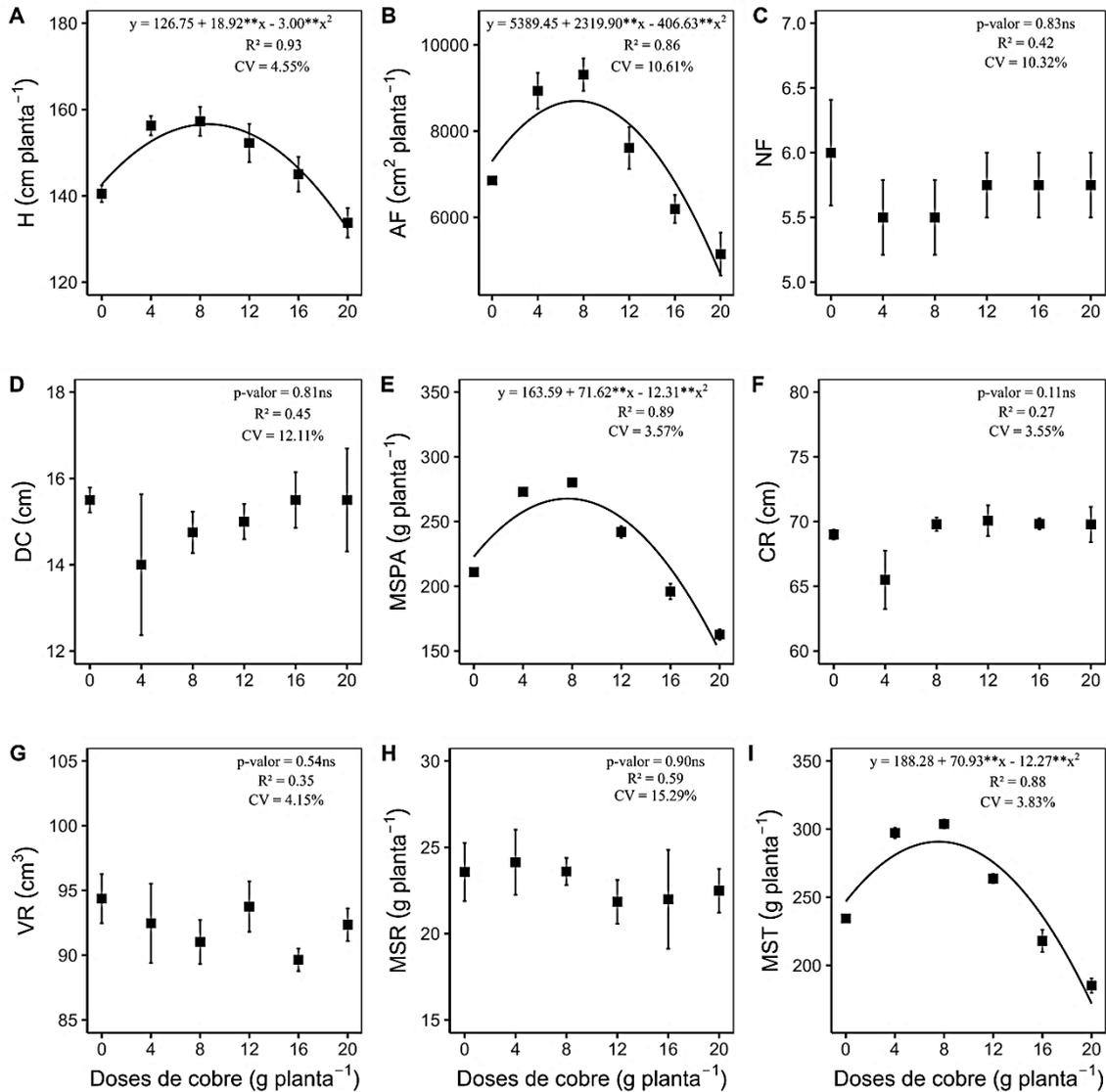
Como esperado, o aumento das doses de Cu influenciou o teor de Cu de maneira linear e crescente com aumentos acima de 100% em todas as doses testadas em comparação com o tratamento controle (Figura 5J). O teor de Cu encontrado no tecido foliar das plantas que não receberam Cu foi de  $5,25 \text{ mg kg}^{-1}$  de MS valor considerado suficiente para o bom crescimento e desenvolvimento da cultura (LINS et al., 2020). Nas plantas que receberam Cu, os teores variaram entre 31 e  $240 \text{ mg kg}^{-1}$  de MS, na menor e maior dose, respectivamente, valores acima do mínimo exigido pela cultura ( $5 \text{ mg kg}^{-1}$  de MS) (LINS et al., 2020).

Ressalta-se que, com o aumento dos teores de Cu no tecido foliar em função do aumento das doses de Cu, a redução de N, P, Fe, Mn e Zn foi ficando acentuada. Mas o fato dos teores de N, P, Fe, Mn e Zn nas plantas que receberam 4 e 8 g de Cu estarem em valores considerados suficientes para plantas jovens de coqueiro anão-verde (LINS et al., 2020), demonstra que a fertilização com essas doses de Cu mantém as plantas de coqueiro com aporte nutricional adequado. Em contrapartida, a redução mais acentuada dos teores desses nutrientes nos tecidos foliares das plantas de coqueiro que receberam maiores doses de Cu (12, 16 e 20 g de Cu por planta) infere que a fertilização com Cu em quantidades acima de 8 g por planta perturbou a homeostase iônica desses nutrientes nas mudas de coqueiro anão-verde. O excesso de Cu causa desequilíbrio iônico nas plantas e induz modificações negativas nos canais de captação, principalmente para  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ , e  $\text{Zn}^{2+}$ , reduzindo as taxas de transporte e acúmulo desses nutrientes nos tecidos (PRADO, 2020), fato observado neste estudo.

O aporte nutricional encontrado nas plantas que receberam 4 e 8 g de Cu, cujo teor de Cu no tecido foliar ficou em torno de 31 e  $63 \text{ mg kg}^{-1}$  de MS, respectivamente, permitiu que a maioria das variáveis de crescimento, trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a* fossem positivamente influenciadas. É importante ressaltar ainda que a exigência nutricional do coqueiro adulto com relação a Cu é de  $5 \text{ mg kg}^{-1}$  de MS, portanto, os teores de Cu presentes nas mudas que tiveram seu crescimento e desempenho fotossintético melhorado estão acima do valor mínimo exigido pela cultura.

## Influência do cobre no crescimento

As variáveis de crescimento que sofreram influência dos tratamentos foram H, AF, MSPA e MST, enquanto as variáveis NF, DC, CR, VR e MSR não foram influenciadas pelas doses de Cu. Todas as variáveis influenciadas apresentaram resposta quadrática às doses de Cu, com os maiores valores ocorrendo nos tratamentos com 4 e 8 g de Cu por planta em comparação com o tratamento controle (Figura 6).



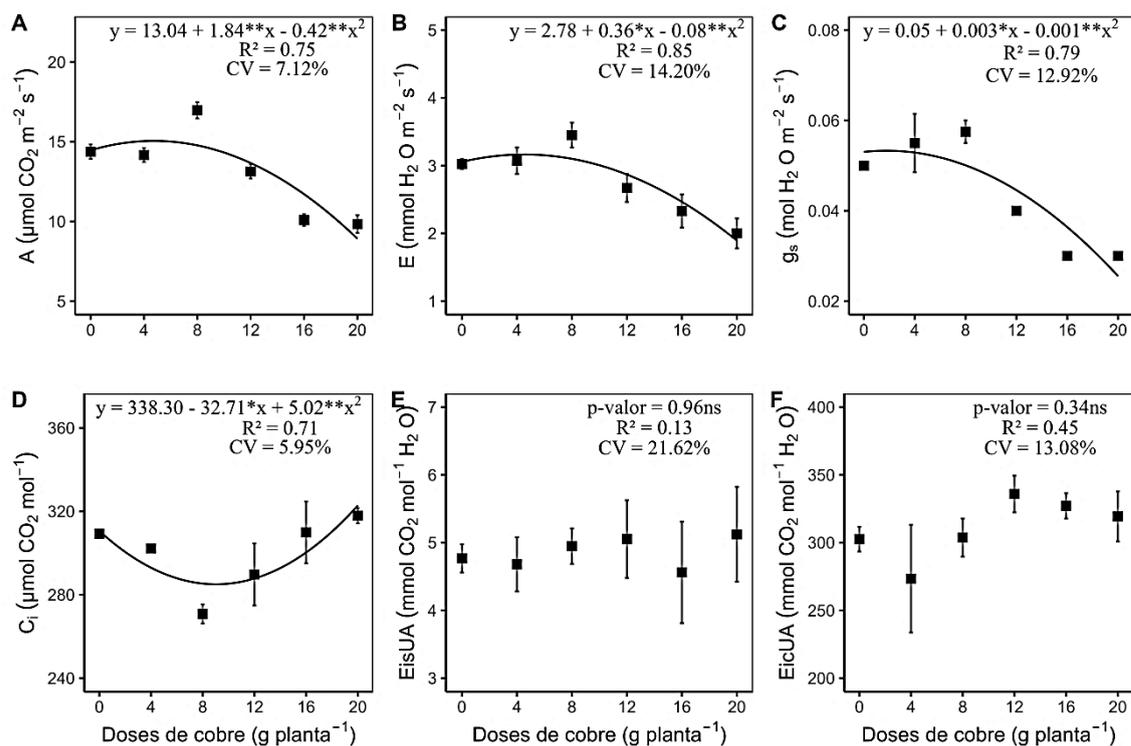
**Figura 6.** Influência das doses de Cu na altura – H (A), área foliar – AF (B), número de folhas – NF (C), diâmetro do coleto – DC (D), massa seca da parte aérea – MSPA €, comprimento da raiz - CR (F), volume da raiz - VR (G), massa seca da raiz - MSR (H) e massa seca total - MST (I) presente no tecido foliar de mudas de coqueiro anão verde. \* significativo a  $p \leq 0,05$ ; \*\* significativo a  $p \leq 0,01$ ; ns: não significativo pelo teste F;  $R^2$ : coeficiente de determinação; CV: coeficiente de variação. As barras verticais indicam erro padrão das médias ( $n = 5$ ).

Houve efeito positivo no crescimento das plantas (H) que receberam até a dose de 8 g de Cu por planta, com aumento de 18,92 cm por planta a cada grama de Cu aplicado, isso permitiu um incremento de 12% quando comparada com o tratamento controle, decrescendo após essa dose (Figura 6A). Para AF a dose de Cu estimada para maior incremento foi 8,3 g de Cu por planta e permitiu aumento de 26% quando comparada com o tratamento controle (Figura 6B). A MSPA teve seu aumento máximo na dose estimada de 7,96 g de Cu, aumentando 71,62 g por planta a cada grama adicionada e apresentou aumento de 27% quando comparado com as plantas que não receberam Cu (Figura 6E). A MST foi beneficiada até a dose estimada de 7,4 g de Cu por planta, com ganho de 70,93 g por cada grama de Cu aplicado, com aumento de 23% em comparação com o tratamento controle (Figura 6I).

Os resultados obtidos neste estudo condizem com estudos desenvolvidos com laranjeira (*Citrus sinenses L.*) (EL-GIOUSHY et al., 2021) e trigo (*Triticum aestivum*) (SAQUEE et al., 2023) que detectaram efeitos positivos nos parâmetros de crescimento dessas culturas ao fertilizarem com Cu, e mostram a importância da fertilização com cobre em quantidades adequadas. A deficiência de Cu pode prejudicar o bom crescimento e desenvolvimento de diversas culturas (PRADO, 2020), assim como o seu excesso (DHALIWAL et al., 2022). A melhora nas variáveis de crescimento nas mudas de coqueiro pode ser atribuída ao impacto que o Cu tem nas funções metabólicas do sistema vegetal, sendo essencial para o funcionamento de várias enzimas que atuam na síntese de proteínas, além de ser fundamental para a estabilização e lignificação das paredes celulares (EL-GIOUSHY et al., 2021).

### **Influência do cobre nas trocas gasosas**

Houve efeito significativo das doses de Cu para A, E, gs e Ci nas plantas de coqueiro anão-verde, enquanto as variáveis EisUA e EicUA não sofreram influência dos tratamentos (Figura 7). As variações observadas em A, E e gs foram semelhantes às observadas para as variáveis de crescimento, cujos valores observados foram maiores quando as mudas de coqueiro receberam o fornecimento de 4 e 8 g de Cu por planta e foram menores quando receberam 12, 16 e 20 g de Cu por planta, em comparação com as plantas que não receberam Cu, apresentando resposta quadrática às doses de Cu testadas (Figura 7A, 7B e 7C). A Ci teve comportamento diferente das demais variáveis, reduziu ao receber 4, 8 e 12 g de Cu por planta e aumentou ao receber 16 e 20 g de Cu por planta quando comparadas com o tratamento controle (Figura 7D).



**Figura 7.** Influência das doses de Cu na fotossíntese - A (A), transpiração – E (B), condutância estomática –  $g_s$  (C), concentração interna de  $CO_2$  -  $C_i$  (D), eficiência instantânea do uso da água –  $E_{isUA}$  (E), e eficiência intrínseca do uso da água -  $E_{icUA}$  (F), presente no tecido foliar de mudas de coqueiro anão verde. \* significativo a  $p \leq 0,05$ ; \*\* significativo a  $p \leq 0,01$ ; ns: não significativo pelo teste F;  $R^2$ : coeficiente de determinação; CV: coeficiente de variação. As barras verticais indicam erro padrão das médias ( $n = 5$ )

A máxima atividade fotossintética (A) nas mudas de coqueiro foi observada nas plantas que receberam 8 g de Cu por planta, saindo de  $14,15 \mu\text{mol de } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (tratamento controle) para  $16,14 \mu\text{mol de } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , aumento de 14% (Figura 7A). As plantas avaliadas apresentaram aumento de  $1,84 \mu\text{mol de } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  para cada 1 g de Cu aplicado, sendo 5,1 g de Cu por planta a dose estimada para alcançar a máxima eficiência técnica. Na E o maior ganho também foi obtido ao fertilizar as mudas de coqueiro anão com 8 g de Cu por planta. Com essa dose foi possível obter aumento de 24% quando comparado com o tratamento controle, saindo de  $3,05 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  para  $3,79 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Na E, a máxima eficiência técnica foi alcançada com 4,2 g de Cu por planta, com aumento de  $0,36 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  na taxa transpiratória para cada 1 g de Cu aplicado (Figura 7B). A  $g_s$  também teve aumento de 24% ao comparar as plantas que receberam 8 g de Cu com as plantas que não receberam Cu. A fertilização com Cu aumentou a  $g_s$  em  $0,0038 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  a cada grama de Cu aplicada, com a máxima eficiência técnica alcançada na dose estimada de 2,4 g de Cu por planta (Figura 7C). Enquanto o  $C_i$  reduziu com as doses 4, 8 e 12 g de Cu por planta, reduções de 2%, 12% e

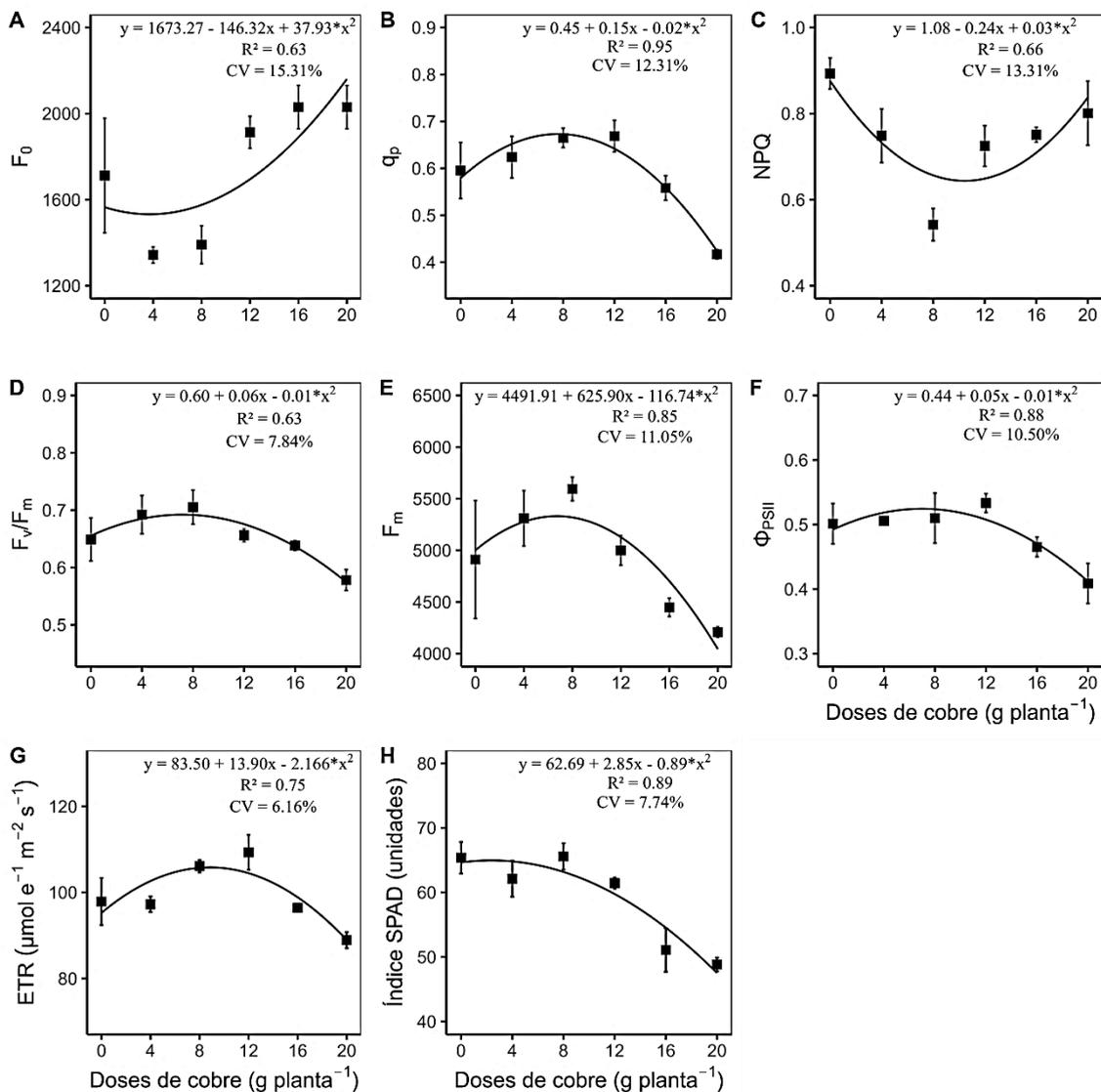
6%, respectivamente, em comparação com as plantas que não receberam Cu (Figura 7D).

A melhora nos parâmetros de trocas gasosas influenciada por fertilização com Cu também foi observada por Moreira et al. (2019), que verificaram aumentos na A, E e gs promovidos pela oferta de Cu em soja (*Glycine max* L.). Já Gong et al. (2019) analisaram os impactos de diferentes concentrações de Cu em espinafre (*Spinacea oleracea*) e verificaram que o uso de baixa concentração de Cu (100 mg de CuSO<sub>4</sub> por litro) não influenciou nas trocas gasosas, porém, altas concentrações (800-1000 mg de CuSO<sub>4</sub> por litro) reduziram A, E e gs. Neste estudo a fertilização com Cu afetou positivamente as trocas gasosas com aumentos simultâneos para A, E e gs somente até a dose de 8 g de Cu por planta, decaindo significativamente ao receber doses mais elevadas (12, 16 e 20 g de Cu por planta). Estes resultados corroboram com outros (NETO e BERT, 2022), que mostram que plantas com aporte inadequado de Cu, seja deficiência ou excesso, têm seus processos fotossintéticos comprometidos (PRADO, 2020). Os menores valores obtidos nas taxas fotossintéticas e transpiratórias nas mudas de coqueiro que não receberam Cu são devido ao fato de plantas com baixo aporte de Cu ter seu processo fotossintético comprometido devido à redução na concentração de plastocianina e atividade do fotossistema II (TAIZ et al., 2017), o qual correlaciona-se com a interrupção no transporte de elétrons desempenhado pelo Cu, fator que limita a atividade fotossintética vegetal (SANTOS et al. 2020). Por outro lado, as plantas que receberam doses mais elevadas de Cu (12, 16 e 20 g de Cu por planta) também tiveram seu processo fotossintético comprometido, isso porque, elevadas concentrações de Cu provocam efeitos adversos à atividade fotossintética por meio da difusão de dióxido de carbono, danos à eficiência do fotossistema II, interrupção no transporte de elétrons e formação de espécies reativas de oxigênio (GONG et al., 2019). Dessa forma, os resultados obtidos tanto nas variáveis de crescimento, quanto nas variáveis de trocas gasosas, deixam claro e evidente que a necessidade de fertilização com Cu em mudas de coqueiro existe, mas não há necessidade de doses elevadas. Como citado anteriormente, 5 g de Cu por planta foi suficiente para melhorar o desempenho fotossintético de coqueiro anão-verde em fase de muda.

### **Influência do cobre na fluorescência da clorofila *a***

Todos os parâmetros analisados da fluorescência da clorofila *a*, F<sub>0</sub>, q<sub>p</sub>, NPQ, F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>, F<sub>m</sub>, ΦPS II, ETR e SPAD foram influenciados pelas doses de Cu e tiveram melhor ajuste para o modelo quadrático (Figura 8). As variáveis q<sub>p</sub>, F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>, F<sub>m</sub>, ΦPSII, ETR e SPAD aumentaram nas plantas que receberam as doses 4, 8 e 12 g de Cu e reduziram nas plantas que receberam doses de 16 e 20 g de Cu (Figura 8B, 8D, 8E e 8F). Houve redução nos valores das variáveis F<sub>0</sub> e NPQ

de plantas que receberam as menores doses (4 e 8 g de Cu) e aumentaram nas plantas com as maiores (12, 16 e 20 g de Cu), em comparação com as plantas que não receberam Cu (Figura 8A e 8C).



**Figura 8.** Influência das doses de Cu na fluorescência inicial -  $F_0$  (A), coeficiente de extinção fotoquímica -  $q_p$  (B), rendimento quântico da regulação da dissipação de energia - NPQ (C), eficiência fotoquímica máxima -  $F_v/F_m$  (D), fluorescência máxima emitida -  $F_m$  (E), rendimento quântico efetivo do PSII -  $\Phi_{PSII}$  (F), taxa de transporte de elétrons - ETR (G) e índice SPAD (H), presente no tecido foliar de mudas de coqueiro anão verde. \* significativo a  $p \leq 0,05$ ; \*\* significativo a  $p \leq 0,01$ ; ns: não significativo pelo teste F;  $R^2$ : coeficiente de determinação; CV: coeficiente de variação. As barras verticais indicam erro padrão das médias ( $n = 5$ ).

A  $q_p$  foi influenciada positivamente até a dose de 7,20 g de Cu por planta, com acréscimo de 0,15 a cada g de Cu aplicado, aumento de 13% em comparação com as plantas que não receberam Cu (Figura 8B). A  $F_v/F_m$  foi beneficiada pela fertilização com Cu até a dose de 8 g

de Cu por planta, com aumento de 7%, decaindo após essa dose (Figura 8D). Nas variáveis  $F_m$  e  $\Phi PS II$  a máxima eficiência técnica foi alcançada na dose de 6 g de Cu por planta, com ganho de 8% e 6%, respectivamente, em comparação com as plantas que não receberam Cu (Figura 8E e 8F). A ETR foi beneficiada até a dose de 8 g de Cu por planta, com ganho de  $13,90 \mu\text{mol e}^{-1}\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  para cada g de Cu aplicado, o equivalente a 8%, decaindo  $2,16 \text{ e}^{-1}\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  após essa dose (Figura 8G), e a variável índice SPAD aumentou 2,85 unidades até a dose 4 g de Cu por planta decaindo 0,89 unidade após essa dose (Figura 8H). Já com relação a  $F_o$  e NPQ, variáveis que apresentaram comportamento diferente das demais, a  $F_o$  apresentou a maior redução nas plantas que receberam a dose de 4 g de Cu, em torno de 21% em comparação com o tratamento controle e a variável NPQ apresentou a maior redução nas plantas que receberam 8 g de Cu, redução de 40% ao comparar com as plantas que não receberam Cu (Figura 8A e 8C).

A análise das variáveis relacionadas à fluorescência da clorofila *a* permitiu avaliar se as doses de Cu testadas são capazes de interferir no nível de excitação da energia que é conduzida para a fotossíntese, oferecendo aporte necessário para verificar melhora ou inibição no processo de transferência de elétrons do PSII em função da fertilização com Cu (MARTINAZZO et al., 2012). O aumento na  $F_m$  em função da fertilização com 4 e 8 g de Cu por planta e redução em função das doses 12, 16 e 20 g de Cu por planta indica que o Cu impactou na captura de luz e sugere melhora na eficiência fotoquímica do PSII em plantas de coqueiro que receberam Cu em doses baixas (4 e 8 g de Cu por planta) e inibição do aparato fotossintético nas plantas que receberam doses altas (12, 16 e 20 g de Cu por planta). Essa influência pode ter ocorrido devido à fertilização com Cu em pequena quantidade ter mantido as plantas com aporte de Cu adequado, mas também pode estar relacionada ao Mn. As plantas que receberam doses elevadas de Cu apresentaram teores de Mn abaixo do considerado ideal para a cultura, e o Mn é elemento essencial para a fotólise da água e conseqüente aproveitamento da luz pelo PSII (CALLEGARI et al., 2022).

O aumento em  $F_v/F_m$  sob baixa suplementação de Cu e redução sob alta suplementação confirma a influência do Cu na eficiência fotoquímica do PSII (NETO e BERT, 2022). Aumentos em  $\Phi PSII$ ,  $q_p$  e ETR em plantas que receberam baixo suplemento de Cu e reduções em plantas que receberam suplemento elevado foram associadas a maiores e menores valores de  $F_v/F_m$ , sugerindo que o fornecimento adequado de Cu aumenta a proporção de centros de reação do PSII abertos, melhorando a eficiência da captura de luz pelos complexos de captura de luz (HUANG et al., 2019), isso porque, sob restrição de Cu os processos fotossintéticos são interrompidos (SCHROTH, 2019). Resultados semelhantes foram encontrados em estudo desenvolvido com mudas de espinafre por Gong et al. (2019), onde  $q_p$  atingiu seus valores

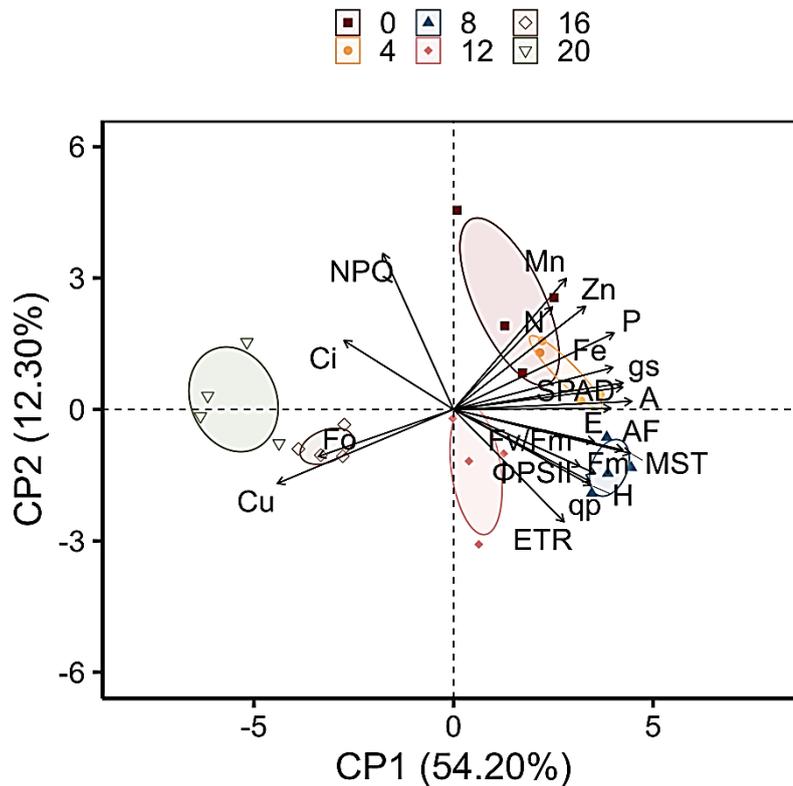
máximos nas plantas que receberam Cu em baixa concentração (100 mg L<sup>-1</sup> de CuSO<sub>4</sub>) e valores mínimos nas plantas que receberam altas concentrações (800-1000 mg L<sup>-1</sup> de CuSO<sub>4</sub>). Portanto, o aumento de  $q_p$  sugerem que a capacidade de utilizar a energia absorvida aumenta nas folhas de plantas suplementadas adequadamente com Cu.

O aumento da ETR revela uma maior transferência de elétrons das antenas para os centros de reação beneficiando o funcionamento do PSII (LYSENKO et al., 2020), provavelmente devido o Cu desempenhar papel crucial na cadeia de transporte de elétrons (ABDELKADER et al., 2022). Reduções nos valores de NPQ das plantas fertilizadas com doses baixas de Cu estão ligados à energia não fotoquímica na forma de calor durante o processo fotoquímico (BROETTO et al., 2017). O efeito no NPQ em plantas sob suplementação adequada de Cu pode ser explicado pela regulação positiva da atividade do PSII, confirmada com aumentos em  $\Phi_{PSII}$ , sugerindo uma maior demanda por elétrons durante reações dependentes de luz, mais especificamente em reações que envolvem consumo de NADPH (SINGH e PRASAD, 2014). O Cu participa do transporte de elétrons nas vias respiratórias e cadeias fotossintéticas (ABBASIFAR et al., 2020), por outro lado, quando há excesso de Cu pode haver danos em membranas celulares, pois ocorre ligação com os grupos sulfidril das proteínas de membranas e a peroxidação de lipídios (BROETTO et al., 2017).

O aumento do índice SPAD nas menores doses de Cu e a redução nas maiores doses testadas sugere influência do Cu no conteúdo de clorofila das plantas (EL-GIOUSHY et al., 2021). Em quantidades adequadas, o Cu é fator-chave nos processos metabólicos vegetais, inclusive na formação da molécula de clorofila e outros pigmentos vegetais (ISHKA e VATAMANIUK, 2020), no entanto, elevadas concentrações de Cu reduzem os teores de clorofila nas folhas, onde o Cu substitui Fe<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> ou Mg<sup>2+</sup> em proteínas do cloroplasto e altera a composição iônica proteica, tornando-a inativa ou instável, a qual sofre degradação (YETIŞSIN e KURT, 2019).

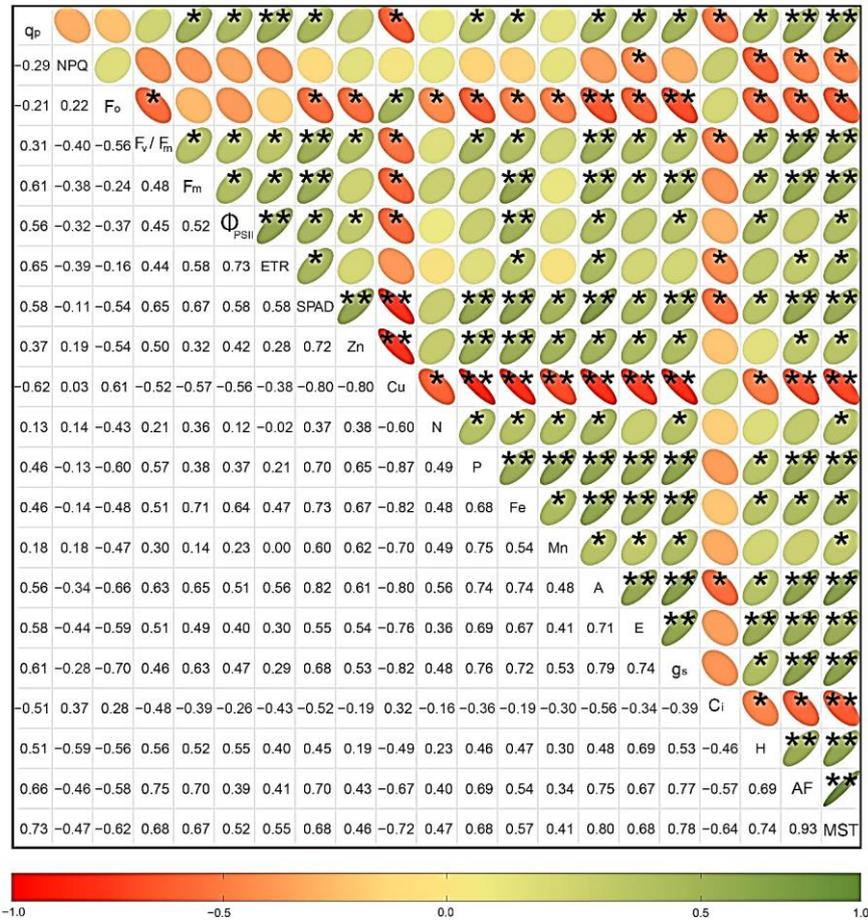
### **Análise de Componentes Principais e Correlação de Pearson**

O modelo incluindo os componentes principais representaram 66,5% da variância total explicada para as cinco doses de Cu aplicadas e para o controle (54,20% para PC1 e 12,30 para PC2). O primeiro componente (PC1) explicou 54,20% da variância e foi correlacionado positivamente com a maioria das variáveis estudadas: N, P, Mn, Fe, Zn, A, E, gs, AF, MST, H,  $F_v/F_m$ ,  $F_m$ ,  $\Phi_{PSII}$ ,  $q_p$ , ETR e SPAD, e negativamente, com NPQ, Ci,  $F_0$  e Cu representando 12,30% da variância total dos dados (Figura 9).



**Figura 9.** Análise de componentes principais (ACP) das variáveis estudadas em função das doses de cobre: 0 (sem cobre), 4 (4 gramas de cobre planta<sup>-1</sup>), 8 (8 gramas de cobre planta<sup>-1</sup>), 12 (12 gramas de cobre planta<sup>-1</sup>), 16 (16 gramas de cobre planta<sup>-1</sup>), 20 (20 gramas de cobre planta<sup>-1</sup>). Nitrogênio (N), fósforo (P), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu), fotossíntese (A), transpiração (E), condutância estomática (gs), concentração interna de CO<sub>2</sub> (Ci), área foliar (AF), altura (H), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca total (MST), fluorescência inicial (F<sub>0</sub>), coeficiente de extinção fotoquímica (q<sub>p</sub>), rendimento quântico da regulação da dissipação de energia (NPQ), eficiência fotoquímica máxima (F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>), fluorescência máxima emitida (F<sub>m</sub>), rendimento quântico efetivo do PSII – (Φ<sub>PSII</sub>), taxa de transporte de elétrons (ETR) e índice SPAD (SPAD)

A PCA mostrou que as variáveis de trocas gasosas estão positivamente correlacionadas com N, P, Zn, Fe, Mn e índice SPAD e foram influenciadas pela dose 4 g de Cu por planta. Esse comportamento é confirmado pela correlação de Pearson, onde essas variáveis também foram positivamente correlacionadas (Figura 10). As maiores correlações entre essas variáveis foram encontradas para SPAD e A (0,82); P e gs (0,76); Fe e A (0,74); Fe e gs (0,72); Zn e SPAD (0,72); Zn e A (0,61), N e A (0,56) e, Mn e gs (0,53) (Figura 10)



**Figura 10.** Matriz de correlação mostrando área foliar (AF), Altura (H), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST), fotossíntese (A), condutância estomática (g<sub>s</sub>), concentração interna de CO<sub>2</sub> (C<sub>i</sub>), transpiração (E), eficiência instantânea do uso da água (EisUA) e eficiência intrínseca do uso da água (EicUA). O grau de coloração são proporcionais à correlação de Pearson de acordo com a legenda na parte inferior da figura. \*significativo a p ≤ 0,05, \*\*significativo a p ≤ 0,01

De fato, este estudo mostrou que os maiores incrementos encontrados em A, E e g<sub>s</sub> se deu nos mesmos tratamentos que foi observado um melhor aporte desses nutrientes (N, P, Zn, Mn e Fe). Isto porque o N é o principal macronutriente para a planta e atua diretamente na fotossíntese sendo essencial para a produção de carboidratos e formação da clorofila (PRADO, 2020). O P é um componente essencial de compostos importantes nas células vegetais, incluindo os açúcares fosfato, intermediários da respiração e da fotossíntese, além disso, interfere diretamente nas trocas gasosas pelo fato de ser um componente de nucleotídeos utilizados no metabolismo energético das plantas como ATP (TAIZ et al., 2017). O Zn é envolvido na abertura estomática, sendo cofator da enzima anidrase carbônica, atuando na manutenção do HCO<sup>-</sup> e controlando o transporte de K<sup>+</sup> nas células-guarda (ESCUADERO-ALMANZA et al. 2012), e sua influência positiva nas trocas gasosas de mudas de coqueiro

anão-verde foi demonstrada recentemente por Moraes et al. (2023). O Mn além de ser fundamental na quebra fotoquímica da molécula da água, está ligado nas estruturas das membranas dos tilacóides, e o Fe está localizado nos cloroplastos, ele participa da biossíntese de clorofila e da síntese de proteínas (PRADO, 2020). Assim, o agrupamento mostrado na PCA e a correlação positiva entre as variáveis do estado nutricional, das trocas gasosas e a dose de 4 g de Cu por planta reitera os resultados já descritos acima: o funcionamento do sistema fotossintético das mudas de coqueiro anão-verde se torna mais eficiente ao receber Cu em pequena quantidade.

As variáveis de crescimento e a maioria das variáveis da fluorescência da clorofila *a* foram separadas no terceiro quadrante, sendo influenciadas principalmente pela aplicação de 8 g de Cu por planta (Figura 9), com correlação forte e positiva entre elas (Figura 10). As maiores correlações foram entre Fv/Fm e AF (0,75); qp e MST(0,73); Fm e AF (0,70); Fv/Fm e MST (0,68); qp e AF (0,66); Fv/Fm e H (0,56); H e  $\Phi_{PSII}$  (0,55) (Figura 10). As variáveis da fluorescência da clorofila *a* também foram correlacionadas positivamente com as variáveis das trocas gasosas, principalmente Fm e A (0,65); Fm e gs (0,63); Fv/Fm e A (0,63); qp e gs (0,61); qp e E (0,58); qp e A (0,56) e Fv/Fm e E (0,51) (Figura 10). Esse comportamento mostra que a análise da fluorescência da clorofila *a* foi uma forma eficiente de reafirmar que a fertilização com Cu deve ser realizada, mas em dosagem adequada, pois embora as plantas não tenham externado sintomas visuais de toxidez por Cu, as variáveis relacionadas à fluorescência da clorofila *a* foram úteis para mostrar que doses elevadas de Cu afetam drasticamente o funcionamento do fotossistema II, resultando nos prejuízos encontrados no crescimento e no sistema fotossintético nas mudas de coqueiro anão-verde.

### 3.4 Conclusões

1. A aplicação de cobre em doses de até 8 g por planta melhorou o estado nutricional, os parâmetros de crescimento e o sistema fotossintético das mudas de coqueiro. Entretanto, doses acima deste limite ocasionaram alterações nos processos metabólicos e fisiológicos de mudas de coqueiro anão-verde.

2. O teor de cobre de 5 mg kg<sup>-1</sup> estipulado para plantas adultas não é suficiente para alcançar o máximo crescimento e o melhor desempenho fotossintético de coqueiro anão-verde em fase de mudas

3. As mudas de coqueiro anão-verde demonstraram desenvolvimento superior com teor de cobre em torno de 31 mg kg<sup>-1</sup>, proporcionando um melhor aporte nutricional, maiores taxas

de crescimento e melhor desempenho fotossintético.

4. Com base nos resultados, recomenda-se uma dose de 5 g de cobre por planta para alcançar a máxima eficiência técnica de mudas de coqueiro anão-verde.

## REFERÊNCIAS

ABBASIFAR, A. SHAHRABADI, F.; VALIZADEHKAJI, B. Effects of green synthesized zinc and copper nano-fertilizers on the morphological and biochemical attributes of basil plant. **Journal of Plant Nutrition**, v. 43, n.8, p.1104-1118, 2020.

BRASIL, E. C.; CRAVO, M. DA S.; VIÉGAS, I. DE J. M. Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará. 2.ed. Brasília, DF : Embrapa, 2020. 419p.

BROETTO, F.; GOMES, E. R.; JOCA, T. A. C. O estresse das plantas: teoria & prática – São Paulo: cultura Acadêmica, 2017.

CALLEGARI, D. M.; SILVA, B. DO C.; SANTOS, L. R. DOS; PEREIRA JUNIOR, E. M. BATISTA, B. L.; LOBATO, A. K. DA S.; LOBATO, E. M. S. G. Physiological, biochemical and nutritional aspects in *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) plants under different zinc supplies. **Brazilian Journal of Botany**, v.45, p.845-855, 2022.

CAO, Y. Y. et al. Melatonin alleviates copper toxicity via improving copper sequestration and ROS scavenging in cucumber. **Plant and Cell Physiology**, v. 60, n. 3, p. 562-574, 2019.

DHALIWAL, S. S.; SHARMA, V.; SHUKLA, A. K.; SHIVAY, Y. S.; HOSSAIN, A.; VERMA, V.; GILL, M. K.; SINGH, J.; BHATTI, S. S.; VERMA, G.; SINGH, J.; SINGH, P. Agronomic biofortification of forage crops with zinc and copper for enhancing nutritive potential: a systematic review. **Journal Sci. Food Agric**, v.15, n.103, p.1631-1643. 2023.

ESCUADERO-ALMANZA D. J.; OJEDA-BARRIOS D. L.; HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ O. A. Carbonic anhydrase and zinc in plant physiology. **Chil J Agric Res** v.72, p.140–146, 2012.

EL-GIOUSHY, S. F.; SAMI, R.; AL-MUSHHIN, A. A. M.; EL-GHIT, H. M. A.; GAWISH, M. S.; ISMAIL, K. A.; AND ZEWAİL, R. M. Y. Foliar Application of ZnSO<sub>4</sub> and CuSO<sub>4</sub> Affects the Growth, Productivity, and Fruit Quality of Washington Navel Orange Trees (*Citrus sinensis* L.) Osbeck. **Horticulturae**, v. 7, n. 233, 2021.

ISHKA, M. R.; VATAMANIUK, O. K. Copper deficiency alters shoot architecture and reduces fertility of both gynoecium and androecium in *Arabidopsis thaliana*. **Plant Direct**, v. 4, n. 11, p. 1-10, 2020.

JATAV, H. S.; SHARMA, L. D.; SADHUKHAN, R.; SINGH. S. K. An overview of micronutrients: Prospects and implication in crop production. **Plant Micronutrients**, v. 1, n. 1, p. 1-30, 2020.

KUMAR, V. PANDITA, S.; SIDHU, G. P. S.; SHARMA, A. Copper bioavailability, uptake,

toxicity and tolerance in plants: A comprehensive review. **Chemosphere**, v. 262, n. 1, p. 1-25, 2021.

LINS, P. M. P.; Viegas, I. de J. M.; Ferreira, E. V. de O. Nutrition and production of coconut palm cultivated with mineral fertilization in the state of Pará. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.43, p.113-128, 2021.

LINS, P. M. P.; VIÉGAS, I. de J. M. Coqueiro. In: BRASIL, E. C.; CRAVO, M. S.; VIÉGAS, I. de J. M. Recomendação de calagem e adubação para o estado do Pará. 2ª ed. Revisada e atualizada. Brasília, DF: Embrapa, p.347-350, 2020

LINS, P. M. P. & VIÉGAS, I. J. M. Adubação do coqueiro no Pará. Belém-PA: Embrapa Amazônia Oriental, 28p., 2008.

LYSENKO, E. A.; KLAUS, A. A.; KARTASHOV, A. V.; KUSNETSOV, V. V. Specificity of Cd, Cu, and Fe effects on barley growth, metal contents in leaves and chloroplasts, and activities of photosystem I and photosystem II. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.147, p.191-204, 2020.

MALHOTRA, S. K.; MAHESWARAPPA, H. P.; SELVAMANI, V. CHOWDAPPA. P. Diagnosis and management of soil fertility constraints in coconut (*Cocos nucifera*): A review. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v.87, n.6, p.711–726, 2017.

MARTINAZZO, E. G; SILVA, D. M.; BIANCH, V. J.; BACARIN, M. A. Fluorescência da clorofila *a* em plantas de pessegueiro da cultivar maciel enxertada sobre diferentes porta-enxertos. **Revista Brasileira de fruticultura**, v.34, p.678-685, 2012.

MORAES, A. R. A.; ARAÚJO, S. R.; SILVA JUNIOR, M. L. S.; LINS, P. M. P. GOMES, M. S.; GOMES, M. F.; MARQUES, J. D; DIAS, V. H. R. Fertilization with zinc improves the growth and photosynthetic performance of dwarf green coconut seedlings. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v.27, n.11, 2023.

MOREIRA, A.; MORAES, L.A.C.; NOGUEIRA, T.A.R.; CANIZELLA, B.T. Copper use efficiency in soybean cultivars. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.54, 2019.

NETO, M. R. B.; BERT, M. P. da Silva. Dinâmica do cobre na planta: revisão. **Revista Agrotecnologia**, v. 13, n. 2, p. 1-13, 2022.

PRADO, R. M. Nutrição de plantas. São Paulo: Editora Unesp, 2a Edição, 2020. 414p. 2020.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. 6.ed. Porto Alegre: ArtMed, 2017. 888p

PEREIRA, G.; FERREIRA, J. C.; PINTO, R. G.; MORAIS, R. S. G.; TRINDADE, R. A. C.; BARBOSA, R. C. Fertilidade do solo na camada superficial em diferentes agroecossistemas no Sudeste paraense. **Peer Review**, v.5, n.21, p.455-468, 2023.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2022. Available on: < <https://www.rproject.org/>>

Accessed on: novembro. 2023.

SAQUEE, F. S.; DIAKITE, S. KAVHIZA, N. J.; PAKINA, E. and Meisam Zargar. The Efficacy of Micronutrient Fertilizers on the Yield Formulation and Quality of Wheat Grains. **Agronomy**, 13, 566, 2023

SANTOS, L. O. et al. Yield, yield components, soil fertility, and nutritional status of soybean as influenced by limestone and copper interactions. **Journal of Plant Nutrition**, v. 43, n. 16, p. 2445-2454, 2020.

SINGH S.; PRASAD S. M. GROWTH, photosynthesis and oxidative responses of *Solanum melongena* L. seedlings to cadmium stress: Mechanism of toxicity amelioration by kinetin. **Sci Hortic (Amsterdam)**, v.176, p. 1–10. 2014.

SCHROTH, G; MOREIRA, A.; MORAES, L. A. C. Copper fertilization in soybean–wheat intercropping under no–till management. **Soil and Tillag Research**, v. 193, n. 1, p. 133-141, 2019.

SOBRAL, L. F.; ANJOS, J. L. Teores de cobre no solo e na folha e a produção do coqueiro anão verde. Embrapa Tabuleiros Costeiro. 21.ed. Aracajú, SE, 2022. 41p.

TAVANTI, T. R.; MELO, A. A. R.; MOREIRA, L. D. K.; SANCHEZ, D. E. J. Micronutrient fertilization enhances ROS scavenging system for alleviation of abiotic stresses in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 160, n. 1, p. 386-396, 2021.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo. 3.ed. Brasília, DF : Embrapa, 2017. 574p.

YETIŞSIN, F.; KURT, F. Gallic acid (GA) alleviating copper (Cu) toxicity in maize (*Zea mays* L.) seedlings. **International Journal of Phytoremediation**, v. 1, n. 1, p. 1-7. 2019.

WIJEBANDARA, D. M. D. I.; VIDHANAARACHCHI, V. R. M. GUNATHILAKA, T. R. TENNAKOON, N. A. Effect of Copper and Zinc on Embryo Germination and Seedling Growth of Coconut (*Cocos nucifera* L.). **Coconut Research Institute of Sri Lanka**, 2014.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fertilização com zinco e a fertilização com cobre em mudas de coqueiro anão-verde melhorou significativamente o estado nutricional, os parâmetros de crescimento e o sistema fotossintético das mudas. Apesar disso, por se tratar de micronutrientes, o zinco e o cobre devem ser empregados em concentrações adequadas, visando evitar possíveis alterações nos processos metabólicos e fisiológicos das plantas. Com base nos resultados obtidos neste estudo, a dose ótima de zinco para aplicação em mudas de coqueiro anão-verde ficou estimada em 16 g de zinco por planta e a de cobre em 5 g de cobre por planta. Essas doses revelaram-se suficientes para promover melhorias tanto na taxa de crescimento como no funcionamento do sistema fotossintético em mudas de coqueiro anão-verde cultivadas em casa de vegetação.

Além disso, esse estudo demonstra, pela primeira vez, que os valores estipulados pela literatura como adequados para plantas adultas de coqueiro, de 15 mg kg<sup>-1</sup> para o zinco e 5 mg kg<sup>-1</sup> para o cobre, não causam sintomas de deficiência na planta, entretanto, mudas de coqueiro anão-verde respondem positivamente quando submetidas a maiores aportes desses nutrientes, se desenvolvendo melhor com teores de 82 mg kg<sup>-1</sup> para o zinco (obtido na dose de 16 g de Zn por planta) e 31 mg kg<sup>-1</sup> para o cobre (obtido na dose de 5 g de Cu por planta). Assim, a partir desses resultados, infere-se que as melhorias obtidas nas mudas de coqueiro anão-verde em função do melhor aporte desses nutrientes, irão conseqüentemente resultar em mudas mais vigorosas em campo e, possivelmente, em plantas mais produtivas, informações importantes que podem contribuir para o aprimoramento do programa de adubação do coqueiro cultivado no estado do Pará.