



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA
MESTRADO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

FERNANDA RAMOS DE MEDEIROS

**FORMAÇÃO DE MUDAS DE CAJUEIRO COM ÁGUA PRODUZIDA DO
PETRÓLEO SOB APLICAÇÃO DE PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO**

MOSSORÓ - RN

2025

FERNANDA RAMOS DE MEDEIROS

**FORMAÇÃO DE MUDAS DE CAJUEIRO COM ÁGUA PRODUZIDA DO
PETRÓLEO SOB APLICAÇÃO DE PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO**

Dissertação apresentada ao Mestrado em Manejo de Solo e Água do Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Tecnologia em Nutrição de Plantas e Soluções para Convivência com a Seca e Salinidade.

Orientador: Reginaldo Gomes Nobre, Prof. Dr.

MOSSORÓ - RN

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M488f Medeiros, Fernanda Ramos de.
Formação de mudas de cajueiro com água
produzida do petróleo sob aplicação de peróxido de
hidrogênio / Fernanda Ramos de Medeiros. - 2025.
66 f. : il.

Orientador: Reginaldo Gomes Nobre.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Manejo de Solo e Água, 2025.

1. Anacardium occidentale L.. 2. Estresse
salino. 3. H2O2. I. Nobre, Reginaldo Gomes,
orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

FERNANDA RAMOS DE MEDEIROS

**FORMAÇÃO DE MUDAS DE CAJUEIRO COM ÁGUA PRODUZIDA DO
PETRÓLEO SOB APLICAÇÃO DE PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO**

Dissertação apresentada ao Mestrado em Manejo de Solo e Água do Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Tecnologia em Nutrição de Plantas e Soluções para Convivência com a Seca e Salinidade.

Defendida em: 25 / 02 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Reginaldo Gomes Nobre, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Antonio Gustavo de Luna Souto, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Geovani Soares de Lima, Prof. Dr. (UFCG)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço aos meus guias espirituais que caminharam e continuam caminhando ao meu lado, abrindo os meus caminhos, me dando sabedoria, discernimento, completando a minha vida com alegria.

A minha família que sempre acreditou em mim, sobretudo aos meus pais, Mario Rovera e Luzia Gregorio.

A todas e todos que torceram por mim e, em especial, a Michelle Cortez, por todo apoio ao longo desses anos.

Ao professor Dr. Reginaldo Gomes Nobre por toda orientação, compreensão, paciência, tempo e dedicação ao longo desta jornada.

Aos colegas Allysson, Kaila, Guilherme e Maria do Socorro pelo apoio durante a pesquisa.

A banca examinadora pela disposição em contribuir com a melhoria deste trabalho.

A Universidade Federal Rural do Semi-Árido, ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água, como também ao Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH-ANP), Gestão FINEP, por meio do PRH-ANP 55.1, pelo apoio financeiro concedido ao desenvolvimento deste projeto.

AXÉ!

Aos esfarrapados do mundo e aos que neles se descobrem e, assim descobrindo-se, com eles sofrem, mas, sobretudo, com eles lutam.

Paulo Freire

DEDICO

RESUMO

O cultivo do cajueiro apresenta grande relevância para o semiárido nordestino, principalmente devido à importância socioeconômica da cultura na região, no entanto, a escassez hídrica e as limitações em relação a águas de qualidade têm induzido muitos agricultores a utilizar águas salobras na irrigação agrícola. Por isso, torna-se necessário a realização de estudos que os avaliem o comportamento de diferentes espécies e genótipos de plantas além do desenvolvimento de estratégias que garantam a reutilização de águas residuais com altas concentrações de sais para a produção agrícola. Objetivou-se com esse estudo avaliar os efeitos da aplicação foliar de peróxido de hidrogênio na morfofisiologia de cajueiro sob irrigação com água produzida do petróleo durante a fase de formação de mudas. O experimento foi conduzido em blocos casualizados, no esquema fatorial $5 \times 2 \times 2$, com quatro repetições e uma planta por parcela, cujos tratamentos foram constituídos de diluições de água produzida do petróleo sintética - AP em água não salina - ANS (T1: 100% ANS, T2: 75% ANS + 25% AP, T3: 50% ANS + 50% AP, T4: 25% ANS + 75% AP e T5: 100% AP), associados concentrações de peróxido de hidrogênio (0 e 15 μM) e genótipos de cajueiro (Crioula NP e FAGA-01). As diluições de água utilizadas apresentaram condutividade elétrica da água (CEa) de T1 - 0,47 dS m^{-1} , T2 - 1,26 dS m^{-1} , T3 - 2,06 dS m^{-1} , T4 - 2,63 dS m^{-1} e T5 - 3,52 dS m^{-1} , e potencial hidrogeniônico (pH) de T1 - 7,11; T2 - 7,43; T3 - 7,68; T4 - 7,75 e T5 - 7,79. O aumento da salinidade na água de irrigação, causado pela água produzida do petróleo, impacta negativamente o desenvolvimento das mudas de cajueiro. Água salobra com diluição 50% água não salina + 50% água produzida (CE = 2,06 dS m^{-1}) pode ser utilizada na formação de mudas de boa qualidade, promovendo maior eficiência fotossintética e crescimento das plantas. O uso de água produzida do petróleo em diluições menores (25% ANS:75% AP e 100% AP) afeta o crescimento e a qualidade das mudas de cajueiro. O genótipo FAGA-01 obteve maior eficiência no uso da água e de carboxilação, crescimento e de fitomassa seca de raízes sob condições de estresse salino, em comparação ao genótipo Crioula NP. A aplicação foliar de peróxido de hidrogênio na concentração de 15 μM não reduziu os efeitos deletérios da salinidade da água produzida do petróleo na irrigação de mudas de cajueiro. Todavia, em quantidades menores de água salina AP-2 (CE = 1,26 dS m^{-1}) e AP-3 (CE = 2,06 dS m^{-1}), em concentração de 15 μM , o H_2O_2 amenizou os efeitos nocivos do estresse salino e promoveu o aumento de biomassa das mudas de cajueiro. Em água de irrigação com maior presença de água produzida (AP-4 e AP-5), o peróxido intensificou os efeitos do estresse salino e inibiu a produção de biomassa nas mudas de cajueiro. A água produzida do petróleo, quando diluída em proporções adequadas, demonstra ser uma fonte hídrica viável para regiões que sofrem com a irregularidade das chuvas e dependem de águas de baixa qualidade para produção agrícola.

Palavras-chave: *Anacardium occidentale* L.; Estresse salino; H_2O_2 .

ABSTRACT

Cashew cultivation is highly relevant to the semiarid region of the Northeast, mainly due to the socioeconomic importance of the crop in the region. However, water scarcity and limitations in relation to quality water have led many farmers to use brackish water for agricultural irrigation. Therefore, it is necessary to conduct studies that evaluate the behavior of different species and genotypes of plants, in addition to developing strategies that ensure the reuse of wastewater with high concentrations of salts for agricultural production. The objective of this study was to evaluate the effects of foliar application of hydrogen peroxide on the morphophysiology of cashew trees under irrigation with water produced from petroleum during the seedling formation phase. The experiment was conducted in randomized blocks, in a $5 \times 2 \times 2$ factorial scheme, with four replicates and one plant per plot, whose treatments consisted of dilutions of synthetic petroleum produced water - PW in non-saline water - NSW (T1: 100% NSW, T2: 75% NSW + 25% PW, T3: 50% NSW + 50% PW, T4: 25% NSW + 75% PW and T5: 100% PW), associated with hydrogen peroxide concentrations (0 and 15 μM) and cashew genotypes (Crioula NP and FAGA-01). The water dilutions used showed electrical conductivity of water (ECa) of T1 – 0,47 dS m^{-1} , T2 – 1,26 dS m^{-1} , T3 – 2,06 dS m^{-1} , T4 – 2,63 dS m^{-1} and T5 – 3,52 dS m^{-1} , and hydrogen potential (pH) of T1 – 7,11; T2 – 7,43; T3 – 7,68; T4 – 7,75 and T5 – 7,79. The increased salinity in irrigation water, caused by water produced from petroleum, negatively impacts the development of cashew seedlings. Brackish water with dilution 50% non-saline water + 50% produced water (EC = 2,06 dS m^{-1}) can be used in the formation of good quality seedlings, promoting greater photosynthetic efficiency and plant growth. The use of water produced from petroleum in lower dilutions (25% NSW: 75% PW and 100% PW) affects the growth and quality of cashew seedlings. The FAGA-01 genotype obtained greater efficiency in water use and carboxylation, growth and dry matter of roots under saline stress conditions, compared to the Crioula NP genotype. The foliar application of hydrogen peroxide at a concentration of 15 μM did not reduce the deleterious effects of salinity of water produced from petroleum in the irrigation of cashew seedlings. However, in smaller amounts of saline water AP-2 (EC = 1,26 dS m^{-1}) and AP-3 (EC = 2,06 dS m^{-1}), at a concentration of 15 μM , H₂O₂ mitigated the harmful effects of saline stress and promoted the increase in biomass of cashew seedlings. In irrigation water with a higher presence of produced water (AP-4 and AP-5), peroxide intensified the effects of saline stress and inhibited biomass production in cashew seedlings. Water produced from petroleum, when diluted in adequate proportions, has proven to be a viable water source for regions that suffer from irregular rainfall and depend on low-quality water for agricultural production.

Keywords: *Anacardium occidentale* L., Saline stress, H₂O₂.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1

- Figura 1 – Condutância estomática - g_s das mudas de genótipos de cajueiro sob irrigação com diluições de água produzida do petróleo (A) e sob irrigação com diluições de água produzida do petróleo e aplicação de peróxido de hidrogênio (B), aos 42 DAE..... 16
- Figura 2 – Concentração interna de CO_2 - C_i das mudas de cajueiro em função das diluições de água produzida do petróleo (A) e de genótipos de cajueiro (B), aos 42 DAE..... 21
- Figura 3 – Taxa de assimilação de CO_2 - A das mudas de cajueiro em função das diluições de água produzida do petróleo, aos 42 DAE..... 23
- Figura 4 – Transpiração foliar - E das mudas de cajueiro em função das diluições de água produzida do petróleo (A) e de genótipos (B), aos 42 DAE..... 37
- Figura 5 – Eficiência instantânea no uso da água - $EiUA$ em mudas de cajueiro em função das diluições de água produzida do petróleo (A) e genótipos (B), aos 42 DAE..... 46
- Figura 6 – Taxa de crescimento absoluto de altura da planta - TCA_{ap} e da área foliar - TCA_{af} das mudas de cajueiro em função das diluições de água produzida do petróleo (A e C) e de diâmetro do caule - $TCAd_c$ e da área foliar em função de genótipos (B e D), aos 42 DAE..... 48
- Figura 7 – Massa fresca das folhas - MFF (A), caule - MFC (B) e raiz - MFR (C e D) de mudas de cajueiro sob irrigação com diluições de água produzida do petróleo e aplicação de peróxido de hidrogênio e genótipos, aos 42 DAE..... 50
- Figura 8 – Massa fresca de parte aérea - M_{FPA} (A) e total - M_{FT} (B) de mudas de cajueiro sob irrigação com diluições de água produzida do petróleo e aplicação de peróxido de hidrogênio, aos 42 DAE..... 54
- Figura 9 – Índice de qualidade de Dickson - IQD das mudas em função das diluições de água produzida do petróleo (A) e de genótipos (B), aos 42 DAE..... 60

ARTIGO 2

- Figura 1 – Número de folhas - NF (A), diâmetro do caule - DC (B), altura de planta - APL (C) e área foliar - AF (D) das mudas de cajueiro em função das diluições de água produzida do petróleo, aos 42 DAE..... 16
- Figura 2 – Massa seca de folha - MSF (A), de caule - MSC (C) e de raízes - MSR (C) em função das diluições de água produzida do petróleo; MSR em função de distintos genótipos de cajueiro (D) das mudas de cajueiro, aos 42 DAE..... 21

Figura 3	–	Massa seca de parte aérea - MSPA (A) e total - MST (B) de mudas de cajueiro em função das diluições de água produzida do petróleo, aos 42 DAE.....	23
Figura 4	–	Relação raiz / parte aérea - R/PA (A) em função das diluições de água produzida do petróleo e eficiência instantânea de carboxilação - EiCi (B) em função dos distintos genótipos das mudas de cajueiro, aos 42 DAE.....	37

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1

- Tabela 1 – Composição química média da água produzida de petróleo (AP) encontrada nos poços da Bacia Potiguar e os reagentes e quantitativos utilizados para produção da AP sintética..... 16
- Tabela 2 – Resumo da análise de variância, pelos valores do quadrado médio, referente a condutância estomática (gs), concentração interna de CO₂ (Ci), taxa de assimilação de CO₂ (A), transpiração foliar (E) e eficiência instantânea no uso da água (EiUA) das mudas de genótipos (G) de cajueiro sob irrigação com diluições de água produzida do petróleo (AP) e aplicação foliar de concentrações de peróxido de hidrogênio (H₂O₂), aos 42 dias após a emergência (DAE)..... 21
- Tabela 3 – Resumo da análise de variância, pelos valores do quadrado médio, referente a taxa de crescimento absoluto de altura de planta (TCAap), do diâmetro de caule (TCAdc) e da área foliar (TCAaf) das mudas de genótipos (G) de cajueiro sob irrigação com diluições de água produzida do petróleo (AP) e aplicação foliar de concentrações de peróxido de hidrogênio (H₂O₂), aos 42 dias após a emergência (DAE)..... 23
- Tabela 4 – Resumo da análise de variância, pelos valores do quadrado médio, referente a massa fresca de folha (MFF), de caule (MFC), de raiz (MFR), de parte aérea (MFPA) e total (MFT) e índice de qualidade de Dickson (IQD) das mudas de genótipos (G) de cajueiro sob irrigação com diluições de água produzida do petróleo (AP) e aplicação foliar de concentrações de peróxido de hidrogênio (H₂O₂), aos 42 dias após a emergência (DAE)..... 37

ARTIGO 2

- Tabela 1 – Composição química média da água produzida do petróleo (AP) encontrada nos poços da Bacia Potiguar e os reagentes e quantitativos utilizados para produção da AP sintética..... 16
- Tabela 2 – Resumo da análise de variância, pelos valores do quadrado médio, referente a número de folhas (NF), diâmetro de caule (DC), altura de planta (APL) e área foliar (AF) das mudas de genótipos (G) de cajueiro sob irrigação com diluições

	de água produzida do petróleo (AP) e aplicação foliar de concentrações de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), aos 42 dias após a emergência (DAE).....	21
Tabela 3	– Resumo da análise de variância, pelos valores do quadrado médio, referente a massa seca de folha (MSF), de caule (MSC), de raízes (MSR), da parte aérea (MSPA) e seca total (MST) das mudas de genótipos (G) de cajueiro sob irrigação com diluições de água produzida do petróleo (AP) e aplicação foliar de concentrações de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), aos 42 dias após a emergência (DAE).....	23
Tabela 4	– Resumo da análise de variância, pelos valores do quadrado médio, referente a relação raiz / parte aérea (R/PA) e eficiência instantânea de carboxilação (EiCi) de mudas de genótipos (G) de cajueiro sob irrigação com diluições de água produzida do petróleo (AP) e aplicação foliar de concentrações de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), aos 42 dias após a emergência (DAE).....	37

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	14
2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18
3. ARTIGO 1: PRODUÇÃO DE MUDAS DE GENÓTIPOS DE CAJUEIRO COM ÁGUA PRODUZIDA DO PETRÓLEO SOB APLICAÇÃO DE PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO	21
3.1. Introdução	21
3.2. Material e métodos	225
3.2.1. Localização do experimento	25
3.2.2. Delineamento experimental, tratamentos e semeio das mudas de cajueiro	25
3.2.3. Produção das mudas e aplicação dos tratamentos	26
3.2.4. Variáveis analisadas	26
3.2.5. Análise estatística	27
3.3. Resultados e discussão	29
3.4. Conclusões	43
3.5. Referências bibliográficas	44
4. ARTIGO 2: USO DA ÁGUA PRODUZIDA DO PETRÓLEO ASSOCIADA AO H₂O₂ NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE GENÓTIPOS DE CAJUEIRO	48
4.1. Introdução	50
4.2. Material e métodos	51
4.2.1. Localização do experimento	51
4.2.2. Delineamento experimental, tratamentos e semeio das mudas de cajueiro	51
4.2.3. Produção das mudas e aplicação dos tratamentos	53
4.2.4. Variáveis analisadas	53
4.2.5. Análise estatística	54
4.3. Resultados e discussão	55
4.4. Conclusões	62
4.5. Referências bibliográficas	62
5. CONCLUSÕES GERAIS	483

1. INTRODUÇÃO GERAL

O cajueiro (*Anacardium occidentale* L.) pertence à família Anacardiaceae e é uma planta xerófila e rústica, adaptada principalmente a solos pobres e arenosos, característica típica de regiões de clima tropical. Originário do Brasil, especialmente do litoral nordestino, o cajueiro é uma árvore de porte médio, com troncos tortuosos que alcançam entre cinco e dez metros de altura (AGYEMANG, ZHU, TIAN, 2016; SERRANO; PESSOA, 2016).

Trata-se de uma espécie perene de grande relevância econômica e cultural, considerando que a comunidade nativa do Nordeste desempenhou um papel crucial em sua disseminação para o interior da região. Noutro tempo, os indígenas utilizavam a floração do cajueiro como referência para marcar a passagem dos anos (GAMARRA-ROJAS et al., 2019).

Os cultivos anuais de caju ocorrem durante o período chuvoso, que no Nordeste corresponde aos meses de março a julho, enquanto a colheita acontece no verão, entre setembro e janeiro. A safra pode apresentar variações influenciadas por fatores como a idade da planta, o material genético e as mudanças climáticas, relacionados à sensibilidade da planta ao estresse hídrico. A produção de caju ocorre em períodos de seca, coincidindo com a entressafra de cultivos como feijão, milho e outras culturas comuns na região. Dessa forma, a cajucultura proporciona subsídios econômicos e complementação nutricional, já que as castanhas podem ser armazenadas durante a estiagem devido ao seu baixo teor de umidade. Essa característica permite um armazenamento seguro, desde que sejam seguidos os parâmetros adequados de boas práticas de colheita e conservação (SERRANO; PESSOA, 2016).

Ainda que o cajueiro possua grande destaque na fruticultura nordestina, o clima de parte da região é definido como semiárido. O semiárido brasileiro é caracterizado como o mais chuvoso do mundo, se comparado a outras regiões semiáridas, com uma precipitação máxima anual de 800 milímetros. Entretanto, suas características climáticas incluem uma alta insolação média de 2.800 horas por ano, temperaturas anuais médias variando entre 23°C e 27°C, evaporação média de 2.000 milímetros por ano e umidade relativa do ar em torno de 50% (SUDENE, 2021). Ainda segundo a Sudene (2021), a região é marcada por forte insolação, temperaturas relativamente elevadas e um regime pluviométrico caracterizado pela escassez e irregularidade, com concentração das chuvas em um curto período, geralmente de 3 a 4 meses. Esse padrão resulta em volumes de água insuficientes para atender de forma adequada às necessidades sociais.

Com isso, é comum a ocorrência da utilização de águas com altos teores de sais solúveis nessas regiões que, em sua maioria, acabam sendo o único recurso hídrico disponível aos

produtores. Apesar de ser uma solução para a limitação hídrica, o uso dessas águas na agricultura pode levar à salinização do solo, especialmente quando não há um manejo adequado. Atualmente, estima-se que cerca de 20% de todas as terras irrigadas no mundo estão impactadas pelo estresse salino (TAIZ et al., 2017).

A salinidade do solo é um dos principais estresses abióticos e pode causar perdas significativas na produção agrícola, especialmente em regiões de clima árido e semiárido (LIANG et al., 2018). Entre os impactos da salinidade nas plantas, destacam-se a dificuldade na absorção de água devido à redução do potencial osmótico do solo, o que resulta em menor crescimento da parte aérea e redução na expansão foliar (TAIZ et al., 2017); inibição de diversos processos biossintéticos devido ao acúmulo excessivo de íons Na^+ e Cl^- nas folhas, podendo levar à toxidez iônica, com danos visíveis, especialmente nas bordas das folhas mais velhas (DIAS et al., 2016); e a redução e/ou atraso na germinação de sementes e no crescimento de plântulas (NASRI et al., 2015).

Em relação as águas aptas ao uso na agricultura destacam-se aquelas provenientes de rios, lagos, reservatórios, águas subterrâneas e, em algumas situações, águas residuais. Dentre os exemplos citados, a água produzida do petróleo (AP) destaca-se como água residuária, subproduto das operações de extração de óleo e gás natural (ALZHRANI; MOHAMMAD, 2014). Trata-se de uma mistura complexa cuja composição varia conforme a localização geográfica, as propriedades do reservatório e os métodos de extração utilizados. Contudo, independentemente do local de obtenção, ela contém hidrocarbonetos, metais, sais e outros compostos químicos (ABBAS et al., 2021; ALZHRANI; MOHAMMAD, 2014; AMAKIRI et al., 2022; SAMUEL et al., 2022).

A AP apresenta baixa acidez ou características alcalinas e é encontrada no subsolo, abaixo do petróleo, em reservatórios porosos. Ela é composta pela água de formação, que permanece confinada por camadas de rocha e solo, e pela água de injeção, sendo ambas extraídas juntamente com o petróleo bruto durante o processo de produção de petróleo e gás (JIMÉNEZ et al., 2018; MUNIRASU, 2016). Geralmente contém gases dissolvidos, como hidrocarbonetos voláteis, dióxido de carbono (CO_2), oxigênio (O_2) e sulfeto de hidrogênio (H_2S) (DUDEK et al., 2020; MUNIRASU, 2016). Esses gases podem ser gerados espontaneamente pela ação de bactérias (HAKIM, 2016) ou através de reações químicas na água (IGUNNU e CHEN, 2012).

Estudos indicam que a cada barril de petróleo extraído são gerados outros 4 de água produzida (DUDEK, 2020), logo, nota-se o volume exponencial de efluente gerado. Na literatura, Echchel et al. (2018), Miller et al. (2019), Echchel et al. (2019), Crisostomo et al.

(2018) estudaram a utilização da AP em culturas agrícolas. Com isso, são grandes as preocupações e esforços direcionados tanto para a preservação do meio ambiente, visando minimizar os efeitos poluidores desse tipo de efluente, reutilizando-o na produção agrícola, por exemplo, quanto para garantir, ao longo dos anos, a disponibilidade de matéria-prima renovável, permitindo que os avanços tecnológicos ocorram de maneira equilibrada com a natureza.

Apesar dos fatores que limitam a expansão da agricultura, as plantas são capazes de desenvolver mecanismos para se adaptarem às condições de estresse. O peróxido de hidrogênio (H_2O_2) podem ativar o sistema de defesa das plantas que, quando expostas previamente a concentrações adequadas, promovem mudanças metabólicas responsáveis pelo aumento da tolerância a uma nova situação de perturbação (GOHARI et al., 2019). O H_2O_2 atua como uma molécula de sinalização que transmite respostas ambientais, ajudando a prevenir diversos estresses (CAPITULINO, 2023). Além disso, envolve interações com hormônios reguladores das atividades vegetais e promove um aumento significativo de antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos, que desempenham um papel crucial na defesa contra estresses oxidativos. Dessa forma, o H_2O_2 pode ser benéfico, contribuindo para um melhor crescimento e a aclimação a condições adversas, dependendo de sua concentração e reatividade (CARMODY et al., 2016; JAVED et al., 2018).

Neste cenário, diversos autores relataram em estudos realizados com arroz (UCHIDA et al., 2002), trigo (WAHID et al., 2007), citrus (TANOU et al., 2009), milho (SILVA et al., 2016), feijão-de-corda (HASAN et al., 2016) e graviola (SILVA et al., 2019a) que o peróxido de hidrogênio favorece a aclimação das plantas ao estresse salino.

Segundo Jamaludin et al. (2020), aplicações foliares de H_2O_2 a 15 mM em plantas de *Ficus deltoidea* var. *deltoidea* resultaram em melhorias significativas na estrutura celular, nos feixes vasculares das folhas e na proliferação celular. As folhas tratadas apresentaram uma camada de paliçada bem definida, superfície foliar mais espessa, estômatos com aberturas mais amplas e um feixe vascular devidamente desenvolvido.

Nestas circunstâncias, considerando a importância do cajueiro para a região Nordeste do Brasil e a carência de informações sobre a produção de plantas da cultura irrigados com AP, realizou-se esta pesquisa com o objetivo de avaliar os efeitos da aplicação foliar de peróxido de hidrogênio na morfofisiologia de cajueiro sob irrigação com água produzida associado a aplicação foliar de peróxido de hidrogênio na fase de formação de mudas. Baseando-se na hipótese de que a aplicação exógena do H_2O_2 pode atenuar os efeitos deletérios do estresse salino nas plantas, conforme observado por Silva et al. (2019b) e a tolerância de mudas de

cajueiro ao estresse salino pode diferir entre genótipos, conforme observado por Lima et al. (2022), viabilizando a utilização da água produzida do petróleo em regiões onde os recursos hídricos são um fator limitante para a agricultura.

2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBAS, A. J.; GZAR, H. A.; RAHI, M. N. Oilfield-produced water characteristics and treatment technologies: a mini review. **Materials Science and Engineering**, v. 1058, n. 1, 2021.
- AGYEMANG, M.; ZHU, Q.; TIAN, Y. Analysis of opportunities for greenhouse emission reduction in the global supply chains of cashew industry in West Africa. **Journal of Cleaner Production**, v. 115, p. 149-161, 2016.
- ALZARAHNI, S.; MOHAMMAD, A. W. Challenges and trends in membrane technology implementation for produced water treatment: A review. **Journal of Water Process Engineering**, v. 4, p. 107-133, 2014.
- AMAKIRI, K. T.; CANON, A. R.; MOLINARIM, M.; ANGELIS-DIMAKIS, A. Review of oilfield produced water treatment technologies. **Chemosphere**, v. 298, p. 1-20, 2022.
- CAPITULINO, J. D.; LIMA, G. S.; AZEVEDO, C. A. V.; SILVA, A. A. R.; ARRUDA, T. F. L.; SOARES, L. A. A.; GHEYI, H. R.; FERNANDES, P. D.; FARIAS, M. S. S.; SILVA, F. A.; DIAS, M. S. Influence of Foliar Application of Hydrogen Peroxide on Gas Exchange, Photochemical Efficiency, and Growth of Soursop under Salt Stress. **Plants**, v. 12, 2023.
- CARMODY, M.; WASZCZAK, C.; IDANHEIMO, N.; SAARINEN, T.; KANGASJARVI J. ROS signalling in a destabilised world: a molecular understanding of climate change. **Journal of Plant Physiology**, v. 203, p. 69-83, 2016.
- CRISOSTOMO, L. A.; WEBER, O. B.; DE MIRANDA, F. R.; DE ARAGAO, F. A. S.; MOSCA, J. Reuso da água produzida na irrigação do abacaxizeiro ornamental. **Embrapa Agroindústria Tropical**, p. 27, 2018.
- DIAS, N. S.; BLANCO, F. F.; SOUZA, E. R.; FERREIRA, J. F. S.; SOUSA NETO, O. N.; QUEIROZ, I. S. R. Efeitos dos sais na planta e tolerância das culturas à salinidade. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S., LACERDA, C. F.; GOMES FILHO, E. Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados. **INCTSal**, v. 2, 2016.
- DUDEK, M.; VIK, E.A.; AANESEN, V.; OYE, G. Colloid chemistry and experimental techniques for understanding fundamental behaviour of produced water in oil and gas production. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 276, 2020.
- ECHCHELH, A.; HESS, T.; SAKRABANI, R. Reusing oil and gas produced water for irrigation of food crops in drylands. *Agricultural Water Management.*, v. 206, p. 124–134, 2018.
- ECHCHELH, A.; HESS, T.; SAKRABANI, R.; PAZ, J. M.; VISCONTI, F. Assessing the environmental sustainability of irrigation with oil and gas produced water in drylands. *Agricultural Water Management*, v. 223, 2019.
- GAMARRA-ROJAS, G., DA SILVA, N. C. G.; VIDAL, M. S. C. Contexto, agricultura e interação no agroecossistema familiar do caju no semiárido brasileiro. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 3, n. 34, p. 315-338, 2019.
- GOHARI, G.; ALAVI, Z.; ESFANDIARI, E.; PANAHIRAD, S.; HAJIHOSEINLOU, S.; FOTOPOULOS, V. Interaction between hydrogen peroxide and sodium nitroprusside following chemical priming of *Ocimum basilicum* L. against salt stress. **Physiologia Plantarum**, v. 21, p.1-13, 2019.
- HAKIM, A.Q.M.A. **Potential application of microalgae in produced water treatment**. Thesis (Master of Science in Environmental Science) - Faculty of College of Art and Sciences, Qatar University. Qatar, 2016.
- HASAN, S. A.; IRFAN, M.; MASRAHI, Y. S.; KHALAF, M. A.; HAYAT, S.; TEJADA MORAL, M. Growth, photosynthesis, and antioxidant responses of *Vigna unguiculata* L. treated with hydrogen peroxide. **Cogent Food e Agriculture**, v.2, 2016.
- IGUNNU, E. T.; CHEN, G. Z. Produced water treatment technologies. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 9, n. 3, p. 157-177, 2012.

- JAMALUDIN, R.; MAT, N.; SURYATI MOHD, K.; AFIZA BADALUDDIN, N.; MAHMUD, K.; HAILMI SAJILI, M.; KHANDAKER, M. M. Influence of Exogenous Hydrogen Peroxide on plant physiology, leaf anatomy and Rubisco Gene Expression of the *Ficus deltoidea* Jack var. **Agronomy**, v. 10, p. 497, 2020.
- JAVED, R.; YUCESAN, B.; GUREL, E. Hydrogen peroxide-induced steviol glycosides accumulation and enhancement of antioxidant activities in leaf tissues of *Stevia rebaudiana* Bertoni. **Sugar Tech**, v. 20, p. 100-104, 2018.
- JIMÉNEZ, S.; MICÓ, M.M.; ARNALDOS, M.; MEDINA, F.; CONTRERAS, S. State of the art of produced water treatment. **Chemosphere**, v. 192, p. 186-208, 2018.
- LIANG, W.; MA, X.; WAN, E.; LIU, L. Plant salt-tolerance mechanism: A review. **Biochemical and Biophysical Research Communications**, v. 495, p. 286-291, 2018.
- LIMA, G. S. DE; PINHEIRO, F. W. A.; GHEYI, H. R.; SOARES, L. A. dos A.; SOUSA, P. F. DO N. & FERNANDES, P. D. Saline water irrigation strategies and potassium fertilization on physiology and fruit production of yellow passion fruit. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 26, p. 180-189, 2022.
- MILLER, H.; TRIVEDI, P.; QIU, Y.; SEDLACKO, E. M.; HIGGINS, C. P.; BORCH, T. Food crop irrigation with oilfield-produced water suppresses plant immune response. **Environmental Science and Technology Letters**, v. 6, p. 656–661, 2019.
- MUNIRASU, S.; HAIJA, M.A.; BANAT, F.; Use of membrane technology for oil field and refinery produced water treatment—A review. **Process safety and environmental protection**, v. 100, p. 183-202, 2016.
- NASRI, N.; SAIDI, I.; KADDOUR, R.; LACHAÂL, M. Effect of salinity on germination, seedling growth and acid phosphatase activity in lettuce. **American Journal of Plant Sciences**, v. 6, n. 1, p. 57-63, 2015.
- SAMUEL, O.; OTHMAN, M. H. D.; KAMALUDIN, R.; SINSAMPHANH, O.; ABDULLAH, A.; PUTEH, M. H.; KURNIAWAN, A.; LI, T.; ISMAIL, A. F.; RAHMAN, M. A.; JAAFAR, J.; EL-BADAWY, T.; MAMAH, S. C. Oilfield-produced water treatment using conventional and membrane-based technologies for beneficial reuse: A critical review. **Journal of Environmental Management**, v. 308, p. 1-23, 2022.
- SERRANO, L. A. L.; PESSOA, P. F. A. P. Aspectos econômicos da cultura do cajueiro. **Embrapa agroindústria tropical**: Fortaleza-Ceará, 2016.
- SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE. Delimitação do Semiárido - Relatório final, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/sudene/pt-br/centrais-de-conteudo/8-relatoriometodologia_semiarido2021_v9-versaodefinitiva__1_.pdf. Acesso em: 04 jan. 2025.
- SILVA, A. A. R. da; LIMA, G. S. de; AZEVEDO, C. A. V. de; VELOSO, L. L. de S. A.; GHEYI, H. R.; SOARES, L. A. dos A. Salt stress and exogenous application of hydrogen peroxide on photosynthetic parameters of sour sop. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, p. 257-263, 2019a.
- SILVA, E. M.; LACERDA, F. H. D.; MEDEIROS, A. S.; SOUZA, L. P.; PEREIRA, F. H. F. Métodos de aplicação de diferentes concentrações de H₂O₂ em milho sob estresse salino. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 11, n. 3, p. 1-7, 2016.
- SILVA, P. C. C.; AZEVEDO NETO, A. D. de; GHEYI, R. H.; RIBAS, R. F.; COVA, A. M. W.; SILVA, C. R. dos R. Avaliação de métodos de aplicação de H₂O₂ para aclimação de plantas de girassol à salinidade. **Water Resources and Irrigation Management**, v. 8, p. 1- 4, 2019b.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER I. M.; MURPHY, A. Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal. **Artmed**, v. 6, 2017.

TANOUE, G.; JOB, C.; RAJJOU, L.; ARC, E.; ELGHAZI, M.; DIAMANTIDIS, G. Proteomics reveals the overlapping roles of hydrogen peroxide and nitric oxide in the acclimation of citrus plants. **The Plant Journal**, v. 60, p. 795-804, 2009.

UCHIDA, A.; JAGENDORF, A. T.; HIBINO, T.; TAKABE, T.; TAKABE, T. Effects of hydrogen peroxide and nitric oxide on both salt and heat stress tolerance in rice. **Plant Science**, v. 163, p. 515-523, 2002.

WAHID, A.; PERVEEN, M.; GELANI, S.; BASRA, S. M. Pretreatment of seed with H₂O₂ improves salt tolerance of wheat seedlings by alleviation of oxidative damage and expression of stress proteins. **Journal of Plant Physiology**, v. 164, p. 283-294, 2007.

3. ARTIGO 1: PRODUÇÃO DE MUDAS DE GENÓTIPOS DE CAJUEIRO COM ÁGUA PRODUZIDA DO PETRÓLEO SOB APLICAÇÃO DE H₂O₂

RESUMO

A região semiárida do Brasil, no geral, apresenta problemas de salinidade da água e/ou do solo que, associado a escassez hídrica e as altas taxas de evapotranspiração, comprometem a sustentabilidade da cajucultura. Entretanto, a resposta das plantas ao estresse salino pode variar entre genótipos e a seleção de materiais mais tolerantes constitui uma estratégia de manejo. Além disso, a aplicação exógena de elicitores, como o peróxido de hidrogênio (H₂O₂), pode reduzir os efeitos negativos dos sais tóxicos as plantas. Assim, objetivou-se com esta pesquisa avaliar a morfofisiologia de mudas em genótipos de cajueiro sob irrigação com água produzida do petróleo associado a aplicação de peróxido de hidrogênio. O experimento foi conduzido em blocos casualizados, no esquema fatorial 5 × 2 × 2, com quatro repetições e uma planta por parcela. Os tratamentos foram constituídos de diluições de água produzida do petróleo sintética - AP em água não salina - ANS (T1: 100% ANS, T2: 75% ANS + 25% AP, T3: 50% ANS + 50% AP, T4: 25% ANS + 75% AP e T5: 100% AP), associados concentrações de peróxido de hidrogênio (0 µM e 15 µM) e genótipos de cajueiro (Crioula NP e FAGA-01). O tratamento com 50% de água não salina + 50% de água produzida do petróleo favorece os componentes fisiológicos, de crescimento e qualidade de mudas de genótipos 'Crioula NP' e 'FAGA-01'. A aplicação exógena de 15 µM H₂O₂ associada a mistura AP-3 favorece a produção de fitomassas das mudas, porém, nessa concentração o peróxido não respondeu positivamente em relação a atenuar o efeito negativo do estresse salino nos demais fatores avaliados. O incremento salino da água de irrigação afeta a morfofisiologia de mudas de cajueiro, no entanto, é possível utilizar água de até 2,06 dS m⁻¹ na produção de mudas de qualidade. O genótipo de cajueiro FAGA-01 foi mais tolerante a salinidade do que o Crioula NP.

Palavras-chave: *Anacardium occidentale* L., Estresse salino, Material genético, Peróxido de hidrogênio.

PAPER 1: PRODUCTION OF CASHEW GENOTYPE SEEDLINGS WITH WATER PRODUCED FROM PETROLEUM UNDER APPLICATION OF H₂O₂

ABSTRACT

The semiarid region of Brazil, in general, presents problems of water and/or soil salinity that, associated with water scarcity and high evapotranspiration rates, compromise the sustainability of cashew farming. However, the response of plants to saline stress can vary between genotypes and the selection of more tolerant materials constitutes a management strategy. In addition, the exogenous application of elicitors, such as hydrogen peroxide (H₂O₂), can reduce the negative effects of toxic salts on plants. Thus, the objective of this research was to evaluate the morphophysiology of seedlings in cashew genotypes under irrigation with water produced from petroleum associated with the application of hydrogen peroxide. The experiment was conducted in randomized blocks, in a 5 × 2 × 2 factorial scheme, with four replicates and one plant per plot. The treatments consisted of dilutions of synthetic petroleum produced water - PW in non-saline water - NSW (T1: 100% NSW, T2: 75% NSW + 25% PW, T3: 50% NSW + 50% PW, T4: 25% NSW + 75% PW and T5: 100% PW), associated with hydrogen peroxide concentrations (0 µM and 15 µM) and cashew genotypes (Crioula NP and FAGA-01). The treatment with 50% non-saline water + 50% petroleum produced water favors the physiological, growth and quality components of seedlings of genotypes 'Crioula NP' and 'FAGA-01'. The exogenous application of 15 µM H₂O₂ associated with the PW-3 mixture favors the production of phytomass of the seedlings, however, at this concentration the peroxide did not respond positively in relation to attenuating the negative effect of saline stress on the other factors evaluated. The saline increase in irrigation water affects the morphophysiology of cashew seedlings, however, it is possible to use water of up to 2,06 dS m⁻¹ in the production of quality seedlings. The cashew genotype FAGA-01 was more tolerant to salinity than Crioula NP.

Keywords: *Anacardium occidentale* L., Saline stress, Genetic material, Hydrogen peroxide, Gas exchanges, Seedlings quality.

3.1. Introdução

O cajueiro (*Anacardium occidentale* L.) é uma fruteira tropical, nativa do Nordeste brasileiro, pertencente à família *Anacardiaceae* e ao gênero *Anacardium*, sendo a única espécie deste gênero que é explorada comercialmente (MITCHELL et al., 2022). As plantas desenvolvem-se bem nas condições edafoclimáticas da região, com considerável capacidade adaptativa a altas temperaturas, escassez hídrica, solos de baixa fertilidade além de tolerar condições de estresse salino (SERRANO e PESSOA, 2016). Nessa região, encontram-se o cajueiro-gigante (comum) e o anão-precoce, cultivados principalmente por agricultores familiares, onde este segmento social responde por 67% dos empregos gerados no meio rural e por 40% da produção agrícola, exercendo o papel importante de empregadora no campo brasileiro (FUSARO e FERRAZ, 2023). Desta forma, devido a possibilidade de produção em período de estiagem associado a áreas irrigadas, a cajucultura possui elevada relevância socioeconômica na região Nordeste do país, concentrando 99,4% da produção nacional de castanha, que alcançou produtividade de 145,7 mil t no ano de 2021 (IBGE, 2022).

Apesar do protagonismo da cajucultura no Nordeste, as condições climáticas relativas a elevadas taxas de evapotranspiração e baixos índices pluviométricos ocorrido em grande parte do ano tornam a prática de irrigação imprescindível para que a exploração agrícola seja sustentável e economicamente viável (LACERDA et al., 2016). No entanto, a escassez hídrica de águas sem restrições para o uso na agricultura faz com que muitos agricultores optem por usar águas de qualidade inferior para suprimento das necessidades hídricas das culturas (LESSA et al., 2023). Dentre as águas, nessa região, ocorre a incidência de grande volume de água com concentrações elevadas de sais solúveis em poços, represas ou açudes (DALCHIAVON et al., 2016).

Dentre as águas passíveis de uso na agricultura, encontramos a água produzida do petróleo (AP) que é um subproduto resultante da extração de petróleo e gás natural durante os processos de perfuração e extração destes recursos (ECHCHELH et al., 2019; MILLER et al., 2019; SEDLACKO et al., 2019). Trata-se de uma água cuja composição tem uma complexa mistura de elementos que varia de acordo com a geologia, características do reservatório e técnicas de extração utilizadas, possuindo a presença de sais solúveis, metais, hidrocarbonetos e outras substâncias químicas (ECHCHELH et al., 2018; ABBAS et al., 2021; AMAKIRI et al., 2022). No Brasil, o Estado do Rio Grande do Norte se destaca como um dos maiores produtores nacionais de petróleo, gerando, consequentemente, grandes volumes de água produzida (NUNES et al., 2023). Considerando a disponibilidade deste efluente e a escassez de água com baixo teor salino na região semiárida nordestina, o uso da AP no setor agrícola se

torna uma alternativa a ser considerada para suprir a necessidade das culturas agrícolas, a sustentabilidade e a viabilidade econômica (AL-GHOUTI et al., 2019; COSTA et al., 2020).

Entretanto, embora fontes de água salobra possam atender às necessidades hídricas de determinados sistemas de produção, as altas concentrações de sais são uma restrição para o crescimento e a produtividade da maioria das culturas (LESSA et al., 2023). Os sais em concentrações elevadas reduzem o potencial osmótico do solo, dificultando a absorção de água e nutrientes, que resulta em alterações significativas no metabolismo das plantas (SILVA et al., 2021). Além disso, o estresse salino provoca danos oxidativos pelo acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs), alterando a atividade de enzimas, ácidos nucleicos e lipídios (BALASUBRAMANIAM et al., 2023; LI et al., 2022). A salinidade, também, afeta as trocas gasosas e compromete a integridade celular e a estrutura de pigmentos clorofiláticos, prejudicando assim, os processos fisiológicos ligados ao crescimento, desenvolvimento e rendimento produtivo das culturas (ALHARBY et al., 2018; LIANG et al., 2018; PAN et al., 2020; AL-JANABIA et al., 2024).

Contudo, deve-se considerar que os efeitos do estresse salino podem variar entre espécies vegetais, genótipos, estádios fenológicos, tipo e a concentração de íons, estratégias de cultivo, manejo da irrigação e adubação (SILVA et al., 2018; LIMA et al., 2020). A aplicação exógena de substâncias atenuadoras pode reduzir os efeitos dos sais tóxicos, como peróxido de hidrogênio (H_2O_2), que favorece a aclimação das plantas ao estresse salino (CAPITULINO et al., 2022; CAPITULINO et al., 2023; GOHARRIZI et al., 2024). O H_2O_2 atua acionando o sistema de defesa antioxidante da planta quando sob algum estresse biótico ou abiótico (BAGHERI et al., 2019; IQBAL et al., 2023). Essa ativação promove aclimação ao estresse e melhora a capacidade de resistir aos danos causados pelo alto teor de sais tóxicos, por meio de modulações no metabolismo vegetal (SANTOS et al., 2019; SILVA et al., 2019). Outrossim, esse composto pode funcionar como molécula sinalizadora do estresse, estimulando a síntese de compostos osmorreguladores, osmoprotetores e antioxidantes e respostas fisiológicas associadas a tolerância a salinidade (SANTOS et al., 2018; BALASUBRAMANIAM et al., 2023).

Nossa hipótese é que a tolerância das mudas de cajueiro ao estresse salino pode variar entre genótipos, conforme verificado por Lima et al. (2020) e Lima et al. (2022); e a aplicação de peróxido de hidrogênio via foliar pode modular as respostas das mudas a se aclimatar ao estresse salino através de modificações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas (GOHARRIZI et al., 2024), tornando viável a utilização da água produzida do petróleo para suplementação hídrica em regiões cujo recurso hídrico é um fator limitante para produção de alimentos. Neste

contexto, realizou-se esta pesquisa com a finalidade de avaliar a morfofisiologia de mudas de genótipos de cajueiro sob irrigação com água produzida do petróleo com teores elevados de sais associado a aplicação exógena de peróxido de hidrogênio.

3.2. Material e métodos

3.2.1. Localização do experimento

O experimento foi conduzido entre os meses de outubro a dezembro de 2023, em condições de ambiente protegido (telado) nas dependências da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), campus Caraúbas, município de Caraúbas, Rio Grande do Norte, cujas coordenadas geográficas são 05° 47' 33' S, 37° 33' 24" W e altitude média de 144 m. Segundo a classificação de Köppen o clima da região é do tipo BSh, ou seja, semiárido quente (ALVARES et al., 2013).

No período em que o estudo foi dirigido, meses de outubro a dezembro, o município apresentou precipitação de 0 mm, caracterizando o momento popularmente chamado de estiagem, comum no semiárido potiguar. A umidade relativa do ar foi em média de 60,26% e temperatura do ar 28,83 °C, de acordo com a Estação Meteorológica Automática (EMA) da UFERSA, campus Caraúbas.

3.2.2. Delineamento experimental, tratamentos e semeio das mudas de cajueiro

O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados e analisado em esquema fatorial $5 \times 2 \times 2$ com quatro repetições e uma planta por parcela, cujos tratamentos consistiram em cinco diluições de água produzida do petróleo sintética - AP em água não salina - ANS, sendo estas T1: 100% ANS, T2: 75% ANS + 25% AP, T3: 50% ANS + 50% AP, T4: 25% ANS + 75% AP e T5: 100% AP, associados a duas concentrações de peróxido de hidrogênio - H_2O_2 (0 e 15 μM) e dois genótipos de cajueiro - G (Crioula NP e FAGA-01). A água não salina foi proveniente de poço artesiano gerenciado pela Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN) e apresentou condutividade elétrica da água (CEa) de 0,47 dS m^{-1} .

Conforme Alencar et al. (2021), o cajueiro pode ter o seu desenvolvimento comprometido devido a salinidade, ocorrendo inibição acentuada no crescimento a partir da condutividade elétrica da água (CEa) de 1,58 dS m^{-1} , no entanto, essa sensibilidade varia em função de diversos fatores, dentre eles, genótipos (LIMA et al., 2020). Para tanto, os diferentes tratamentos referentes à diluição da AP, foram preparados considerando a indicação da sensibilidade da cultura aos sais e, após as diluições, tiveram as seguintes CEa (T1 - 0,47 dS m^{-1}

¹, T2 - 1,26 dS m⁻¹, T3 - 2,06 dS m⁻¹, T4 - 2,63 dS m⁻¹ e T5 - 3,52 dS m⁻¹) e pH (T1 - 7,11; T2 - 7,43; T3 - 7,68; T4 - 7,75 e T5 - 7,79).

As concentrações de H₂O₂ foram estabelecidas baseando-se em trabalho de Sousa et al. (2023) com gravioleira (*Annona muricata*). As concentrações foram preparadas a partir da diluição da solução de peróxido de hidrogênio 1 M em água destilada.

Foram estudados o clone de cajueiro anão-precoce “FAGA-01”, recomendado para o cultivo em sequeiro e por apresentar elevada produção e características como castanhas grandes e massa elevada (ALMEIDA, 2002); e um material crioulo, proveniente do Município de Severiano Melo, Rio Grande do Norte, Brasil, que é denominado como “Crioula NP”. Os materiais considerados “crioulos” apresentam como vantagem a alta adaptação as condições ambientais do local de cultivo, o rápido crescimento e a alta produção de castanhas (MESQUITA et al., 2010).

A água produzida do petróleo utilizada no experimento foi preparada a partir da composição média das AP da região da Bacia Potiguar, de acordo com Figueredo et al. (2014), a partir do uso de reagentes e da determinação da quantidade necessária (Tabela 1).

Tabela 1. Composição química média da água produzida de petróleo (AP) encontrada nos poços da Bacia Potiguar e os reagentes e quantitativos utilizados para produção da AP sintética.

Composição química da AP	Média (mg L ⁻¹)	Reagentes utilizados na composição da AP sintética	Quantitativo de reagentes (g 1000L ⁻¹)
Alumínio	0,13	Cloreto de alumínio	1,162
Bário	0,84	Boráx	3,88
Boro	0,44	Ácido bórico	2,519
Cálcio	169,87	Sulfato de cálcio	55,89
Cloreto	687,47	Cloreto de cálcio	425,74
Ferro	0,24	Cloreto de ferro	0,695
Magnésio	65,76	Cloreto de magnésio	557,05
Manganês	0,19	Sulfato de manganês	0,522
Potássio	47,62	Cloreto de potássio	89,46
Sódio	242,07	Cloreto de sódio	609,5
Sulfato	39,94	Sulfato de zinco	0,222
Zinco	0,09		

3.2.3. Produção das mudas e aplicação dos tratamentos

As mudas de cajueiro foram conduzidas em sacolas plásticas de polietileno com capacidade de 1150 mL, com furos presentes na parte inferior para permitir a livre drenagem de água. As sacolas foram preenchidas com material de solo franco-arenoso coletado na camada de 0-30 cm, representativo das áreas de exploração agrícola do Município de Caraúbas - RN e adicionado 5% em base peso de esterco bovino curtido. As sacolas foram acomodadas em

estrados de madeira a 20 cm de altura, usando-se para o semeio uma semente (castanha) por sacola, inserindo-se a mesma em sentido vertical, onde o ponto de inserção da castanha ao pedúnculo permaneceu voltado para cima, com profundidade de aproximadamente 1 cm. Antes do semeio, adicionou-se um volume de água em cada sacola visando elevar a umidade do substrato ao ponto de capacidade de pote, usando água não salina, proveniente de abastecimento local, cuja condutividade elétrica da água - CEa foi de $0,47 \text{ dS m}^{-1}$ que continuou a ser aplicada até os 16 dias após a emergência das plântulas (DAE).

As plântulas emergiram, em média, aos 17 dias após o semeio (DAS), tendo-se iniciado a aplicação do tratamento com as distintas diluições da água produzida do petróleo após esse período. As irrigações eram realizadas diariamente no início da manhã e no final da tarde de forma manual com o auxílio de uma proveta graduada, aplicando-se, em cada sacola plástica, um volume de água para a manutenção da umidade do solo próximo à capacidade de campo, sendo o volume aplicado determinado de acordo com a necessidade hídrica das plantas, estimada pelo balanço de água mediante subtração de volume drenado do volume aplicado da irrigação anterior, acrescido de uma fração de lixiviação de 0,10 e, para este processo, foram usadas 30 sacolas, escolhidas aleatoriamente, onde foram acoplados coletores.

As concentrações de H_2O_2 foram aplicadas em quatro períodos com intervalos de oito dias entre aplicações, cuja primeira aplicação ocorreu três dias antes do início da irrigação com a AP (14 DAE). As aplicações sucederam-se no final da tarde nas faces abaxial e adaxial das folhas das plantas, de modo a obter-se o molhamento completo, utilizando-se de um borrifador. Durante o ciclo das plantas não foi efetuado nenhum trato fitossanitário nas mudas de cajueiro. Além disso, a adubação nitrogenada foi realizada aos 37 DAE, diluindo-se 355,2 g de ureia em 20 L de água, sendo colocado 100 mL por sacola, conforme indicação segundo Novais et al. (1991) para volume de solo.

3.2.4. Variáveis analisadas

Aos 42 DAE, foi realizado a determinação das trocas gasosas utilizando um aparelho de análise de gás infravermelho (IRGA) modelo LCPro+. As avaliações ocorreram entre as 7:00h e as 9:00h da manhã, em folhas maduras e completamente expandidas utilizando-se fonte de luz artificial com intensidade de $1200 \text{ MJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (ALENCAR et al., 2021) e CO_2 obtido da atmosfera a uma altura de 2,5 m. As variáveis de trocas gasosas determinadas foram a taxa de transpiração foliar - E ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentração intercelular de CO_2 - C_i ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática - g_s ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e a taxa de assimilação de CO_2 - A ($\mu\text{mol CO}_2$

$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$). Através dessas variáveis foram determinadas relações de eficiência instantânea no uso da água - $EiUA (A/E) [(\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}) (\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1})^{-1}]$.

Aos 23 e 42 DAE foram determinados a altura de planta (AP), o diâmetro de caule (DC) e área foliar (AF). A partir desses dados foram determinadas as taxas de crescimento absoluto - TCA (TCAap, TCA_{dc} e a TCAaf) de mudas de cajueiro, seguindo a metodologia contida em Benincasa (2003):

$$\text{TCA} = [(A_2 - A_1) / (t_2 - t_1)]$$

Em que:

A_2 – Variável determinada (AP, cm; DC, mm ou AF, cm^2) no tempo 2;

A_1 - variável determinada (AP, cm; DC, mm ou AF, cm^2) no tempo 1;

t_2 – Tempo da última leitura, dias

t_1 – Tempo da primeira leitura, dias

Aos 42 DAE, as plantas foram cortadas rente ao solo separando-se as distintas partes das plantas (raízes, caule e folhas), colocadas em sacos de papel devidamente identificadas e pesadas em balança analítica para determinação da massa fresca de folhas (MFF), de caule (MFC), de raízes (MFR), da parte aérea (MFPA = MFF + MFC) e total por planta (MFT = MFPA + MFR). Outrossim, posteriormente, esse material foi posto em estufa de circulação forçada de ar à 65°C até obtenção de massa seca das distintas partes das plantas (MSF, MSC, MSR, MSPA e MST).

A qualidade das mudas de cajueiro foi determinada através do índice de qualidade de Dickson (IQD), por meio da Eq. 1, conforme Dickson et al. (1960):

$$\text{IQD} = [\text{MST} / (\text{AP}/\text{DC}) + (\text{MSPA}/\text{MSR})] \quad (1)$$

Em que:

MST = massa seca total de planta;

AP = altura de planta;

DC = diâmetro de caule;

MSPA = massa seca de parte aérea; e

MSR = massa seca de raiz (g)

3.2.5. Análise estatística

Antes da análise estatística, os dados foram submetidos a análise de homogeneidade e normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk. As médias das variáveis foram submetidas à análise de variância pelo teste F ($p \leq 0,05$). Em seguida, as médias referentes aos genótipos e concentrações foram comparadas pelo teste F ($p \leq 0,05$), que são conclusivos quando há apenas dois fatores na fonte de variação, enquanto para as diluições da água produzida do petróleo foram comparadas pelo teste de Tukey (1 e 5% de probabilidade). Para análise dos dados foi utilizado o software estatístico SISVAR versão 5.6 (FERREIRA, 2019).

3.3. Resultados e discussão

Verifica-se efeito significativo nas mudas de cajueiro das interações AP $\times$ H₂O₂ e AP $\times$ G sob a condutância estomática e da interação AP $\times$ G na eficiência instantânea no uso da água (Tabela 2). A taxa de assimilação de carbono respondeu, de forma isolada, a água produzida do petróleo e as concentrações de H₂O₂, enquanto a concentração interna de CO₂ e a transpiração foliar das mudas de cajueiro foram influenciadas significativamente a água produzida e aos genótipos.

Tabela 2. Resumo da análise de variância, pelos valores do quadrado médio, referente a condutância estomática (*gs*), concentração interna de CO₂ (*Ci*), taxa de assimilação de CO₂ (*A*), transpiração foliar (*E*) e eficiência instantânea no uso da água (*EiUA*) das mudas de genótipos (G) de cajueiro sob irrigação com diluições de água produzida do petróleo (AP) e aplicação foliar de concentrações de peróxido de hidrogênio (H₂O₂), aos 42 DAE.

Fontes de Variação	Quadrados Médios				
	<i>gs</i>	<i>Ci</i>	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>EiUA</i>
Água produzida (AP)	1124128,341**	2932,008**	44,604**	16,674**	0,001**
Peróxido de hidrogênio (H ₂ O ₂)	224065,397*	823,494 ^{ns}	33,826*	0,382 ^{ns}	0,000*
Genótipos (G)	23089758,597**	29771,029**	25,696 ^{ns}	388,565**	0,022**
Interação (AP $\times$ H ₂ O ₂)	190792,284***	972,075 ^{ns}	8,809 ^{ns}	1,365 ^{ns}	0,000 ^{ns}
Interação (AP $\times$ G)	340919,436**	602,690 ^{ns}	14,943 ^{ns}	3,553 ^{ns}	0,000**
Interação (H ₂ O ₂ $\times$ G)	184938,758 ^{ns}	51,312 ^{ns}	6,039 ^{ns}	2,632 ^{ns}	0,000 ^{ns}
Interação (AP $\times$ H ₂ O ₂ $\times$ G)	248595,972 ^{ns}	1146,431 ^{ns}	5,181 ^{ns}	2,993 ^{ns}	0,000 ^{ns}
Blocos	397889,246**	352,246 ^{ns}	26,422*	9,279*	0,000 ^{ns}
CV (%)	26,59	8,35	13,84	17,36	23,64

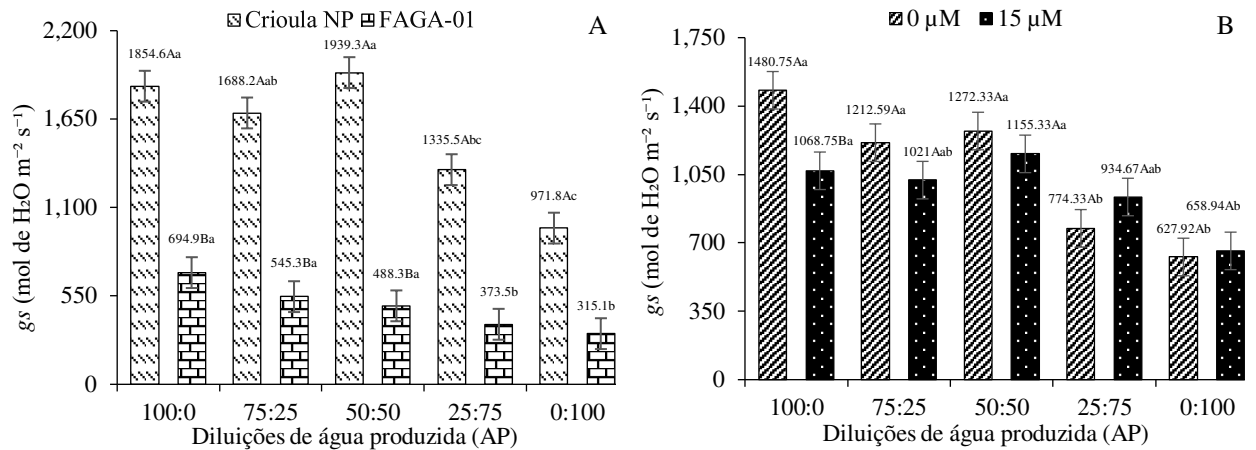
ns, **, * respectivamente não significativos, significativo a 1% e 5%, respectivamente; CV= coeficiente de variação.

A condutância estomática das mudas de cajueiro Crioula NP foi superior as observadas no genótipo FAGA-01, independente da diluição da água produzida de petróleo (Figura 1A).

Os maiores incrementos da g_s nas mudas de cajueiro Crioula NP irrigadas com a água produzida do petróleo foram na diluição de 50:50 (297,15%). De acordo com Araújo Junior et al. (2024), a redução dos valores de condutância estomática (fechamento parcial dos estômatos) das mudas de cajueiro sob estresse salino está associada a baixa assimilação de CO_2 , consequência da diminuição da entrada do gás na célula. Genótipos mais tolerantes a salinidade apresenta controle na abertura dos estômatos, para reduzir a absorção de Na^+ e preservar o baixo teor nos tecidos vegetais, associado a manutenção da atividade fotossintética e maior eficiência instantânea no uso da água (ALENCAR et al., 2021).

No Crioula NP, as mudas irrigadas com AP-3 não diferiram estatisticamente de AP-1 e AP-2, superando as irrigadas com AP-5 em 49,89%. Enquanto no genótipo FAGA-01, a maior g_s foi obtida em plantas sob AP-1, que não diferiu estatisticamente de AP-2 e AP-3 e superou em 54,66% o AP-5. Pelos resultados, percebe-se que as mudas de cajueiro podem ser irrigadas com água produzida com CEa de até $2,06 \text{ dS m}^{-1}$ (AP-3), principalmente, o genótipo Crioula NP que aumentou a g_s com esse tipo de água. A diluição de água salina é uma técnica de manejo da água salinizada, que associa a redução da condutividade elétrica da água com aumento do volume de água disponível para irrigação na agricultura (SEDLACKO et al., 2019), promovendo a sustentabilidade e preservação dos recursos ambientais em regiões semiáridas. A utilização de água produzida para irrigação em regiões com restrição hídrica, em quantidade e qualidade pode ajudar na redução de consumo de fontes de água potável; neste sentido, a salinidade da água, a técnica de utilização da água e a escolha de espécies ou materiais genéticos mais tolerantes são fatores considerados para que as culturas agrícolas não tenham sua capacidade fisiológica e produtiva comprometidas (AL-GHOUTI et al., 2019).

Em ambos os genótipos, denota-se que a utilização de AP-5 ($3,52 \text{ dS m}^{-1}$) induz o fechamento estomático das plantas e pode estar associado ao estresse osmótico causado pela elevada presença de sais no sistema radicular das plantas como forma de evitar a perda de água pela elevada taxa transpiratória das folhas (BAATH et al., 2016; BALASUBRAMANIAM et al., 2023; COLIN et al., 2023).



Na figura A - Letras maiúsculas iguais não diferem entre si para os genótipos de cajueiro dentro de cada diluição da água produzida do petróleo pelo teste F ($p \leq 0,05$) e letras minúsculas iguais não diferem entre si para as diluições de água produzida dentro de cada genótipo de cajueiro pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Na figura B - Letras maiúsculas iguais não diferem entre si para as concentrações de peróxido de hidrogênio dentro de cada diluição da água produzida do petróleo pelo teste F ($p \leq 0,05$) e letras minúsculas iguais não diferem entre si para as diluições de água produzida dentro de cada diluição de peróxido de hidrogênio pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Dispersão nas barras representa o desvio padrão das médias ($n = 4$).

Figura 1. Condutância estomática - g_s das mudas de genótipos de cajueiro sob irrigação com diluições de água produzida do petróleo (A) e sob irrigação com diluições de água produzida do petróleo e aplicação de peróxido de hidrogênio (B), aos 42 DAE.

Na Figura 1B, verifica-se que a o aumento da proporção de água produzida do petróleo reduziu a condutância estomática das mudas de cajueiro, independente da aplicação do peróxido de hidrogênio. A g_s foi reduzida em 57,59% e 38,34% nos tratamentos com 0 e 15 μM de H_2O_2 , respectivamente. A redução na g_s pode limitar o influxo e limitar a fixação de CO_2 porém, não está associada a menor eficiência fotossintética e, sim, a fatores não-estomáticos, como descrevem Souza et al. (2019) em cajueiro sob estresse por excesso de sais.

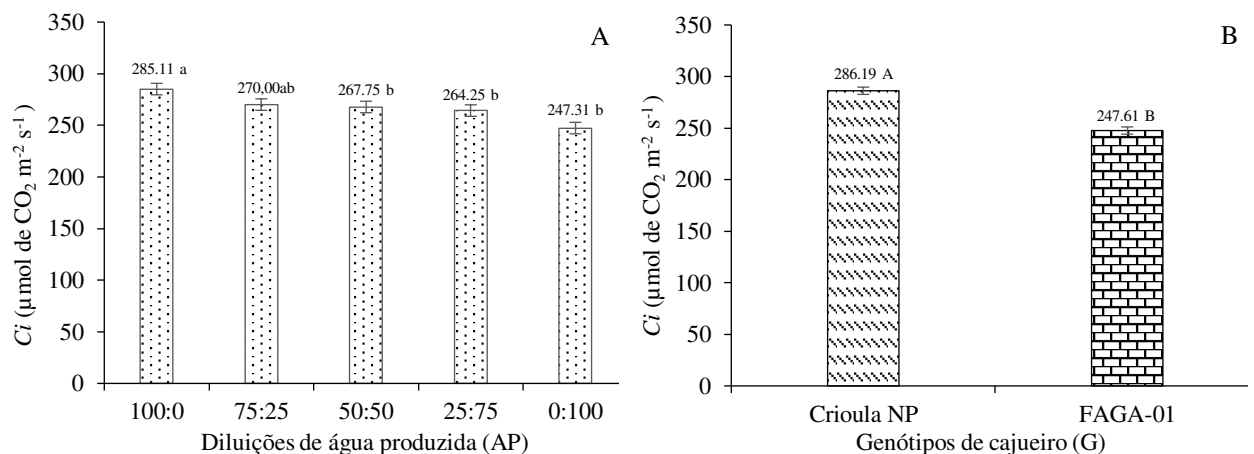
A aplicação de 15 μM de H_2O_2 via pulverização foliar reduz a g_s nas plantas com altas diluições de AP (baixa CE), mas em altas concentrações promoveu maiores valores de g_s (alta CE). Nas águas AP-4 e AP-5, o peróxido de hidrogênio promoveu incrementos de 20,70% e 4,94%, respectivamente. Sob estresse hiperosmótico, o H_2O_2 promoveu incrementos na g_s nas mudas de graviola – *Annona muricata* L. irrigadas com água salina de até 4,0 dS m^{-1} e pode estar associado aos efeitos benéficos do atenuador nos mecanismos de defesa do sistema enzimático antioxidante, minimizando os danos da salinidade (CAPITULINO et al., 2023). O peróxido de hidrogênio atua como sinalizador do estresse imposto que, via regulação estomática pela estabilização do ácido abscísico (ABA), modula as células guarda e melhora a atividade fotossintética da planta sob estresse salino (IQBAL et al., 2023), assim como observado.

A redução nas diluições de água produzida do petróleo afetou negativamente a concentração interna de CO_2 (Figura 2A). A maior concentração interna de CO_2 foi observado nas mudas com AP-1 ($285,11 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) não diferindo estatisticamente das mudas com as

diluições AP-2, AP-3 e AP-4. O menor valor de C_i ($247,31 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) foi obtido nas mudas irrigadas com 100% de AP (AP-5), que foi 13,26% inferior àquelas sob AP1.

Os menores valores de condutância estomática (Figura 1) nas plantas irrigadas com alta proporção de AP contribuíram para o influxo de dióxido de carbono, reduzindo a concentração interna de carbono e na sua disponibilidade como substrato para fotossíntese. A água produzida do petróleo não diluída apresenta altas concentração e, portanto, alta condutividade elétrica ($CE = 3,52 \text{ dS m}^{-1}$) e reduz a C_i das mudas de cajueiro. A salinidade impõe limitação das trocas gasosas, dentre elas, a entrada de CO_2 pelas células do mesófilo, causado pela redução da abertura estomática quando há uma perturbação às relações hídricas no sistema solo-água-planta-atmosfera, que regulada por sinais das raízes, com ondas que envolvem uma reação em cadeia do balanço hormonal (ABA) e mensageiros secundários (Ca^{2+} e ROS – H_2O_2) na planta a nível celular (PAN et al., 2020; HAO et al., 2021; MATKOWSKI e DASZKOWSKA-GOLEC, 2023).

No entanto, a diluição 75:25 (ANS:AP) e $CE = 1,26 \text{ dS m}^{-1}$ pode ser aplicada sem que haja limitação estomática para entrada de CO_2 para o interior das células. Pelos resultados, a salinidade limiar da cultura explorada dever ser considerada na proporção de mistura de água não salina e água produzida para permitir que não haja limitação nos aspectos fisiológicos e de crescimento das mudas de cajueiro, ao mesmo tempo, que promove a preservação e sustentabilidade dos recursos a longo prazo. Neste sentido, Echchelh et al. (2019) destacam que técnicas de gestão de água do petróleo para irrigação, através da diluição em água doce ou dessalinização, pode ser usada em ambientes que tenham baixa vulnerabilidade da salinidade ou sodicidade. Além disso, os autores destacam que uma avaliação mais ampla dos impactos da qualidade da AP em relação à metais pesados nos plantios e nas águas subterrâneas devem ser realizados de forma rigorosa (COSTA et al., 2020; AMAKIRI et al., 2022).

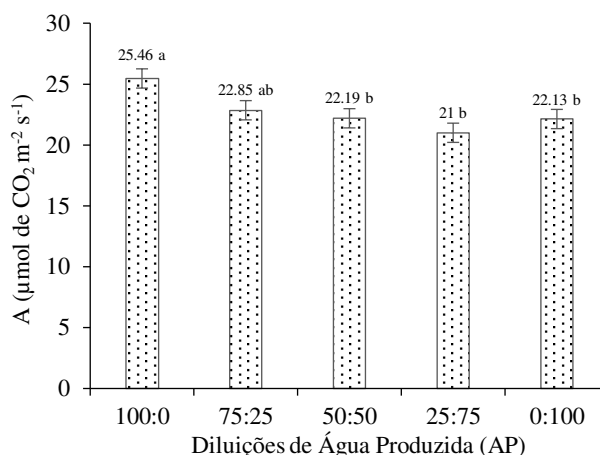


Letras maiúsculas iguais não diferem entre si nas diluições da água produzida do petróleo pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$) e letras minúsculas iguais não diferem entre si para os genótipos de cajueiro pelo teste F ($p \leq 0,05$). Dispersão nas barras representa o desvio padrão das médias ($n = 4$).

Figura 2. Concentração interna de CO_2 - C_i das mudas de cajueiro em função das diluições de água produzida do petróleo (A) e de genótipos de cajueiro (B), aos 42 DAE.

O maior valor de C_i ($286,19 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) foi obtida nas mudas do genótipo Crioula NP, sendo superior em 13,48% as mudas do genótipo FAGA-01 (Figura 2B). Assim como ocorrido com a g_s (Figura 1A), o genótipo Crioula NP também superou o FAGA-01 em termos de C_i (Figura 2B), indicando que o fechamento estomático afeta a concentração interna de CO_2 . Comportamento semelhante foi observado por Silva et al. (2018), que verificaram diferenças significativas na C_i entre genótipos de cajueiro, observando superioridade de 45,26% do CCP76 em relação ao CCP09 em condições de estresse salino. Os autores destacam que essa maior C_i pode estar associada com a característica dos genótipos de não restringir a abertura estomática, como também observado nesta pesquisa para o genótipo Crioula NP (Figura 1).

O aumento da proporção de AP na água de irrigação inibiu a taxa de assimilação de CO_2 das mudas de cajueiro (Figura 3). O maior valor de A ($25,46 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) foi obtida em plantas irrigadas 100% com água não salina (AP-1) que não diferiram estatisticamente das plantas sob a combinação AP-2 (75%AA+25%AP) e, superou, respectivamente, em 17,51% e 13,08% as plantas sob AP-4 e AP-5. Desta forma, vê-se que os menores valores de taxa fotossintética foram obtidos em plantas sob maior percentual de água produzida do petróleo, ou seja, com maior condutividade elétrica. Altas concentrações de sais presentes na AP (Tabela 1) podem afetar de forma negativa a atividade fotossintética das plantas, comprometendo a absorção de gás carbônico em resposta ao fechamento estomático (Figura 1A) e diminuição da C_i (Figura 2A).



Letras minúsculas iguais não diferem entre si nas diluições da água produzida de petróleo pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Dispersão nas barras representa o desvio padrão das médias ($n = 4$).

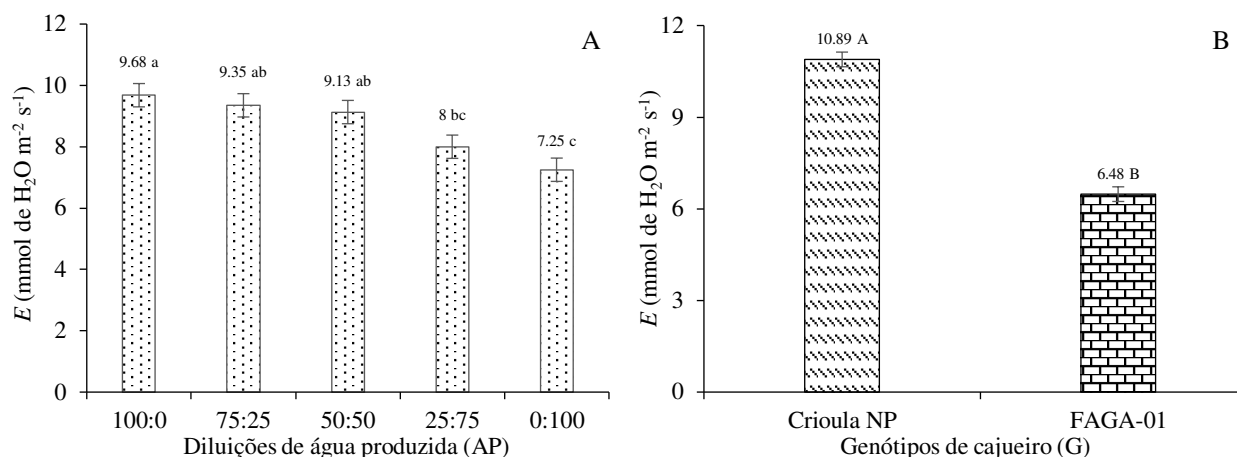
Figura 3. Taxa de assimilação de CO₂ - A das mudas de cajueiro, em função das diluições de água produzida do petróleo, aos 42 DAE.

A utilização da água produzida para irrigação com proporções acima de 50% pode prejudicar os processos fotossintéticos das plantas que, além do problema da salinidade, pode apresentar baixos níveis de metais pesados e produtos químicos orgânicos, que podem causar impactos negativos (SEDLACKO et al., 2019). Inibição na taxa de assimilação de carbono em cajueiro sob estresse por excesso de sais foram observados por Souza et al. (2019) com redução de 64,29% no cajueiro CCP09 irrigado com 100 mM de NaCl; Alencar et al. (2021) verificaram reduções na fotossíntese de 69,8% e 34,7% nos genótipos CCP06 e BRS189, respectivamente, irrigados com água de 16 dS m⁻¹ e Araújo Junior et al. (2024) que verificaram reduções de até 84% na taxa fotossintética em mudas de CCP09 e CCP76 irrigadas com água salina. Todos os autores atribuem, não somente a limitações estomáticas pela redução na disponibilidade de substrato (dióxido de carbono), mas, também a limitações não estomáticas. O estresse salino suprime a atividade de enzimas fotossintéticas no ciclo de Calvin, reduz a biossíntese de cloroplastos e eficiência de operação e integridade estrutural do aparelho fotossintético e membranas do tilacoides (PAN et al., 2020; AL-JANABIA et al., 2024).

As mudas de cajueiro irrigadas com AP-1 (100% ANS) apresentaram o maior valor de E (9,68 mmol H₂O m⁻² s⁻¹), mas não diferiu estatisticamente dos valores observadas nas mudas irrigadas com AP-2 (75% ANS + 25% AP) e AP-3 (50% ANS + 50% AP). As plantas irrigadas com 100% de AP (AP- 5) tiveram a menor taxa de transpiração foliar, com perdas de 25,1% em relação à AP-1. Possivelmente, em função da maior CE da água de irrigação oriunda da AP (3,52 dS m⁻¹), as mudas de cajueiro sob estresse osmótico que, sob diferença de gradiente de pressão, tem dificuldade de absorver água do substrato. Como forma de reduzir os danos da salinidade e evitar a perda excessiva de água para o ambiente, as plantas se aclimatizam através da redução na abertura estomática (Figura 1B) como forma de evitar a perda de água (BRITO et al., 2018).

No entanto, a diluição da AP em proporções de 75:25 pode se tornar uma alternativa para irrigação das mudas de cajueiro, sem causar prejuízo nas trocas gasosas, como observado para concentração interna de carbono (Figura 2A), taxa de assimilação de CO₂ (Figura 3A) e transpiração foliar (Figura 4A), que não diferiu do tratamento controle (AP-1). A diluição da água produzida do petróleo em proporções adequadas pode ser uma alternativa para utilização na agricultura para produção de alimentos em ambientes semiáridos, sem afetar os processos fotossintéticos das plantas. Como destacam Echchel et al. (2018), em regiões que a limitação

hídrica, como o semiárido do Nordeste do Brasil, a utilização de água produzida é uma alternativa econômica para produção de alimentos, tornando-se vantajoso no âmbito social e ambiental, principalmente, em relação aos métodos alternativos de descarte.



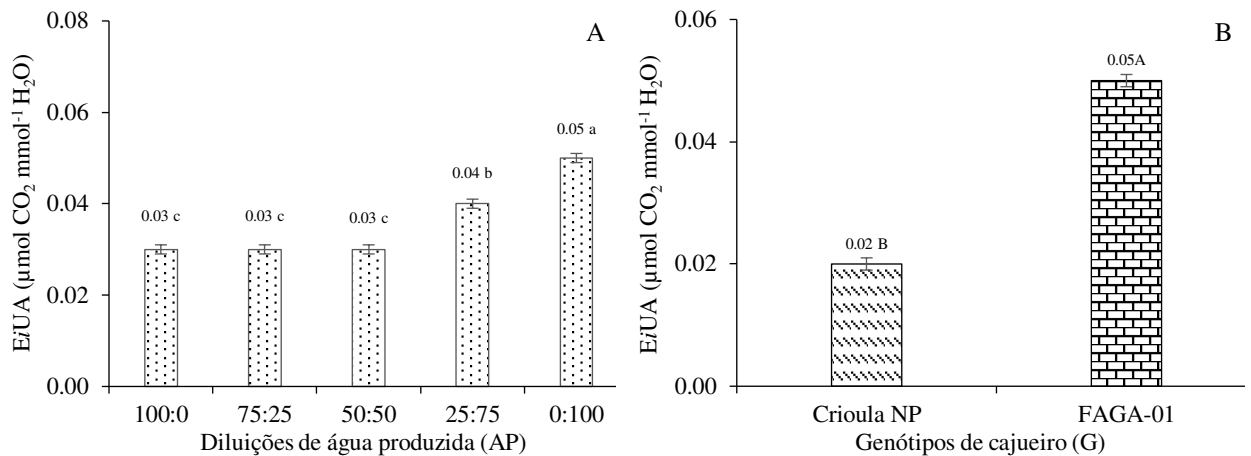
Letras minúsculas iguais não diferem entre si nas diluições da água produzida de petróleo pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$) e letras maiúsculas iguais não diferem entre si para os genótipos de cajueiro pelo teste F ($p \leq 0,05$). Dispersão nas barras representa o desvio padrão das médias ($n = 4$).

Figura 4. Transpiração foliar - E das mudas de cajueiro, em função das diluições de água produzida do petróleo (A) e de genótipos (B), aos 42 DAE.

De acordo com o teste de média, observa-se que o genótipo de cajueiro ‘Crioula NP’ teve maior taxa de transpiração foliar e superou em 40,5% o observado no ‘FAGA-01’ (Figura 4B). Denota-se que o Crioula NP, por não mostrar limitação estomática (Figura 1A), é um genótipo que apresenta maior transpiração foliar, que por sua vez, pode ser uma característica que favorece o controle foliar da temperatura e maior absorção de nutrientes por elementos que são favorecidos pelo fluxo transpiratório, a exemplo do cálcio, permitindo melhor desenvolvimento vegetal das plantas (SOUZA et al., 2012). Resultados semelhantes foram verificados por Alencar et al. (2021), ao constatarem diferenças na transpiração foliar de mudas de cajueiro irrigadas com água salina e não salina, com maiores valores médios no genótipo CCP06 em relação ao BRS 189.

A eficiência instantânea no uso da água de mudas de cajueiro foi afetada pelas diluições de AP e, de acordo com a comparação de médias (Figura 5A), verifica-se que as maiores E_iUA foram observadas em plantas irrigadas com maiores proporções de AP (AP-4 e AP-5). As respectivas águas apresentavam valores de condutividade elétrica de 2,63 e 3,52 dS m⁻¹, ou seja, as maiores salinidades. Pelos resultados, verifica-se que as mudas de cajueiro apresentaram um estado de aclimação ao estresse salino, sendo mais eficientes na assimilação de CO₂ por unidade de molécula de H₂O transpirada. O estresse salino, normalmente, reduz a E_iUA das espécies glicófitas, inclusive em mudas de cajueiro como observado por Silva et al. (2018), que

verificaram redução de até 69% nas plantas irrigadas com água contendo 100 mM de NaCl. A salinidade reduz a capacidade das plantas de absorver água, consequentemente, para evitar perda excessiva de água, reduzem a abertura dos estômatos e restringem a entrada de CO₂ nas câmaras subestomáticas, comprometendo a eficiência do uso da água (CAPITULINO et al., 2022; CAPITULINO et al., 2023)



Letras maiúsculas iguais não diferem entre si nas diluições da água produzida de petróleo pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$) e letras minúsculas iguais não diferem entre si para os genótipos de cajueiro pelo teste F ($p \leq 0,05$). Dispersão nas barras representa o desvio padrão das médias ($n = 4$).

Figura 5. Eficiência instantânea no uso da água - EiUA em mudas de cajueiro, em função das diluições de água produzida do petróleo (A) e genótipos (B), aos 42 DAE.

Outrossim, constata-se que o genótipo FAGA-01 foi 60% mais eficiente no uso da água do que o Crioula NP (Figura 5B), denotando que esse material genético apresenta maior eficiência na assimilação de carbono por unidade de transpiração foliar. Semelhantemente, Silva et al. (2018) verificaram diferença na eficiência do uso da água em genótipos de cajueiro irrigado com águas de diferentes salinidades, com superioridade do genótipo CCP09 em todas as águas salinas em relação ao CCP76. A EiUA é um parâmetro importante para seleção de materiais genéticos mais tolerantes ao estresse salino, cujo aqueles que apresentarem maior eficiência nessas condições, serão mais tolerantes.

A interação entre os fatores estudados não exerceu efeitos significativos sobre as variáveis de taxa de crescimento das mudas de cajueiro (Tabela 3). No entanto, houve efeito significativo isolado do fator diluições de água produzida do petróleo sobre a taxa de crescimento absoluto da altura da planta (TCAap) e da área foliar (TCAaf) de mudas de cajueiro e, dos genótipos de cajueiro sobre a taxa de crescimento absoluto do diâmetro de caule (TCAdc) e da área foliar (TCAaf).

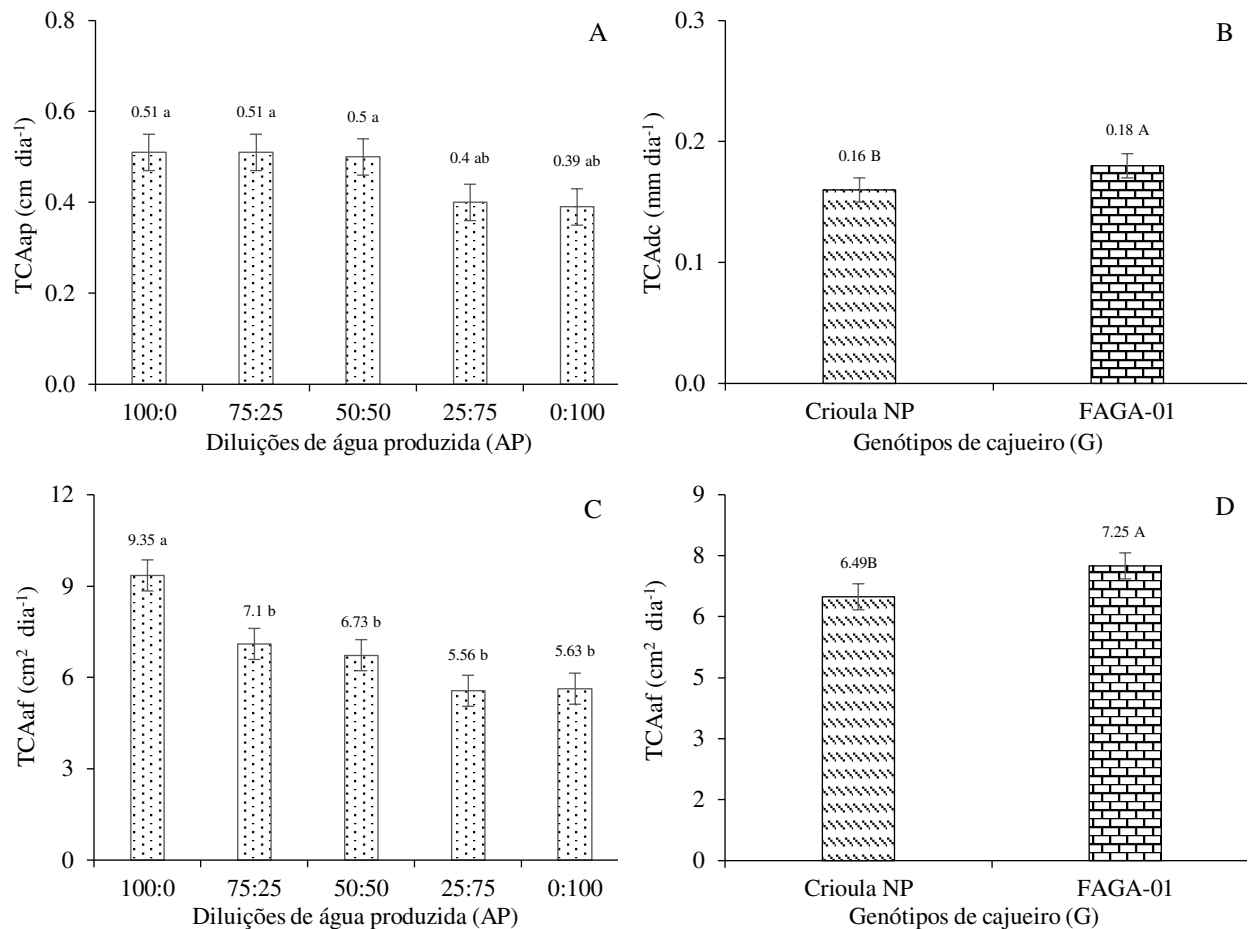
Tabela 3. Resumo da análise de variância, pelos valores do quadrado médio, referente a taxa de crescimento absoluto de altura de planta (TCAap), do diâmetro de caule (TCAdc) e da área foliar (TCAaf) das mudas de genótipos (G) de cajueiro sob irrigação com diluições de água produzida do petróleo (AP) e aplicação foliar de concentrações de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), aos 42 dias após a emergência (DAE).

Fonte de Variação	Quadrados médios		
	TCAap	TCAdc	TCAaf
Água produzida (AP)	0,062*	0,002 ^{ns}	37,868**
Peróxido de hidrogênio (H_2O_2)	0,060 ^{ns}	0,000 ^{ns}	0,040 ^{ns}
Genótipos (G)	0,022 ^{ns}	0,011**	11,735*
Interação (AP $\times$ H_2O_2)	0,012 ^{ns}	0,002 ^{ns}	4,135 ^{ns}
Interação (AP $\times$ G)	0,008 ^{ns}	0,000 ^{ns}	1,226 ^{ns}
Interação (H_2O_2 $\times$ G)	0,002 ^{ns}	0,002 ^{ns}	9,842 ^{ns}
Interação (AP $\times$ H_2O_2 $\times$ G)	0,017 ^{ns}	0,002 ^{ns}	17,707 ^{ns}
Blocos	0,124*	0,009**	2,098 ^{ns}
CV (%)	27,49	20,03	29,79

ns, **, * respectivamente não significativos, significativo a 1% e 5%, respectivamente; CV= coeficiente de variação.

A taxa de crescimento absoluto em altura e da área foliar das mudas de cajueiro foram afetadas de forma negativa com o aumento da proporção de água produzida do petróleo na água de irrigação (Figuras 6A e 6C). As TCAap e TCAaf foram reduzidas em 23,52% e 39,78%, respectivamente, ao comparar as plantas irrigadas com AP-5 e AP-1 (controle). Pelos resultados, a diluição em 50% da AP (AP-3) não prejudica a taxa de crescimento em altura de plantas; porém, a adição de água produzida na água de irrigação, em qualquer proporção, reduz a taxa de crescimento da área foliar.

A taxa de crescimento em altura de plantas das mudas de cajueiro pode ser devido à redução do potencial osmótico entre o substrato e a o sistema radicular causado pela salinidade da AP, principalmente quando utilizada sem diluição em água não salina (AP-5 = 3,52 dS m^{-1}), que leva a redução do turgor e expansão celular, reduzindo a taxa de crescimento, como relatam Lima et al. (2020) para mudas de cajueiro irrigados com água de até 3,6 dS m^{-1} . Enquanto a inibição da taxa de crescimento foliar em plantas sob estresse salino é resultado do desvio metabólico causado pelo estresse hídrico, devido à alta concentração de sais solúveis na água de irrigação, há maior gasto de energia metabólica e como resposta, as plantas reduzem a área foliar para reduzir as perdas de água por transpiração foliar (MUNIR et al., 2022).



Letras minúsculas iguais não diferem entre si nas diluições da água produzida de petróleo pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$) e letras maiúsculas iguais não diferem entre si para os genótipos de cajueiro pelo teste F ($p \leq 0,05$). Dispersão nas barras representa o desvio padrão das médias ($n = 4$).

Figura 6. Taxa de crescimento absoluto de altura da planta - TCAap e da área foliar - TCAaf das mudas de cajueiro em função das diluições de água produzida do petróleo (A e C) e de diâmetro do caule - TCAdc e da área foliar em função de genótipos (B e D), aos 42 DAE.

Os distintos genótipos de cajueiro deferiram estatisticamente em termos da TCAdc (Figura 6B) e TCAaf (Figura 6D), com o FAGA-01 apresentando maiores taxas de crescimento. As taxas de crescimento em diâmetro caulinar e área foliar das mudas do genótipo FAGA-01 foram superiores em 11,11% e 10,48% as observadas no Crioula NP, respectivamente. Neste sentido, as diferenças genotípicas e a seleção de características selecionadas no FAGA-01 podem favorecer a maior taxa de crescimento em condições normais ou sob estresse, estando associada a seleção de mecanismos ligados a maior eficiência fotossintética, de ajustamento osmótico e do sistema antioxidante contra estresse oxidativo (SILVA et al., 2021; ALENCAR et al., 2021).

A interação entre as fontes de variação $AP \times H_2O_2 \times G$ não causou efeito significativo sobre as variáveis de massa fresca dos órgãos de cajueiro e no índice de qualidade de Dickson (Tabela 4). No entanto, com exceção do índice de qualidade de Dickson, a interação $AP \times H_2O_2$

exerceu efeito significativo para a massa fresca das mudas de cajueiro. A massa fresca da raiz respondeu a interação entre água produzida (AP) e genótipos (G) de mudas de cajueiro. Em relação a interação entre os fatores água produzida do petróleo e as concentrações de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) apresentou efeito para as variáveis massa fresca de folhas (MFF), de caule (MFC), de raiz (MFR), de parte aérea (MFPA) e total (MFT).

Tabela 4. Resumo da análise de variância, pelos valores do quadrado médio, referente a massa fresca de folha (MFF), de caule (MFC), de raiz (MFR), de parte aérea (MFPA) e total (MFT) e índice de qualidade de Dickson (IQD) das mudas de genótipos (G) de cajueiro sob irrigação com diluições de água produzida do petróleo (AP) e aplicação foliar de concentrações de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), aos 42 dias após a emergência (DAE).

Fontes de variação	Quadrados médios					
	MFF	MFC	MFR	MFPA	MFT	IQD
Água produzida (AP)	17,581 ^{**}	15,412 ^{**}	1,174 ^{**}	65,500 ^{**}	82,382 ^{**}	0,208 ^{**}
Peróxido de hidrogênio (H_2O_2)	0,038 ^{ns}	1,001 ^{ns}	0,210 ^{ns}	0,650 ^{ns}	0,121 ^{ns}	0,006 ^{ns}
Genótipos (G)	0,265 ^{ns}	0,181 ^{ns}	1,694 [*]	0,008 ^{ns}	1,931 ^{ns}	0,081 ^{**}
Interação (AP $\times$ H_2O_2)	1,887 [*]	1,767 [*]	0,780 [*]	6,701 ^{**}	5,936 ^{**}	0,002 ^{ns}
Interação (AP $\times$ G)	0,278 ^{ns}	0,619 ^{ns}	1,263 ^{**}	0,147 ^{ns}	1,867 ^{ns}	0,010 ^{ns}
Interação (H_2O_2 $\times$ G)	0,403 ^{ns}	0,095 ^{ns}	0,091 ^{ns}	0,888 ^{ns}	1,548 ^{ns}	0,009 ^{ns}
Interação (AP $\times$ H_2O_2 $\times$ G)	0,338 ^{ns}	1,014 ^{ns}	0,666 ^{ns}	0,532 ^{ns}	0,114 ^{ns}	0,020 ^{ns}
Blocos	0,107 ^{ns}	1,857 [*]	0,527 ^{ns}	2,799 [*]	3,158 [*]	0,057 ^{**}
CV (%)	12,31	13,89	18,33	9,39	8,50	17,12

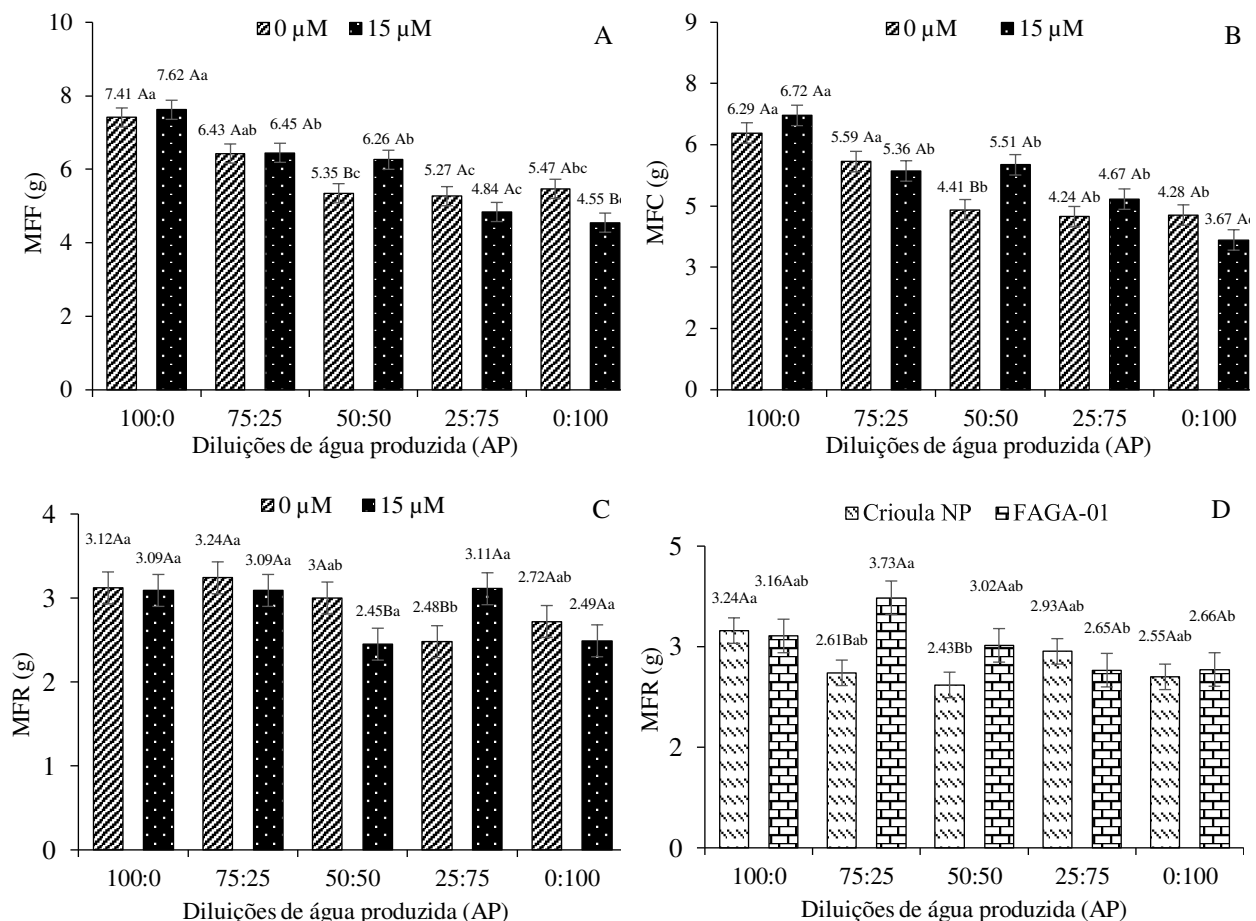
ns, **, * respectivamente não significativos, 1% e 5%, respectivamente; CV= coeficiente de variação.

As biomassas frescas das folhas (Figura 7A) e caule (Figura 7B) apresentaram diferença significativa para aplicação 15 μ M de H_2O_2 nas mudas irrigadas com AP-3 (CE = 2,06 dS m⁻¹), com incrementos de 17,44% e 24,94%, respectivamente. Já para a Figura 7C, o incremento ocorreu em AP-4 (CE = 2,63 dS m⁻¹) com 25,4% sobre a massa fresca de raiz. O pré-tratamento com peróxido de hidrogênio pode induzir a planta na aclimação em condições de estresse salino moderado, através de alterações metabólicas que agem na sinalização do estresse e na prevenção de danos celulares através da ativação do sistema de defesa antioxidante da planta (CAPITULINO et al., 2022; GOHARRIZI et al., 2024). Comportamento semelhante foi verificado por Santos et al. (2018) em maracujazeiro-amarelo e por Capitulino et al. (2022) em mudas de gravioleira, que verificaram que as plantas sob estresse salino apresentavam maior acúmulo de biomassa quando pré-tratadas com peróxido de hidrogênio na concentração de 20 μ M.

No entanto, o H_2O_2 não causou efeito positivo na biomassa fresca nas mudas de cajueiro irrigadas com AP-5 (CE = 3,52 dS m⁻¹), apresentando reduções de 16,81%, 14,25% e 8,46%, respectivamente, para MFF, MFC e MFR (Figura 7). Em altas salinidades, o peróxido de

hidrogênio pode intensificar o efeito do estresse salino e reduzir o acúmulo de biomassa nas plantas (ANDRADE et al., 2019; SILVA et al., 2019) que, em altos níveis, pode promover a formação de radicais hidroxilas ($\text{OH}^\cdot$), resultando na peroxidação lipídica e na inativação de enzimas antioxidantes (BAGHERI et al., 2019).

Para a massa fresca de raiz, em relação a interação entre as diluições de água produzida e genótipos (Figura 7D), o aumento da salinidade afetou significativamente o material FAGA-01, com redução de 15,82%. Porém, houve aumento de 4,31% quando submetido a irrigação de $\text{CE} = 3,52 \text{ dS m}^{-1}$ (AP-5), em comparação ao material Crioula NP. Entre AP-2 e AP-3, apesar do FAGA-01 apresentar redução com o aumento da salinidade, foram estas as diluições que demonstraram melhores resultados na presença de AP. Ademais, as mudas de Crioula NP foram prejudicadas com o acréscimo da CE, mantendo números considerados somente quando submetida a 100% ANS.

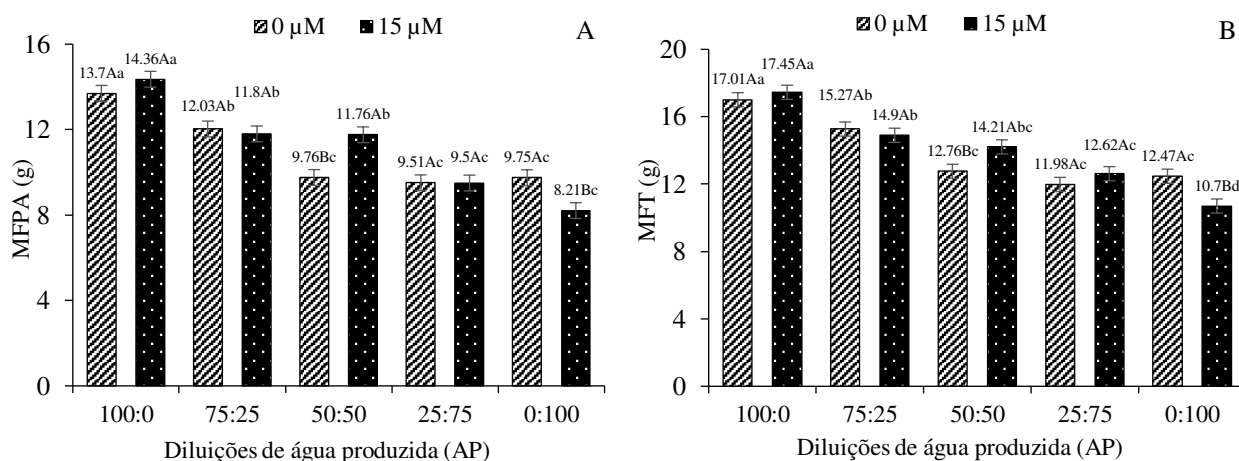


Letras maiúsculas iguais não diferem entre si para as concentrações de peróxido de hidrogênio dentro de cada diluição da água produzida de petróleo pelo teste F ($p \leq 0,05$) e letras minúsculas iguais não diferem entre si para as diluições de água produzida dentro de cada diluição de peróxido de hidrogênio pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Dispersão nas barras representa o desvio padrão das médias ($n = 4$).

Figura 7. Massa fresca das folhas - MFF (A), caule - MFC (B) e raiz - MFR (C e D) de mudas de cajueiro sob irrigação com diluições de água produzida do petróleo e aplicação de peróxido de hidrogênio e genótipos, aos 42 DAE.

Para a massa fresca de parte aérea (Figura 8A) e total (Figura 8B) em relação a aplicação de maior concentração de H_2O_2 , houve incremento de 20,49% e 11,36%, respectivamente, para as plantas irrigadas com água de proporção 50:50 ($CE = 2,63 \text{ dS m}^{-1}$). Em estudos realizados por Iqbal et al. (2023) avaliando plantas de quinoa sob estresse salino e aplicações de peróxido de hidrogênio, obtiveram resultados positivos em relação ao uso exógeno do composto em concentração de $15 \mu\text{M}$, sendo os atributos de crescimento os menos atingidos pela salinidade.

No que diz respeito as plantas irrigadas com proporção 0:100 ($CE = 3,52 \text{ dS m}^{-1}$), o H_2O_2 não apresentou efeito positivo demonstrando reduções de 15,79% e 14,19% para MFPA e MFT, respectivamente. Plantas que sofrem por estresse salino, segundo Hao et al. (2021), apresentam sintomas de crescimento lento e inferior, altura da planta limitada, taxa de germinação reduzida e folhas murchas. Capitulino et al. (2023) analisando a cultura da gravioleira verificaram que o fator crescimento de planta é afetado negativamente pelo aumento da salinidade na água de irrigação, contudo, observaram que a aplicação foliar de peróxido em baixas concentrações pode reduzir os efeitos nocivos da salinidade na espécie.



Letras maiúsculas iguais não diferem entre si para as concentrações de peróxido de hidrogênio dentro de cada diluição da água produzida de petróleo pelo teste F ($p \leq 0,05$) e letras minúsculas iguais não diferem entre si para as diluições de água produzida dentro de cada diluição de peróxido de hidrogênio pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Dispersão nas barras representa o desvio padrão das médias ($n = 4$).

Figura 8. Massa fresca de parte aérea - MFPA (A) e total - MFT (B) de mudas de cajueiro aos sob irrigação com diluições de água produzida do petróleo e aplicação de peróxido de hidrogênio, 42 DAE.

A massa fresca das diferentes partes das mudas de cajueiro, independente da aplicação foliar de peróxido de hidrogênio, foi reduzida com o aumento da proporção de água produzida de petróleo na água de irrigação (Figuras 7 e 8). Nos tratamentos sem H_2O_2 , as reduções foram

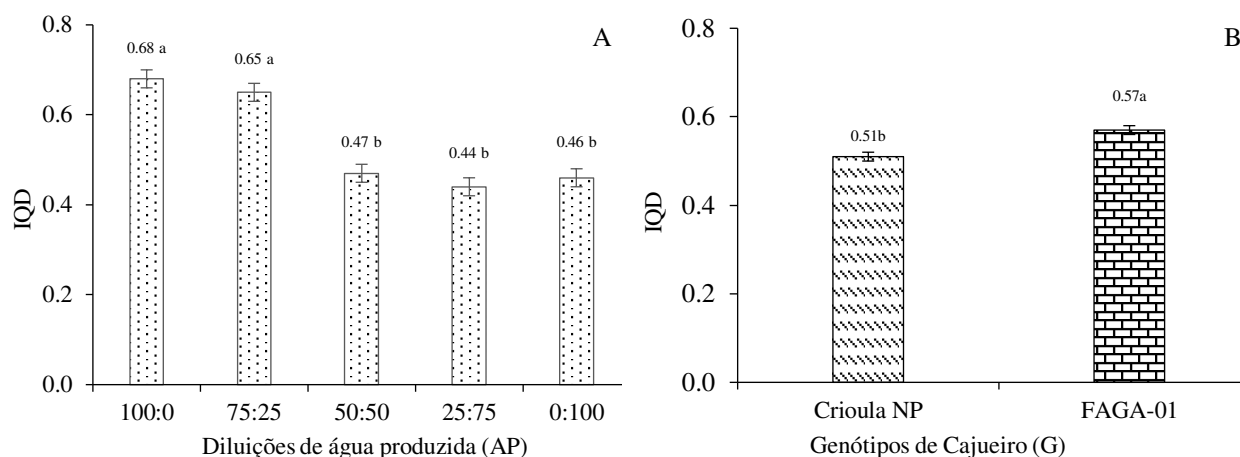
de 26,18%, 31,95%, 12,82%, 28,83% e 26,29%, respectivamente, nas MFF, MFC, MFR, MFPA e MFT. Enquanto as reduções das MFF, MFC, MFR, MFPA e MFT, nos tratamentos com aplicação de 15 mM de H_2O_2 , foram de 40,28%, 45,38%, 19,42 %, 42,82% e 38,68%. No entanto, exceto para MFPA e MFT, a proporção de 75:25 (ANS:AP) pode ser utilizado sem reduzir a biomassa fresca dos demais partes das mudas de cajueiro.

A água produzida, por conter elevados teores de sais ($CE = 3,52 \text{ dS m}^{-1}$), provocou estresse salino as mudas de cajueiro, inibindo a formação de biomassa. Em outras pesquisas foi comprovado que a salinidade da água de irrigação reduz a biomassa das mudas de cajueiro, como observado por Alencar et al., (2021) que verificaram reduções de 26,8% e 33,1% na massa seca da parte aérea e radicular quando irrigadas com água de 16 dS m^{-1} . Lima et al. (2020) relataram reduções de 49,02% na massa seca total das mudas de cajueiro irrigados com água salina ($3,6 \text{ dS m}^{-1}$). Os autores justificam que o estresse salino reduz a biomassa do cajueiro devido ao alto gasto de energia metabólica para a síntese de metabólitos do ajustamento osmótico e de proteção de estruturas celulares, mantendo a integridade das membranas e o transporte de íons para vários órgãos e dentro das células (SOUZA et al., 2019; SOLTABAYEVA et al., 2021; BALASUBRAMANIAM et al., 2023). Portanto, a diluição da AP em água não salina é uma estratégia viável para a agricultura em locais de escassez hídrica para aumentar o volume de água disponível para as culturas e reduzir a salinidade da água ao nível que não comprometa o crescimento e desenvolvimento das plantas (ECHCHELH et al., 2018; ECHCHELH et al., 2019; MILLER et al., 2019).

A qualidade de mudas de cajueiro, avaliada mediante o índice de qualidade de Dickson (IQD), foram maiores quando irrigadas com as águas AP-1(0,68) e AP-2 (0,65), que não diferiram estatisticamente entre si (Figura 9A). Os menores valores de IQD foram nas mudas irrigadas com as águas AP-3, AP-4 e AP-5, que, em relação ao tratamento controle, apresentaram perdas de 30,88%, 41,17% e 32,35%, respectivamente. Corroborando com estudos de Lima et al. (2020) que relataram que o aumento da salinidade da água de irrigação causou uma redução significativa no IQD de mudas de cajueiro anão precoce.

Em relação aos genótipos de cajueiro (Figura 9B), o exemplar FAGA-01 não diferiu estatisticamente do material Crioula NP. No entanto, mesmo as mudas de cajueiro submetidas a alta CEa ($3,52 \text{ dS m}^{-1}$) promovida pela AP, obteve-se o IQD bem acima do limite aceitável (0,2) pois, conforme Eloy et al. (2013), mudas que apresentam IQD superior a este índice são consideradas de boa qualidade e que estão aptas ao transplante. Lima et al. (2020), em estudos com a mesma espécie atingiram valores máximos de IQD com os clones Faga 11, Embrapa 51 e CCP 76, reforçando os resultados encontrados no presente trabalho.

Além disso, a diluição da água na proporção de 75:25 de ANS:AP (AP-2; CEa = 1,26 dS m⁻¹) pode ser uma alternativa para reduzir a salinidade da água e manter a qualidade das mudas de cajueiro, permitindo que a utilização de água do petróleo no setor agrícola seja viável e com baixo impacto ambiental (ECHCHELH et al., 2018; MILLER et al., 2019).



Letras minúsculas iguais não diferem entre si nas diluições da água produzida de petróleo pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Dispersão nas barras representa o desvio padrão das médias ($n = 4$).

Figura 9. Índice de qualidade de Dickson - IQD das mudas em função das diluições de água produzida do petróleo (A) e de genótipos (B), aos 42 DAE.

3.4. Conclusões

A diluição da água produzida de petróleo em 50% em água não salina (CE = 2,06 dS m⁻¹) foi um manejo viável e eficiente para produção de mudas de cajueiro com qualidade, promovendo maior eficiência fotossintética e crescimento das plantas

A utilização de água do petróleo em diluições de 25% ANS:75% AP e 100% AP inibe os processos fotossintéticos das plantas, comprometendo o crescimento e qualidade das mudas de cajueiro pelo excesso de sais. No entanto, as mudas do genótipo FAGA-01 apresentaram maior eficiência no uso da água e de crescimento em condições de estresse salino em comparação ao Crioula NP, que podem ser parâmetros importantes para a seleção de genótipos mais tolerantes a salinidade.

A aplicação exógena de peróxido de hidrogênio na concentração de 15 µM atenuou os efeitos danosos do estresse salino da água produzida do petróleo diluída em 50% e CE de 2,06 dS m⁻¹ e promoveu maior acúmulo de biomassa das mudas de cajueiro. No entanto, em baixas diluições de água produzida (AP-4 e AP-5), o peróxido de hidrogênio intensificou o efeito do estresse salino nas mudas e inibiu a produção de biomassa das mudas de cajueiro.

A água produzida do petróleo em diluições adequadas mostra-se uma alternativa viável e sustentável como fonte hídrica para a produção agrícola em regiões semiáridas, reduzindo o

impacto ambiental e a dependência de fontes hídricas de qualidade adequada para a agricultura.

3.5. Referências bibliográficas

- ABBAS, A. J.; GZAR, H. A.; RAHI, M. N. Oilfield-produced water characteristics and treatment technologies: a mini review. In: IOP Conference Series: **Materials Science and Engineering**, v. 1058, 2021.
- ALENCAR, M. L. M.; OLIVEIRA, A. B. de; ALVAREZ-PIZARRO, J. C.; MARQUES, E. C.; PRISCO, J. T.; GOMES-FILHO, E. Differential responses of dwarf cashew clones to salinity are associated to osmotic adjustment mechanisms and enzymatic antioxidative defense. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, p. 1-14, 2021.
- AL-GHOUTI, M. A.; AL-KAABI, M. A.; ASHFAQ, M. Y.; DA'NA, D. A. Produced water characteristics, treatment and reuse: A review. **Journal of Water Process Engineering**, v. 28, p. 222-239, 2019.
- ALHARBY, H. F.; COLMER, T. D.; BARRETT-LENNARD, E. G. Salinization of the soil solution decreases the further accumulation of salt in the root zone of the halophyte *Atriplex nummularia* Lindl. growing above shallow saline groundwater. **Plant, Cell & Environ**, v. 41, n. 1, p. 99-110, 2018.
- AL-JANABIA, A. M. I.; AL-DULAIMY, A. F. Z.; SEKHI, Y. S.; ALMOHAMMEDI, O. H. M.; AL-TAEY, D. K. A. Effect of Salt Stress on Growth and Yield of Plants: A Review. **IOP Conference Sereries: Earth and Environmental Science**, v. 1371, p. 1-14, 2024.
- ALMEIDA, F. A. G. Sucesso do cajueiro anão: clones de castanhas grandes e pesadas geneticamente desenvolvidos para a indústria. In: 9º Semana Internacional da Fruticultura. **Floricultura e Agroindústria**. 9. ed. Fortaleza: Instituto de Desenvolvimento da Fruticultura e Agroindústria, 2002.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AMAKIRI, K. T.; CANON, A. R.; MOLINARIM, M.; ANGELIS-DIMAKIS, A. Review of oilfield produced water treatment technologies. **Chemosphere**, v. 298, p. 1-20, 2022.
- ANDRADE, E. M. G.; LIMA, G. S.; LIMA, V. L. A.; SILVA, S. S.; GHEYI, H. R.; SILVA, A. A. R. Gas exchanges and growth of passion fruit under saline water irrigation and H₂O₂ application. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 12, p. 945-951, 2019.
- ARAÚJO JUNIOR, E. S.; SILVA, A. F.; MAIA, J. M.; SILVA, E. F.; JARDIM, A. M. R. F.; SANTOS, H. R. B.; SOUZA, C. A. V.; SIMÕES, A. N.; SOUZA, E.; FERREIRA-SILVA, S. L. Genotypic differences among scions and rootstocks involved with oxidative damage and ionic toxicity in cashew plants under Salinity. **Horticulturae**, v. 10, 2024.
- BAATH, G. S.; SHUKLA, M. K.; BOSLAND, P. W.; STEINER, R. L.; WALKER, S. J. Irrigation water salinity influences at various growth stages of *Capsicum annum*. **Agricultural Water Management**, v. 179, p. 246-253, 2016.
- BAGHERI, M.; GHOLAMI, M.; BANINASAB, B. Hydrogen peroxide-induced salt tolerance in relation to antioxidant systems in pistachio seedlings. **Scientia Horticulturae**, n. 243, p. 207-213, 2019.
- BALASUBRAMANIAM, T.; SHEN, G.; ESMAEILI, N.; ZHANG, H. Plants' Response Mechanisms to Salinity Stress. **Plants**, v. 12, 2023.
- BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas: noções básicas**. 2. ed. Jaboticabal: FUNEP, 2003. 41 p.

- BRITO, M. E. B.; SOARES, L. A. A.; SOARES FILHO, W. S.; FERNANDES, P. D.; SILVA, E. C. B.; SÁ, F. V. S.; SILVA, L. A. Emergence and morphophysiology of Sunki mandarin and other citrus genotypes seedlings under saline stress. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 16, n. 1, p. 1-15, 2018.
- CAPITULINO, J. D.; LIMA, G. S.; AZEVEDO, C. A. V.; SILVA, A. A. R.; ARRUDA, T. F. L.; SOARES, L. A. A.; GHEYI, H. R.; FERNANDES, P. D.; FARIAS, M. S. S.; SILVA, F. A.; DIAS, M. S. Influence of Foliar Application of Hydrogen Peroxide on Gas Exchange, Photochemical Efficiency, and Growth of Soursop under Salt Stress. **Plants**, v. 12, 2023.
- CAPITULINO, J. D.; LIMA, G. S.; AZEVEDO, C. A. V.; SILVA, A. A. R.; VELOSO, L. L. S. A.; FARIAS, M. S. S.; SOARES, L. A. A.; GHEYI, H. R.; LIMA, V. L. A. Gas exchange and growth of soursop under salt stress and H₂O₂ application methods. **Brazilian Journal of Biology**, v. 82, 2022.
- COLIN, L.; RUHNOW, F.; ZHU, J.K.; ZHAO, C.; PERSSON, S. The cell biology of primary cell walls during salt stress. **Plant Cell**, v. 35, p. 201-217, 2023.
- COSTA, D. O.; VALE, H. S. M.; BATISTA, R. O.; TRAVASSOS, K. D.; GURGEL, M. T.; LEMOS FILHO, L. C. A. Metal contents in soils irrigated with diluted treated produced water from oil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, p. 672–678, 2020.
- DALCHIAVON, F. C.; NEVES, G.; HAGA, K. I. Efeito de stress salino em sementes de *Phaseolus vulgaris*. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 39, n. 3, p. 404-412, 2016.
- DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **The Forest Chronicle**, v. 36, n. 01, p. 10-13, 1960.
- ECHCHELH, A.; HESS, T.; SAKRABANI, R. Reusing oil and gas produced water for irrigation of food crops in drylands. **Agricultural Water Management**, v. 206, p. 124–134, 2018.
- ECHCHELH, A.; HESS, T.; SAKRABANI, R.; PAZ, J. M.; VISCONTI, F. Assessing the environmental sustainability of irrigation with oil and gas produced water in drylands. **Agricultural Water Management**, v. 223, 2019.
- ELOY, E.; CARON, B. O.; SCHMIDT, D.; BEHLING, A.; SCHWERS, L.; ELLI, E. F. Avaliação da qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis* utilizando parâmetros morfológicos. **Floresta**, v. 43, n. 3, p. 373-384, 2013.
- FERREIRA, D. F. SISVAR: um sistema computacional de análise estatística. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2019.
- FIGUEREDO, K. S. L., MARTINEZ-HUITLE, C. A., TEIXEIRA, A. B. R., DE PINHO, A. L. S., VIVACQUA, C. A.; DA SILVA, D. R. Study of produced water using hydrochemistry and multivariate statistics in different production zones of mature fields in the Potiguar Basin–Brazil. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 116, p. 109-114, 2014.
- FUSARO, E. R.; FERRAZ, A. S. **Anuário estatístico da agricultura familiar**. 2. ed. Brasília: CONTAG. 2023.
- GOHARRIZI, K. J.; KARAMI, S.; GHANAEI, S. Hydrogen peroxide priming promotes salinity tolerance in plants—A comprehensive review. **Agronomy Journal**, v. 116, p. 612-629, 2024.
- HAO, S.; WANG, Y.; YAN, Y.; LIU, Y.; WANG, J.; CHEN, S. A Review on Plant Responses to Salt Stress and Their Mechanisms of Salt Resistance. **Horticulturae**, v. 7, n. 132, 2021.
- IQBAL, H.; YANING, C.; WAQAS, M.; RAZA, S. T.; SHAREEF, M.; AHMAD, Z. Salinity and exogenous H₂O₂ improve gas exchange, osmoregulation, and antioxidant metabolism in quinoa under drought stress. **Physiologia Plantarum**, v. 175, 2023.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola Municipal (PAM)**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html>. Acesso em: 13 set. 2024.

- LACERDA, C. F.; COSTA, R. N. T.; BEZERRA, M. A.; NEVES, A. L. R.; SOUSA, G. G.; GHEYI, H. R. Estratégias de manejo para uso de água salina na agricultura. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. de (Ed.). **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**. Fortaleza, INCTA Sal, p. 530, 2016.
- LESSA, C. I. N.; LACERDA, C. F.; CAJAZEIRAS, C. C. A.; NEVES, A. L. R.; LOPES, F. B.; SILVA, A. O.; SOUSA, H. C.; GHEYI, H. R.; NOGUEIRA, R. S.; LIMA, S. C. R. V.; COSTA, R. N. T.; SOUSA, C. G. Potential of Brackish Groundwater for Different Biosaline. **Agriculture**, v. 13, 2023.
- LI, Z.; ZHU, L.; ZHAO, F.; LI, J.; ZHANG, X.; KONG, X.; WU, H.; ZHANG, Z. Plant salinity stress response and nano-enabled plant salt tolerance. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, n. 1, 2022.
- LIANG, W.; MA, X.; WAN, P. & LIU, L. Plant salt-tolerance mechanism: A review. **Biochemical and biophysical research communications**, v. 495, n. 1, p. 286-291, 2018.
- LIMA, G. S. de.; SILVA, J. B. da.; SOUZA, L. P.; NOBRE, R. G.; SOARES, L. A. A.; GHEYI, H. R. Tolerance of precocious dwarf cashew clones to salt stress during rootstock formation stage. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 7, p. 474-481, 2020.
- LIMA, G. S. DE; PINHEIRO, F. W. A.; GHEYI, H. R.; SOARES, L. A. dos A.; SOUSA, P. F. DO N. & FERNANDES, P. D. Saline water irrigation strategies and potassium fertilization on physiology and fruit production of yellow passion fruit. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, p. 180-189, 2022.
- MATKOWSKI, H.; DASZKOWSKA-GOLEC, A. Update on stomata development and action under abiotic stress. **Frontiers in Plant Science**, 2023.
- MESQUITA, A., CAVALCANTI, J., CARDOSO, J., & BRAGA SOBRINHO, R. Ocorrência do escaravelho *Hilarianus* sp. (Coleoptera Scarabaeidae) em clones de cajueiro no nordeste do Brasil. **Congresso brasileiro de recursos genéticos**, v. 1, p. 196., 2010.
- MILLER, H.; TRIVEDI, P.; QIU, Y.; SEDLACKO, E. M.; HIGGINS, C. P.; BORCH, T. Food crop irrigation with oilfield-produced water suppresses plant immune response. **Environmental Science and Technology Letters**, v. 6, p. 656–661, 2019.
- MITCHELL, J. D.; PELL, S. K.; BACHELIER, J. B.; WARSCHESKY, E. J.; JOYCE, E. M.; CANADELL, L. C.; SILVA-LUZ, C. L.; COIFFARD, C. Neotropical Anacardiaceae (cashew family). **Brazilian Journal of Botany**, v. 45, p. 139-180, 2022.
- MUNIR, N.; HASNAIN, M.; ROESSNER, U.; ABIDEEN, Z. Strategies in improving plant salinity resistance and use of salinity resistant plants for economic Sustainability. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 52, n. 12, p. 2150-2196, 2022.
- NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. Ensaio em ambiente controlado. In: OLIVEIRA, A. J. (ed) **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília: Embrapa- SEA. p. 189-253, 1991.
- NUNES, E. M.; AZEVEDO, E. S. DA S.; QUEIROZ, D. K. A dinâmica regional dos royalties do petróleo no território rural Sertão Central Cabugi e Litoral Norte, Rio Grande do Norte. **Geosul**, v. 38, n. 87, p. 317-344, 2023.
- PAN, T.; LIU, M.; KRESLAVSKI, V.D.; ZHARMUKHAMEDOV, S.K.; NIE, C.; YU, M.; KUZNETSOV, V.V.; ALLAKHVERDIEV, S.I.; SHABALA, S. Non-stomatal limitation of photosynthesis by soil salinity. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 51, n. 8, p. 791-825, 2020.
- SANTOS, A. D. S.; ARAÚJO, R. H. C. R.; NOBRE, R. G.; SOUSA, V. D. O.; RODRIGUES, M. H. B. S.; FORMIGA, J. A.; ONIAS, E. A. Effect of hydrogen peroxide in the growth of yellow passion fruit seedlings under salinity stress. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, p. 151- 162, 2018.

- SANTOS, A.S.; ALMEIDA, J. F.; SILVA, M. S. da; NÓBREGA, J. S.; QUEIROGA, T. B. da; PEREIRA, J. A. R.; GOMES, F. A. L. The influence of H₂O₂ application methods on melon plants submitted to saline stress. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, p. 245, 2019.
- SEDLACKO, E. M.; JAHN, C. E.; HEUBERGER, A. L.; SINDT, N. M.; MILLER, H. M.; BORCH, T.; BLAINE, A. C.; CATH, T. Y.; HIGGINS, C. P. Potential for Beneficial Reuse of Oil-and-gas-derived Produced Water in Agriculture: Physiological and Morphological Responses in Spring Wheat (*Triticum Aestivum*). **Environmental Toxicology Chemistry**, v. 38, p. 1756–1769, 2019.
- SERRANO, L. A. L.; PESSOA, P. F. A. P. Aspectos econômicos da cultura do cajueiro. In: SERRANO, L. A. L. (org.). **Sistema de Produção do Caju**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica. 2016. p. 2-10.
- SILVA, E.M.; LIMA, G.S.; GHEYI, H.R.; NOBRE, R.G.; SÁ, F.V.S.; SOUZA, L.P. Growth and gas exchanges in soursop under irrigation with saline water and nitrogen sources. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 22, n. 11, p. 776-778, 2018.
- SILVA, P. C. C.; AZEVEDO NETO, A. D. de; GHEYI, R. H.; RIBAS, R. F.; COVA, A. M. W.; SILVA, C. R. dos R. Avaliação de métodos de aplicação de H₂O₂ para aclimação de plantas de girassol à salinidade. **Water Resources and Irrigation Management**, v. 8, p. 1- 4, 2019.
- SILVA, J. A. da; TAVARES, C. D. A.; MORAIS, S. M. de; OLIVEIRA, M. S. C. Caracterização química e fitoquímica, toxicidade e atividade antioxidante in vitro, de Clones de Pedúnculos de Caju (*Anacardium Occidentale* L.). **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 8, p. 79458-79470, 2021.
- SOLTABAYEVA, A.; ONGALTAY, A.; OMONDI, J. O.; SRIVASTAVA, S. Morphological, Physiological and Molecular Markers for Salt-Stressed Plants. **Plants**, v. 10, n. 243, 2021.
- SOUSA, A. E. C.; DE LACERDA, C. F.; GHEYI, H. R.; SOARES, F. A. L.; UYEDA, C. A. Teores de nutrientes foliares e respostas fisiológicas em pinhão manso submetido a estresse salino e adubação fosfatada. **Revista Caatinga**, v. 25, n. 2, p. 144-152, 2012.
- SOUSA, V. D.; CAPITULINO, J. D.; LIMA, G. S.; AZEVEDO, C. A. V.; SILVA, A. A. R.; ARRUDA, T. F. L. Eficiência fotoquímica de gravioleira sob estresse salino e aplicação foliar de peróxido de hidrogênio. In: VIII Inovagri International Meeting e XXXII CONIRD, 2023, Fortaleza. **Anais eletrônicos** [...] Fortaleza, 2023. Disponível em: https://icolibri.com.br/2023/public/__anais/TC0750034.pdf. Acesso em: 30 ago. 2024.
- SOUZA, N. C. S.; SILVEIRA, J. A. G.; SILVA, E. N.; NETO, M. C. L.; LIMA, C. S.; ARAGÃO, R. M.; FERREIRA-SILVA, S. L. High CO₂ favors ionic homeostasis, photoprotection, and lower photorespiration in salt-stressed cashew plants. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 21, n. 158, 2019.

4. ARTIGO 2: USO DA ÁGUA PRODUZIDA DO PETRÓLEO ASSOCIADA AO H₂O₂ NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE GENÓTIPOS DE CAJUEIRO

RESUMO

A falta de água impacta gravemente as regiões áridas e semiáridas, colocando em risco sua produção de alimentos, ao mesmo tempo que o setor petrolífero gera quantidades cada vez maiores de água produzida, parte da qual poderia ser reaproveitada para irrigação nessas áreas. O uso de águas residuárias, como a água produzida do petróleo, pode impactar as plantas com efeitos que variam entre espécies, genótipos, fases de crescimento, nível salino, uso de produtos atenuadores de estresse, dentre outros. Desta forma, objetivou-se com este trabalho avaliar os efeitos da água produzida do petróleo na irrigação de genótipos de cajueiro nas trocas gasosas, crescimento e qualidade de mudas associado a aplicação de peróxido de hidrogênio na fase de formação de porta enxertos. O experimento foi conduzido em blocos casualizados, no esquema fatorial $5 \times 2 \times 2$, com quatro repetições e uma planta por parcela. Os tratamentos foram constituídos de diluições de água produzida do petróleo sintética - AP em água não salina - ANS (T1: 100% ANS, T2: 75% ANS + 25% AP, T3: 50% ANS + 50% AP, T4: 25% ANS + 75% AP e T5: 100% AP), associados a concentrações de peróxido de hidrogênio (0 μM e 15 μM) e genótipos de cajueiro (Crioula NP e FAGA-01). O aumento na proporção de água produzida do petróleo na água de irrigação afeta negativamente o crescimento de mudas de cajueiro, no entanto é possível usar água salobra com CEa de até 2,06 dS m^{-1} (T3-50%ANS+50%AP) por proporcionar a formação de mudas de qualidade. A aplicação foliar de peróxido de hidrogênio na concentração de 15 μM não mitigou o estresse salino causado pelo uso da água produzida do petróleo na irrigação de mudas de cajueiro. Contudo, a concentração de 15 μM de H₂O₂ associada a irrigação com a mistura T-2 (75% de água não salina + 25% de água produzida do petróleo), promoveu o aumento na fitomassa seca de folhas de mudas de cajueiro. O genótipo de cajueiro FAGA-01 superou o Crioula NP em termos de fitomassa seca de raízes e na eficiência de uso da água e da carboxilação.

Palavras-chave: *Anacardium occidentale* L.; Estresse salino; Peróxido de hidrogênio.

PAPER 2: USE OF WATER PRODUCED FROM PETROLEUM ASSOCIATED WITH H₂O₂ IN THE PRODUCTION OF CASHEW GENOTYPE SEEDLINGS

ABSTRACT

The lack of water seriously impacts arid and semiarid regions, putting their food production at risk, while the oil sector generates increasing amounts of produced water, part of which could be reused for irrigation in these areas. The use of wastewater, such as water produced from oil, can impact plants with effects that vary between species, genotypes, growth stages, saline level, use of stress-mitigating products, among others. Thus, the objective of this study was to evaluate the effects of water produced from oil in the irrigation of cashew genotypes on gas exchange, growth and quality of seedlings associated with the application of hydrogen peroxide in the rootstock formation phase. The experiment was conducted in randomized blocks, in a 5 × 2 × 2 factorial scheme, with four replicates and one plant per plot. The treatments consisted of dilutions of synthetic petroleum produced water - PW in non-saline water - NSW (T1: 100% NSW, T2: 75% NSW + 25% PW, T3: 50% NSW + 50% PW, T4: 25% NSW + 75% PW and T5: 100% PW), associated with hydrogen peroxide concentrations (0 µM and 15 µM) and cashew genotypes (Crioula NP and FAGA-01). The increase in the proportion of water produced from petroleum in the irrigation water negatively affects the growth of cashew seedlings, however it is possible to use brackish water with CE_w of up to 2,06 dS m⁻¹ (T3-50% NSW + 50% PW) to provide the formation of quality seedlings. The foliar application of hydrogen peroxide at a concentration of 15 µM did not alleviate the saline stress caused by the use of water produced from petroleum in the irrigation of cashew seedlings. However, the concentration of 15 µM H₂O₂ associated with irrigation with the PW-2 mixture (75% non-saline water + 25% water produced from petroleum) promoted an increase in the dry mass of the leaves of the cashew seedlings. The cashew genotype FAGA-01 outperformed Crioula NP in terms of root dry mass and in the efficiency of water use and carboxylation.

Palavras-chave: *Anacardium occidentale* L., Saline stress, Hydrogen peroxide.

4.1. Introdução

O cajueiro (*Anacardium occidentale* L.) é uma planta nativa do Brasil, amplamente cultivada na região semiárida do Nordeste devido a sua adaptação às condições edafoclimáticas, destacando-se como importante fonte de emprego e renda (PAIVA, 2018). Por se tratar de uma planta frutífera, obtém-se diversos produtos a partir do cajueiro, destacando-se o pseudofruto que possui potencial para ser consumido *in natura*, utilizado na fabricação de doces, sucos, geleias, além da castanha que tem maior valor econômico agregado.

Apesar do protagonismo dessa espécie no Nordeste, as condições edafoclimáticas do setor semiárido podem tornar-se um fator limitante à produção agrícola (NÓBREGA et al., 2020), já que os volumes e distribuição pluviométrica associado as altas taxas de evapotranspiração favorecem o déficit hídrico e o aumento de sais nos mananciais (VELOSO et al., 2018). Outrossim, devido ao baixo volume de água doce disponível, que tende a limitar a expansão das áreas agrícolas, diversos produtores rurais estão recorrendo ao uso de águas de qualidade inferior, principalmente as águas oriundas de poços artesianos e freáticos, na irrigação de diversos cultivos (SEKHON et al., 2020), devido ao grande volume disponível nesses reservatórios.

Entre as águas disponíveis passíveis de uso na agricultura tem-se a água produzida do petróleo (AP), ou seja, um efluente gerado em elevado volume, proveniente da extração de óleo e gás natural. Visando a comercialização desses produtos, inicialmente é realizada a separação dos fluidos, em que a AP posteriormente separada pode ser liberada no meio ambiente, reinjetada no poço ou reutilizada, após o tratamento adequado. Atualmente, o estado do Rio Grande do Norte configura-se entre os maiores produtores de petróleo do país e possui, como consequência disso, grandes volumes de AP que necessitam de destinação (NUNES et al., 2023). Quando descartada de forma inadequada, essa água pode gerar problemas devido na sua composição conter elementos tóxicos ao meio ambiente, que podem causar impactos negativos no meio físico, biológico e humano (SILVA et al., 2022). Tendo em vista a disponibilidade deste efluente somado ao baixo índice de chuvas da região semiárida, a água produzida do petróleo apresenta-se como uma alternativa para o uso agrícola.

A composição da AP é bastante variável, no entanto, geralmente tem salinidade elevada que pode afetar os vegetais, mas as respostas das plantas aos seus efeitos podem variar de acordo com a espécie, o genótipo, o estágio fenológico, o tempo de exposição, dentre outros (NEGRÃO et al., 2017; LIMA et al., 2022). Dentre as culturas passíveis de serem testadas quando a irrigação com AP tem-se o cajueiro, uma fruteira que mesmo sendo adaptada às condições

edafoclimáticas do semiárido nordestino, tem comportamento variável quando exposta a irrigação com água salobra, sendo extremamente afetada na fase de germinação (VOIGT et al., 2009), no seu crescimento inicial (SOUZA et al., 2021) e na fase pós-enxertia (CARNEIRO et al., 2007), possuindo tolerância moderada à salinidade na fase adulta (SUASSUNA et al., 2016).

Neste contexto, devido a fragilidade de algumas espécies quando expostas a irrigação com água de qualidade inferior, o manejo cultural deve ser realizado para proporcionar resultados satisfatórios em termos de exploração agrícola e, dentre os fatores a serem estudados, citam-se o uso de diferentes materiais genéticos, a mistura de águas e a aplicação de produtos atenuadores do estresse salino, como é o caso do peróxido de hidrogênio (H_2O_2), um produto que dependendo da forma de aplicação e da concentração pode aumentar a tolerância das plantas a salinidade, pois, participa de diversos processos fisiológicos e bioquímicos. Além de desempenhar um papel importante no estímulo à atividade fotossintética e no crescimento de plantas em condições adversas (VELOSO et al., 2021).

O uso do H_2O_2 possibilita a aplicação de águas salinas na irrigação por meio da exposição prévia das plantas a algum tipo de estresse abiótico ou biótico. Esse processo interfere no metabolismo celular, promovendo a capacidade das plantas de desenvolver tolerância, mesmo em condições desfavoráveis. Esse processo ativa os mecanismos de defesa das plantas, auxiliando na adaptação a condições de estresse moderado e promovendo o acúmulo de sinais latentes em diferentes partes da planta (BAGHERI et al., 2019; SILVA et al., 2019).

Neste aspecto, esta pesquisa foi conduzida com o objetivo de avaliar a morfofisiologia de mudas de diferentes genótipos de cajueiro submetidas à irrigação com água produzida do petróleo sintética, associada à aplicação exógena de peróxido de hidrogênio.

4.2. Material e métodos

4.2.1. Localização do experimento

O presente estudo foi desenvolvido entre os meses de outubro a dezembro de 2023, em condições de ambiente protegido (telado) nas dependências da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), campus Caraúbas, município de Caraúbas, Rio Grande do Norte, cujas coordenadas geográficas são 05° 47' 33" S, 37° 33' 24" W e altitude média de 144 m. Segundo a classificação de Köppen o clima da região é do tipo BSh, ou seja, semiárido quente (ALVARES et al., 2013).

Durante o período analisado, de outubro a dezembro, o município registrou precipitação de 0 mm, marcando a fase conhecida como estiagem, típica do semiárido potiguar. Ainda segundo dados da Estação Meteorológica Automática (EMA) da UFERSA, campus Caraúbas, a umidade relativa do ar apresentou média de 60,26%, enquanto a temperatura média do ar foi de 28,83 °C.

4.2.2. Delineamento experimental, tratamentos e semeio das mudas de cajueiro

O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados e analisado em esquema fatorial $5 \times 2 \times 2$ com quatro repetições e uma planta por parcela, cujos tratamentos consistiram em cinco diluições de água produzida do petróleo sintética - AP em água não salina - ANS, sendo estas T1: 100% ANS, T2: 75% ANS + 25% AP, T3: 50% ANS + 50% AP, T4: 25% ANS + 75% AP e T5: 100% AP, associados a duas concentrações de peróxido de hidrogênio - H_2O_2 (0 μM e 15 μM) e dois genótipos de cajueiro - G (Crioula NP e FAGA-01). A água não salina foi proveniente de poço artesiano gerenciado pela Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN).

O desenvolvimento do cajueiro pode ser prejudicado pela salinidade, conforme destacado por Alencar et al. (2021), com uma inibição significativa do crescimento observada a partir de uma condutividade elétrica da água (CEa) de 1,58 dS m^{-1} . No entanto, essa sensibilidade pode variar dependendo de diversos fatores, incluindo os genótipos (LIMA et al., 2020). Para tanto, os diferentes tratamentos referentes à diluição da AP, foram preparados considerando a indicação da sensibilidade da cultura aos sais e, após as diluições, tiveram as seguintes CEa (T1 - 0,47 dS m^{-1} , T2 - 1,26 dS m^{-1} , T3 - 2,06 dS m^{-1} , T4 - 2,63 dS m^{-1} e T5 - 3,52 dS m^{-1}) e pH (T1 - 7,11; T2 - 7,43; T3 - 7,68; T4 - 7,75 e T5 - 7,79).

Com base no trabalho de Sousa et al. (2023) em estudo com a cultura da gravioleira – *Annona muricata*, em virtude da escassez de experimentos com a cultura do cajueiro envolvendo a aplicação de peróxido de hidrogênio, as diferentes concentrações de H_2O_2 foram selecionadas. As concentrações foram preparadas a partir da diluição da solução de peróxido de hidrogênio 1 M em água destilada.

Os materiais genéticos de cajueiro avaliados para a produção de mudas foram os clones de cajueiro anão-precoce “FAGA-01”, recomendado para cultivo em sequeiro devido à sua alta produtividade e características como castanhas grandes e elevada massa (ALMEIDA, 2002); e um material crioulo, originário do Município de Severiano Melo, Rio Grande do Norte, Brasil, conhecido pelos produtores como “Crioula NP”. Os materiais considerados “crioulos”

apresentam vantagens como alta adaptação às condições ambientais locais, crescimento rápido e elevada produção de castanhas (MESQUITA et al., 2010).

A água produzida do petróleo utilizada no experimento foi preparada com base na composição média das AP da região da Bacia Potiguar, conforme descrito por Figueredo et al. (2014), utilizando reagentes da determinação da quantidade necessária (Tabela 1).

Tabela 1. Composição química média da água produzida do petróleo (AP) encontrada nos poços da Bacia Potiguar e os reagentes e quantitativos utilizados para produção da AP sintética.

Composição química da AP	Média (mg L ⁻¹)	Reagentes utilizados na composição da AP sintética	Quantitativo de reagentes (g 1000L ⁻¹)
Alumínio	0,13	Cloreto de alumínio	1,162
Bário	0,84	Boráx	3,88
Boro	0,44	Ácido bórico	2,519
Cálcio	169,87	Sulfato de cálcio	55,89
Cloreto	687,47	Cloreto de cálcio	425,74
Ferro	0,24	Cloreto de ferro	0,695
Magnésio	65,76	Cloreto de magnésio	557,05
Manganês	0,19	Sulfato de manganês	0,522
Potássio	47,62	Cloreto de potássio	89,46
Sódio	242,07	Cloreto de sódio	609,5
Sulfato	39,94	Sulfato de zinco	0,222
Zinco	0,09		

4.2.3. Produção das mudas e aplicação dos tratamentos

As mudas de cajueiro foram cultivadas em sacolas plásticas de polietileno com capacidade de 1150 mL, contendo furos na parte inferior para permitir a drenagem livre da água. As sacolas foram preenchidas com solo franco-arenoso coletado na camada de 0-30 cm, representativo das áreas agrícolas do Município de Caraúbas – RN e adicionado 5% de esterco bovino curtido em base ao peso. As sacolas foram dispostas em estrados de madeira a 20 cm de altura. Para o semeio, utilizou-se uma semente (castanha) por sacola, posicionada verticalmente, com o ponto de inserção da castanha no pedúnculo voltado para cima e a uma profundidade de aproximadamente 1 cm. Antes do semeio, adicionou-se água em cada sacola para elevar a umidade do substrato ao ponto de capacidade de campo, utilizando água não salina, proveniente de abastecimento local, com condutividade elétrica (CEa) de 0,47 dS m⁻¹. A irrigação com essa água foi mantida até os 16 dias após a emergência das plântulas (DAE).

As plântulas emergiram, em média, 17 dias após o semeio (DAS). A aplicação do tratamento com as diferentes diluições da água produzida do petróleo foi iniciada após esse período. As irrigações eram realizadas diariamente, no início da manhã e no final da tarde, de

forma manual, utilizando uma proveta graduada. Em cada sacola plástica, aplicou-se um volume de água suficiente para manter a umidade do solo próxima à capacidade de campo. O volume aplicado foi determinado com base na necessidade hídrica das plantas, estimada pelo balanço hídrico, que consistiu na subtração do volume drenado do volume aplicado na irrigação anterior, acrescido de uma fração de lixiviação de 0,10. Para esse processo, foram utilizadas 30 sacolas, selecionadas aleatoriamente, nas quais foram acoplados coletores.

As concentrações de H_2O_2 foram aplicadas em quatro momentos distintos, com intervalos de oito dias entre cada aplicação. A primeira aplicação ocorreu três dias antes do início da irrigação com a água produzida (AP), aos 14 dias após a emergência (DAE). As aplicações foram realizadas no final da tarde, nas faces abaxial e adaxial das folhas, utilizando-se um borrifador para garantir o molhamento completo. Durante o ciclo das plantas não foram realizados tratamentos fitossanitários nas mudas de cajueiro. A adubação nitrogenada foi aplicada aos 37 DAE, diluindo-se 355,2 g de ureia em 20 L de água, sendo colocado 100 mL por sacola, conforme indicação para cultura (NOVAIS et al., 1991).

4.2.4. Variáveis analisadas

O crescimento das mudas de cajueiro foi avaliado aos 23 e 42 DAE, através da determinação do número de folhas (NF), por meio da contagem simples de folhas verdes com o limbo foliar totalmente aberto, o diâmetro de caule (DC), utilizando-se um paquímetro digital e determinado a 3 cm do colo das plantas, da altura de planta (APL), medido através da distância entre o colo e o ponto de inserção da folha mais nova em cm, e a área foliar (AF) determinada de acordo com Cavalcante et al. (2011):

$$AF = 5,71 + 0,647 X$$

Em que:

AF - Área foliar (cm^2);

X - Produto do comprimento pela largura das folhas (cm)

As relações de eficiência instantânea no uso da água - $EiUA (A/E)$ [$(\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}) (mol\ H_2O\ m^{-2}\ s^{-1})^{-1}$] e eficiência instantânea de carboxilação - $EiCi (A/Ci)$ [$(\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}) (\mu mol\ mol^{-1})^{-1}$] foram determinadas a partir das variáveis de trocas gasosas, sendo elas a taxa de transpiração foliar - E ($mol\ de\ H_2O\ m^{-2}\ s^{-1}$), concentração intercelular de CO_2 - Ci ($\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$), condutância estomática - gs ($mol\ de\ H_2O\ m^{-2}\ s^{-1}$) e a taxa de assimilação de CO_2 - A (μmol

$\text{CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). As trocas gasosas foram determinadas utilizando um aparelho de análise de gás infravermelho (IRGA), modelo LCPro+. As medições foram realizadas entre 7:00h e 9:00h da manhã, em folhas maduras e totalmente expandidas, com o auxílio de uma fonte de luz artificial ajustada para uma intensidade de $1200 \text{ MJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (ALENCAR et al., 2021) e CO_2 captado da atmosfera a uma altura de 2,5 metros.

Aos 42 DAE, para determinação da massa seca de folhas (MSF), de caule (MSC), das raízes (MSR), da parte aérea (MSPA = MFF + MSC) e a massa seca total por planta (MST = MSPA + MSR), as plantas foram cortadas ao nível do solo, separando-se suas diferentes partes (raízes, caule e folhas). Essas partes foram identificadas, acondicionadas em sacos de papel e pesadas em balança analítica para determinar a massa fresca (MFF, MFC, MFR, MFPA, MFT). Posteriormente, o material foi seco em estufa com circulação forçada de ar a 65°C até a obtenção das massas secas. A partir dos dados foi também determinada a relação raiz / parte aérea ($R / PA = \text{MSPA} / \text{MSR}$).

A qualidade das mudas de cajueiro foi determinada através do índice de qualidade de Dickson (IQD), por meio da equação 1, conforme Dickson et al. (1960):

$$\text{IQD} = [\text{MST} / (\text{APL}/\text{DC}) + (\text{MSPA}/\text{MSR})] \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

MST = massa seca total de planta;

APL = altura de planta;

DC = diâmetro de caule;

MSPA = massa seca de parte aérea; e

MSR = massa seca de raiz (g)

4.2.5. Análise estatística

Antes da análise estatística, verificou-se a homogeneidade e normalidade dos dados por meio do teste de Shapiro-Wilk. As médias das variáveis foram submetidas à análise de variância utilizando o teste F ($p \leq 0,05$). Posteriormente, as médias referentes aos genótipos e concentrações foram comparadas pelo teste F ($p \leq 0,05$), adequado quando há apenas dois fatores na fonte de variação, enquanto as diluições da água produzida do petróleo foram

avaliadas pelo teste de Tukey (1% e 5% de probabilidade). A análise estatística foi realizada no software SISVAR versão 5.6 (FERREIRA, 2019).

4.3. Resultados e discussão

Houve efeito significativo apenas entre as diluições de água produzida do petróleo sobre o número de folhas (NF), o diâmetro do caule (DC), a altura de planta (APL) e a área foliar (AF) de mudas de cajueiro (Tabela 2).

Tabela 2. Resumo da análise de variância, pelos valores do quadrado médio, referente a número de folhas (NF), diâmetro de caule (DC), altura de planta (APL) e área foliar (AF) das mudas de genótipos (G) de cajueiro sob irrigação com diluições de água produzida do petróleo (AP) e aplicação foliar de concentrações de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), aos 42 dias após a emergência (DAE).

Fonte de Variação	Quadrados Médios			
	NF	DC	APL	AF
Água produzida (AP)	21,837**	0,998**	76,702**	24733,644**
Peróxido de hidrogênio (H_2O_2)	0,0045 ^{ns}	0,0000 ^{ns}	11,935 ^{ns}	1821,663 ^{ns}
Genótipos (G)	0,2645 ^{ns}	1,044 ^{ns}	4,186 ^{ns}	1301,449 ^{ns}
Interação (AP x H_2O_2)	1,797 ^{ns}	0,063 ^{ns}	6,599 ^{ns}	2155,637 ^{ns}
Interação (AP x G)	1,725 ^{ns}	0,084 ^{ns}	4,216 ^{ns}	3423,722 ^{ns}
Interação (H_2O_2 x G)	1,250 ^{ns}	0,415 ^{ns}	4,371 ^{ns}	4643,476 ^{ns}
Interação (AP x H_2O_2 x G)	0,765 ^{ns}	0,371 ^{ns}	9,485 ^{ns}	4501,702 ^{ns}
Blocos	2,326 ^{ns}	0,113 ^{ns}	7,313 ^{ns}	30608,987**
CV (%)	9,08	6,17	8,05	15,76

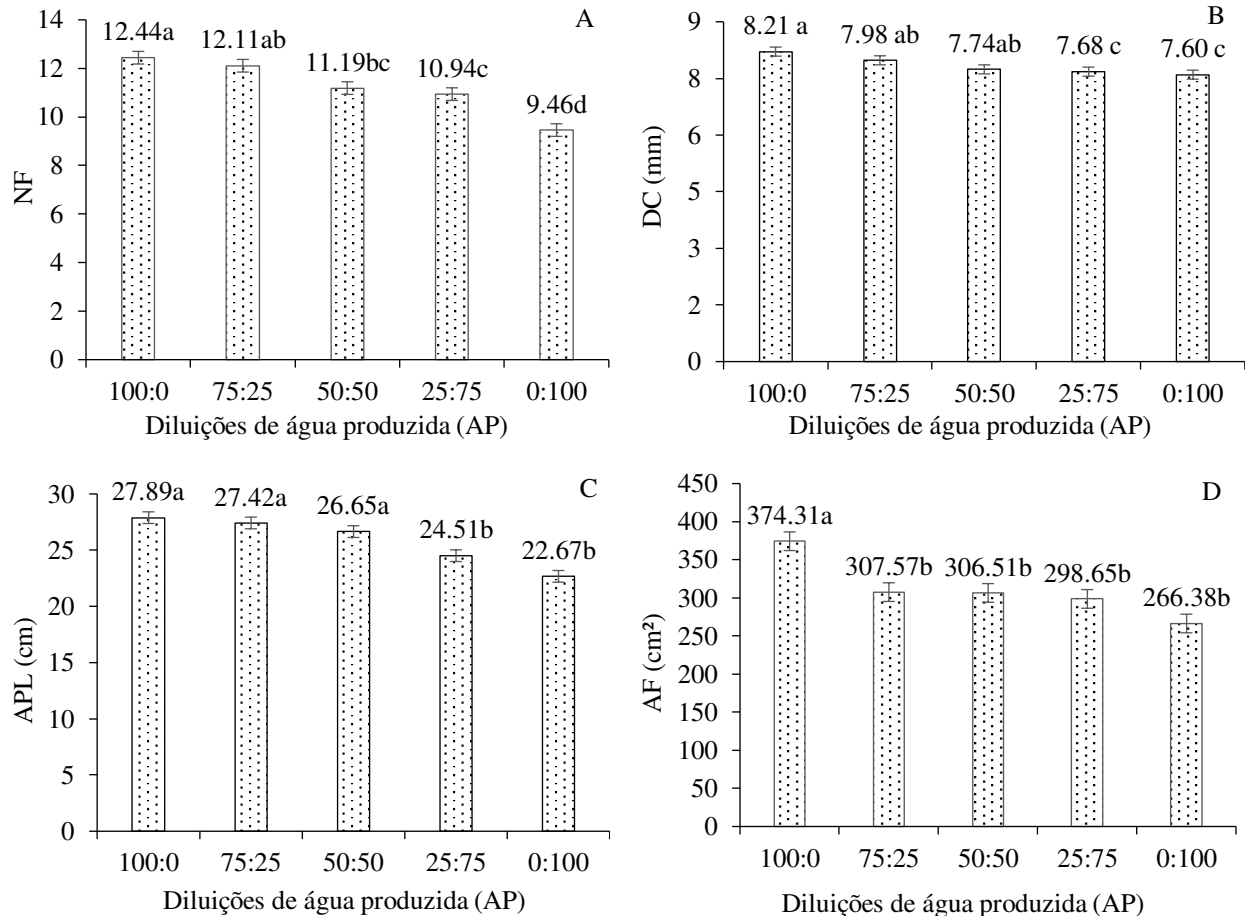
ns, **, * respectivamente não significativos, significativo a $p < 0,01$ e significativo a $p < 0,05$; CV= coeficiente de variação.

As variáveis NF, DC, APL e AF foram afetadas negativamente pela salinidade crescente da água de irrigação, ou seja, em função da maior quantidade de AP diluída em água não salina e, de acordo com os testes de comparação de médias destas variáveis, os maiores valores, 12,44 folhas (NF - Figura 1A), 8,21 mm (DC - Figura 1B); 27,89 cm (APL - Figura 1C) e 374,31 cm² (AF - Figura 1D), respectivamente, foram obtidos em plantas cultivadas sob água de menor salinidade (T1: 100%ANS), ocorrendo redução de 23,95% para NF, 7,43% para DC, 18,72% para APL e 28,91% para AF, nas plantas irrigadas com a maior salinidade (T5: 100%AP) em relação a menor.

Resultados semelhantes foram encontrados por Alencar et al. (2021), em estudos com clones de cajueiro, onde o crescimento e o desenvolvimento foram afetados pelo incremento da salinidade no meio de cultura, com a área foliar apresentando danos evidentes apenas quando as plantas foram submetidas a maior salinidade (16 dS m⁻¹). As mudas cultivadas nessas condições tiveram seus valores médios de AF reduzidos em 41,2% quando comparados ao tratamento controle (0 dS m⁻¹).

Denota-se que essas reduções acontecem, pois, em condições de salinidade elevada, ocorre a diminuição do potencial osmótico do solo, que reduz a disponibilidade de água para as plantas (SILVA et al., 2021) e, como resposta, as raízes sintetizam e transportam ácido abscísico (ABA) para as folhas, promovendo o fechamento dos estômatos (PACHECO et al., 2021) e limitando a entrada de CO₂, essencial para fotossíntese (ANDRADE et al., 2019) e consequentemente, a plantas tem seu crescimento prejudicado (LIN et al., 2022). O conhecimento sobre características como o diâmetro do caule para a produção de mudas, bem como as diferenças dessas medidas entre os genótipos de cajueiro, possibilita uma melhor tomada de decisão em relação ao momento certo da enxertia, por exemplo, já que aquelas plantas que apresentam maior diâmetro do caule podem ser enxertadas de maneira mais precoce.

Apesar dos menores valores obtidos no crescimento das plantas terem ocorrido quando irrigadas com 100% de água produzida do petróleo (T5), verifica-se que quando as plantas estavam sob a T3 (50% ANS + 50% AP) houve redução média de 10,1% (NF), 4,5% (APL) e 18,1% (AF), ou seja, um decréscimo que não foi tão expressivo e que possibilita o uso desta água na produção das mudas.



Letras maiúsculas iguais não diferem entre si nas diluições da água produzida do petróleo pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$) e letras minúsculas iguais não diferem entre si para os genótipos de cajueiro pelo teste F ($p \leq 0,05$). Dispersão nas barras representa o desvio padrão das médias ($n = 4$).

Figura 1. Número de folhas - NF (A), diâmetro do caule - DC (B), altura de plantas - APL (C) e área foliar - AF (D) das mudas de cajueiro em função das diluições de água produzida do petróleo, aos 42 DAE.

Aferiu-se, por meio do resumo da análise de variância (Tabela 3), efeito significativo isolado das diluições de água produzida do petróleo sobre a massa seca de folha (MSF), da de caule (MSC), de raízes (MSR), da parte aérea (MSPA) e seca total (MST) de mudas de cajueiro e, das concentrações de H_2O_2 e de genótipos de cajueiro sobre a MSR.

Tabela 3. Resumo da análise de variância, pelos valores do quadrado médio, referente a massa seca de folha (MSF), de caule (MSC), de raízes (MSR), da parte aérea (MSPA) e seca total (MST) das mudas de genótipos (G) de cajueiro sob irrigação com diluições de água produzida do petróleo (AP) e aplicação foliar de concentrações de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), aos 42 dias após a emergência (DAE).

Fonte de Variação	Quadrados Médios				
	MSF	MSC	MSR	MSPA	MST
Água produzida (AP)	6,329**	1,233**	0,494**	12,354**	17,462**
Peróxido de hidrogênio (H_2O_2)	0,086 ^{ns}	0,057 ^{ns}	0,084 ^{ns}	0,021 ^{ns}	0,013 ^{ns}
Genótipos (G)	0,003 ^{ns}	0,083 ^{ns}	0,324**	0,062 ^{ns}	0,616 ^{ns}
Interação (AP x H_2O_2)	0,295 ^{ns}	0,095 ^{ns}	0,023 ^{ns}	0,361 ^{ns}	0,268 ^{ns}
Interação (AP x G)	0,128 ^{ns}	0,137 ^{ns}	0,032 ^{ns}	0,389 ^{ns}	0,474 ^{ns}
Interação (H_2O_2 x G)	0,145 ^{ns}	0,212 ^{ns}	0,003 ^{ns}	0,000 ^{ns}	0,009 ^{ns}
Interação (AP x H_2O_2 x G)	0,123 ^{ns}	0,049 ^{ns}	0,049 ^{ns}	0,197 ^{ns}	0,396 ^{ns}
Blocos	0,525*	0,382*	0,162**	1,704**	2,750**
CV (%)	20,51	27,06	20,38	19,94	17,14

ns, **, * respectivamente não significativos, significativo a $p < 0,01$ e significativo a $p < 0,05$; CV= coeficiente de variação.

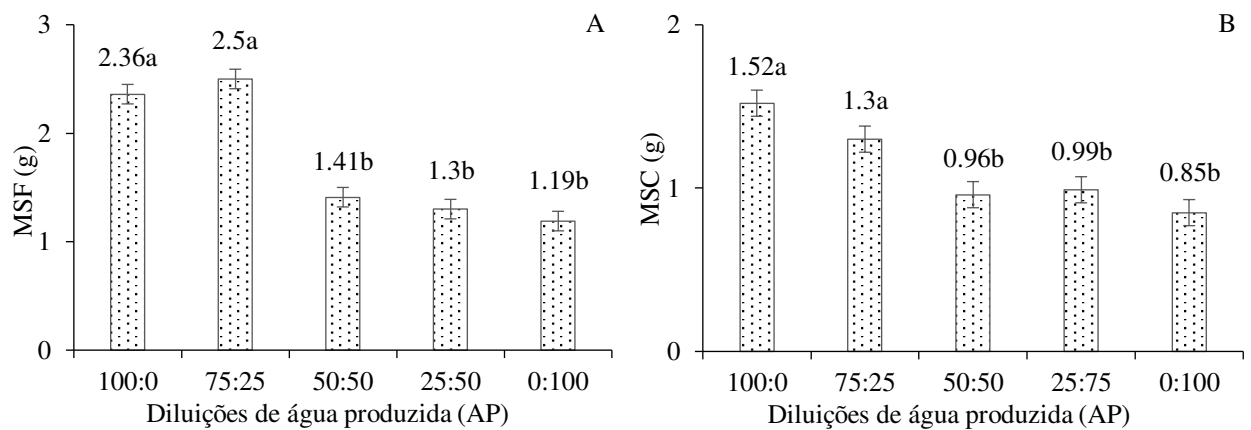
A massa seca de folhas e de caule foi significativamente afetada pela água de irrigação e conforme testes de médias (Figura 2A e 2B), ocorreu reduções na ordem de 49,58% (MSF) e de 44,08% (MSC) quando as plantas estavam sob irrigação com água de salinidade $3,52 \text{ dS m}^{-1}$ (T5-100%AP) em comparação as plantas sob T1-100%ANS (CEa $0,47 \text{ dS m}^{-1}$), denotando que sob maior salinidade, a planta busca estabelecer uma nova homeostase, ajustando o seu crescimento pois, sob menor disponibilidade hídrica a taxa fotossintética e as reações bioquímicas são reduzidas, resultando em menor crescimento (SILVEIRA et al., 2016), como observado neste estudo para NF, DC, APL e AF (Figura 1).

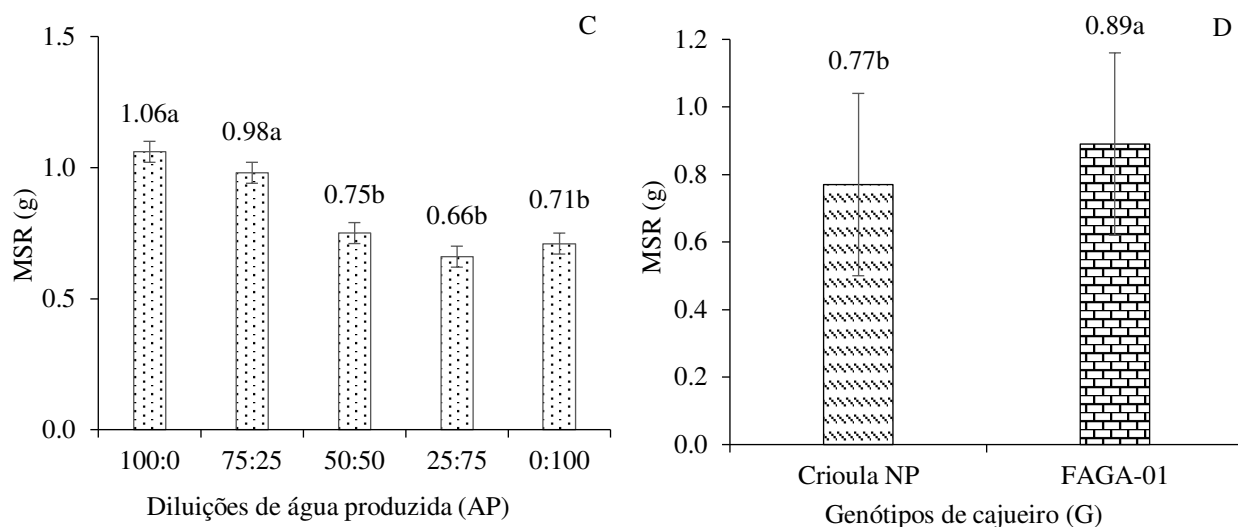
A massa seca de raízes foi afetada pela diluição de AP e conforme teste médias constata-se (Figura 2C) que o maior valor (1,06 g) foi obtido em plantas irrigadas com T1 (100%ANS) que não diferiu estatisticamente das plantas sob a diluição 75%ANS+25%AP (T2) e, superando as plantas sob T4 (25%ANS+75%AP) em 37,74% que não diferiram de T3 e T5, indicando que possivelmente ocorreu redução do potencial osmótico do solo devido a maior quantidade de

sais presente nas águas contendo proporção elevada de AP e consequentemente, tenha promovido alterações na absorção e utilização de nutrientes, assim como, ocasionado toxicidade iônica (BADER et al., 2015; MUNNS e GILLIHAM, 2015) ao ponto de afetar a produção de folhas (Figura 2A), caule (Figura 2B) e raízes (Figura 2C).

Os distintos genótipos de cajueiro diferiram em termos de MSR (Figura 2D) cujo maior valor (0,89 g) foi obtido com o FAGA-01 que superou a do Crioula NP em 15,58%, denotando que tais resultados podem ser atribuídos a variabilidade genética dos dois materiais estudados pois, Souza et al. (2020), analisando os genótipos de cajueiro Crioulo, FAGA-11, CCP76 e Embrapa 51, encontraram maior MSR no genótipo Crioulo quando comparado aos demais, diferindo do presente estudo, em que o genótipo Crioula NP não se destacou.

Alencar et al. (2021) avaliando os efeitos da salinidade em clones de cajueiro, alcançaram resultados que corroboram com o estudo presente onde, em relação à MSR, apenas as mudas dos clones CCP 06 foram afetadas pela salinidade de maneira significativa, apresentando reduções de 33,1%, quando comparadas ao controle. A diminuição do desenvolvimento é um dos principais impactos da salinidade sobre as plantas. Esse fenômeno ocorre tanto em espécies glicófitas quanto em halófitas, porém as primeiras sofrem efeitos mesmo em condições de baixa concentração salina (SRINIVAS et al., 2018).



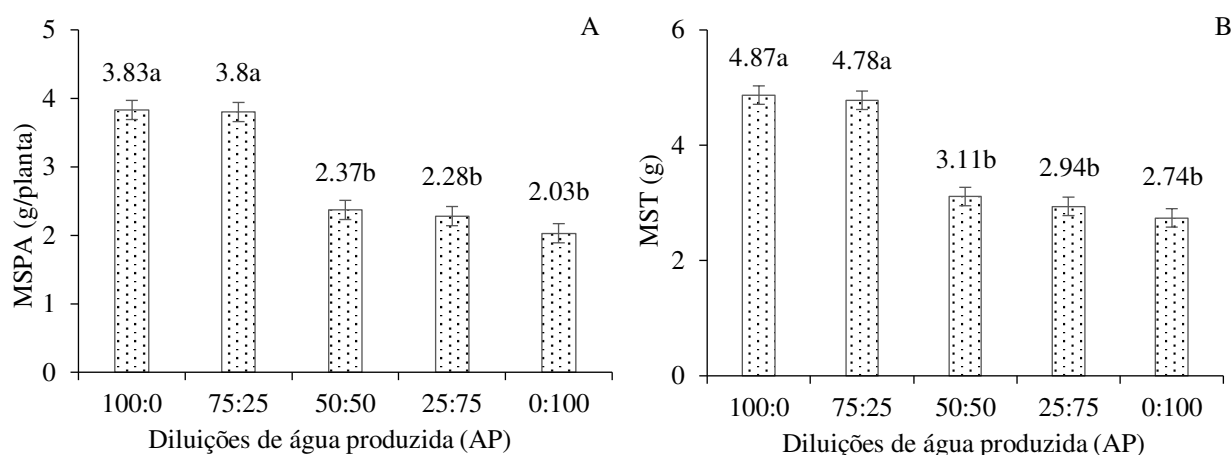


Letras maiúsculas iguais não diferem entre si nas diluições da água produzida do petróleo pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$) e letras minúsculas iguais não diferem entre si para os genótipos de cajueiro pelo teste F ($p \leq 0,05$). Dispersão nas barras representa o desvio padrão das médias ($n = 4$).

Figura 2. Massa seca de folha - MSF (A), de caule - MSC (C) e de raízes - MSR (C) em função das diluições de água produzida do petróleo; MSR em função de distintos genótipos de cajueiro (D) das mudas de cajueiro, aos 42 DAE.

Corroborando com os resultados obtidos para MSF, MSC e MSR (Figura 2), os maiores valores de MSPA e a MST (Figura 3A e 3B) foram obtidos em plantas sob irrigação com as diluições de AP contendo menor índice salino (T1-100%ANS e T2-75%ANS+25%AP) que não diferiram estatisticamente, entretanto, superaram as plantas que estavam sob maior salinidade (T5 - $3,52 \text{ dS m}^{-1}$) em 47,0% (MSPA) e 43,7% (MST), indicando que o aumento da concentração salina ao longo do tempo reduz a produção de massa vegetal (NOGUEIRA et al., 2020; SENA et al., 2018) pois, a salinidade é determinante no comprometimento da absorção de água, causando danos às células e tecidos das plantas, o que diminui os processos fisiológicos e metabólicos, resultando em menor taxa de crescimento e acúmulo de matéria seca (KIROVA e KOCHEVA, 2021).

Em estudos realizados com clones de cajueiro, Alencar et al. (2021) obtiveram resultados semelhantes para a MSPA, comprometendo de maneira correspondente tanto CCP 06 quanto BRS 189, com reduções médias de 26,8% para a massa seca de parte aérea, com a presença de danos sobressaídos às mudas.



Letras maiúsculas iguais não diferem entre si nas diluições da água produzida do petróleo pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$) e letras minúsculas iguais não diferem entre si para os genótipos de cajueiro pelo teste F ($p \leq 0,05$). Dispersão nas barras representa o desvio padrão das médias ($n = 4$).

Figura 3. Massa seca de parte aérea - MSPA (A) e total - MST (B) de mudas de cajueiro em função das diluições de água produzida do petróleo, aos 42 DAE.

Segundo o resumo da análise de variância (Tabela 4) houve efeito significativo das diluições de água produzida do petróleo apenas sobre a relação raiz / parte aérea (R/PA) de mudas de cajueiro. Já os genótipos de cajueiro diferiram estatisticamente em termos de eficiência instantânea de carboxilação (EiCi) de mudas de genótipos de cajueiro.

Tabela 4. Resumo da análise de variância, pelos valores do quadrado médio, referente a relação raiz / parte aérea (R/PA) e eficiência instantânea de carboxilação (EiCi) de mudas de genótipos (G) de cajueiro sob irrigação com diluições de água produzida do petróleo (AP) e aplicação foliar de concentrações de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), aos 42 dias após a emergência (DAE).

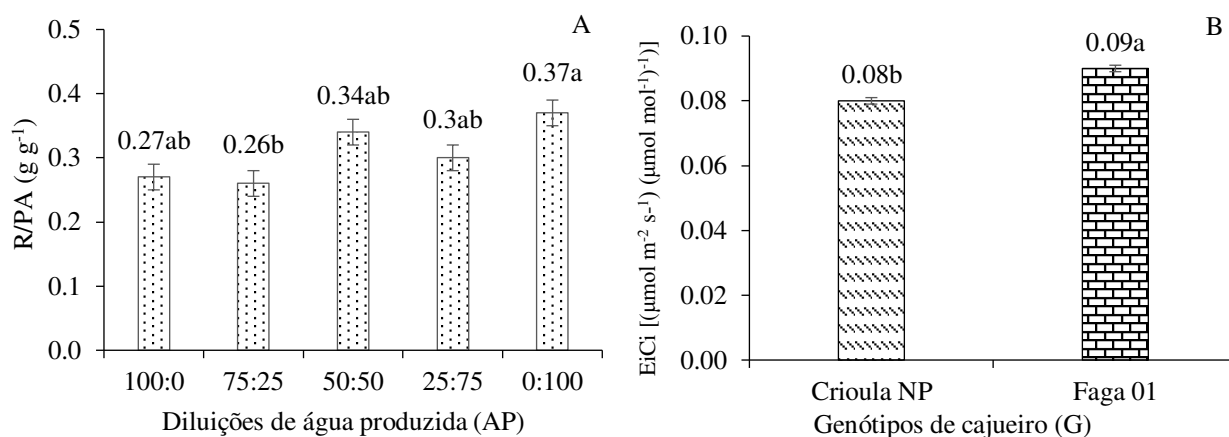
Fonte de variação	Quadrados Médios	
	R / PA	EiCi
Água produzida (AP)	0,031**	0,000 ^{ns}
Peróxido de hidrogênio (H_2O_2)	0,004 ^{ns}	0,001 ^{ns}
Genótipos (G)	0,018 ^{ns}	0,001*
Interação (AP x H_2O_2)	0,016 ^{ns}	0,000 ^{ns}
Interação (AP x G)	0,004 ^{ns}	0,000 ^{ns}
Interação (H_2O_2 x G)	0,001 ^{ns}	0,000 ^{ns}
Interação (AP x H_2O_2 x G)	0,007 ^{ns}	0,000 ^{ns}
Blocos	0,012 ^{ns}	0,000 ^{ns}
CV (%)	29,98	19,19

ns, **, * respectivamente não significativos, significativo a $p < 0,01$ e significativo a $p < 0,05$; CV= coeficiente de variação.

A R/PA foi afetada pelas diluições de AP e conforme o teste de comparação de médias (Figura 4A), vê-se o maior valor (0,37 g) em plantas irrigadas com 100% de AP (T5), ou seja, em plantas sob maior salinidade da água, indicando maior translocação de fotoassimilados para as raízes e favorecendo a estabilização da planta no solo, contribuindo com a qualidade das mudas (ECHER et al., 2006).

Os genótipos de cajueiro divergiram significativamente em termos de eficiência instantânea de carboxilação e, de acordo com os testes de média (Figura 4B), verifica-se que o genótipo FAGA-01 foi mais eficiente e superou o Crioula NP em 11,11%, denotando que a variabilidade de genes dos distintos genótipos de cajueiro promove resultados distintos em termos de CO_2 .

Capitulino et al. (2022), avaliando a salinidade da água de irrigação em plantas de graviola, constataram que o estresse salino devido a CE mais alta, inibiu a EiCi da graviola aos 145 dias após o semeio, com reduções a partir das equações de regressão de 8,50%. O estresse salino em plantas causa perdas significativas no funcionamento do fotossistema devido à degradação das proteínas envolvidas na atividade fotossintética (CAPITULINO et al., 2023).



Letras maiúsculas iguais não diferem entre si nas diluições da água produzida do petróleo pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$) e letras minúsculas iguais não diferem entre si para os genótipos de cajueiro pelo teste F ($p \leq 0,05$). Dispersão nas barras representa o desvio padrão das médias ($n = 4$).

Figura 4. Relação raiz/parte aérea - R/PA (A) em função das diluições de água produzida do petróleo e eficiência instantânea de carboxilação - EiCi (B) em função dos distintos genótipos das mudas de cajueiro, aos 42 DAE.

4.4. Conclusões

O incremento nos níveis de salinidade da água de irrigação promovido pela água produzida do petróleo afeta negativamente o crescimento de mudas de cajueiro, no entanto é possível usar água salobra com CEa de até $2,06 \text{ dS m}^{-1}$ (T3-50%ANS+50%AP) por proporcionar a formação de mudas de qualidade.

A aplicação exógena de peróxido de hidrogênio não mitiga os impactos do estresse salino causado pelo uso da água produzida do petróleo na irrigação de mudas de cajueiro. Contudo, a concentração de $15 \mu\text{M}$ de H_2O_2 associada a irrigação com a mistura T2 (75% de água de não salina + 25% de água produzida do petróleo), promoveu o aumento na fitomassa seca das folhas de mudas de cajueiro.

O genótipo de cajueiro FAGA-01 superou o Crioula NP em termos de fitomassa seca de raízes e na eficiência de carboxilação.

4.5. Referências bibliográficas

- ALENCAR, M. L. M.; OLIVEIRA, A. B. de; ALVAREZ-PIZARRO, J. C.; MARQUES, E. C.; PRISCO, J. T.; GOMES-FILHO, E. Differential responses of dwarf cashew clones to salinity are associated to osmotic adjustment mechanisms and enzymatic antioxidative defense. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.93, p.1-14, 2021.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALMEIDA, F. A. G. Sucesso do cajueiro anão: clones de castanhas grandes e pesadas geneticamente desenvolvidos para a indústria. In: 9º Semana Internacional da Fruticultura. **Floricultura e Agroindústria**. 9. ed. Fortaleza: Instituto de Desenvolvimento da Fruticultura e Agroindústria, 2002.
- ANDRADE, E. M. G.; LIMA, G. S. de; LIMA, V. L. A. de; SILVA, S. S. da; GHEYI, H. R.; SILVA, A. A. R. da. Gas exchanges and growth of passion fruit under saline water irrigation and H₂O₂ application. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, n. 12, p. 945-951, 2019.
- BADER, B.; AISSAOUI, F.; KMICHA, I.; SALEM, A. B.; CHEHAB, H.; GARGOURI, K.; BOUJNAH, D.; CHAIEB, M. Effects of salinity stress on water desalination, olive tree (*Olea europaea* L. cvs 'Picholine', 'Meski' and 'Ascolana') growth and ion accumulation. **Desalination**, v. 364, p. 46-52, 2015.
- BAGHERI, M.; GHOLAMI, M.; BANINASAB, B. Hydrogen peroxide-induced salt tolerance in relation to antioxidant systems in pistachio seedlings. **Scientia Horticulturae**, v.243, p.207–213, 2019.
- CARNEIRO, P. T.; CAVALCANTI, M. L. F.; BRITO, M. E. B.; GOMES, A. H. S.; FERNANDES, P. D.; GHEYI, H. R. Sensibilidade do cajueiro anão precoce ao estresse salino na préfloração. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 2, n. 2, p. 150-155, 2007.
- CAPITULINO, J. D.; LIMA, G. S.; AZEVEDO, C. A. V.; SILVA, A. A. R.; ARRUDA, T. F. L.; SOARES, L. A. A.; GHEYI, H. R.; FERNANDES, P. D.; FARIAS, M. S. S.; SILVA, F. A.; DIAS, M. S. Influence of Foliar Application of Hydrogen Peroxide on Gas Exchange, Photochemical Efficiency, and Growth of Soursop under Salt Stress. **Plants**, v. 12, 2023.
- CAPITULINO, J. D.; LIMA, G. S.; AZEVEDO, C. A. V.; SILVA, A. A. R.; VELOSO, L. L. S. A.; FARIAS, M. S. S.; SOARES, L. A. A.; GHEYI, H. R.; LIMA, V. L. A. Gas exchange and growth of soursop under salt stress and H₂O₂ application methods. **Brazilian Journal of Biology**, v. 82, 2022.
- CAVALCANTE, L. F.; DIAS, T. J.; NASCIMENTO, R.; FREIRE, J. L. O. Clorofila e carotenoides em maracujazeiro-amarelo irrigado com águas salinas no solo com biofertilizante bovino. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 33, n. 1. p. 699-705, 2011.
- DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **The Forest Chronicle**, v. 36, n. 01, p. 10-13, 1960.
- ECHER, M. M.; GUIMARÃES, V. F.; KRIESER, C. R.; ABUCARMA, V. M.; KLEIN, J.; SANTOS, L.; DALLABRIDA, W. R. Uso de bioestimulante na formação de mudas de maracujazeiro-amarelo. **Ciência Agrária**, v. 27, n. 3, p. 351-360, 2006.

- FERREIRA, D. F. SISVAR: um sistema computacional de análise estatística. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2019.
- FIGUEREDO, K. S. L.; MARTINEZ-HUITLE, C. A.; TEIXEIRA, A. B. R.; DE PINHO, A. L. S.; VIVACQUA, C. A.; DA SILVA, D. R. Study of produced water using hydrochemistry and multivariate statistics in different production zones of mature fields in the Potiguar Basin–Brazil. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 116, p. 109-114, 2014.
- KIROVA, E.; KOICHEVA, K. Physiological effects of salinity on nitrogen fixation in legumes – a review. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, p. 2653-2662, 2021.
- LIMA, G. S. de.; SILVA, J. B. da.; SOUZA, L. P.; NOBRE, R. G.; SOARES, L. A. A.; GHEYI, H. R. Tolerance of precocious dwarf cashew clones to salt stress during rootstock formation stage. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 7, p. 474-481, 2020.
- LIMA, G. S. DE; PINHEIRO, F. W. A.; GHEYI, H. R.; SOARES, L. A. dos A.; SOUSA, P. F. DO N. & FERNANDES, P. D. Saline water irrigation strategies and potassium fertilization on physiology and fruit production of yellow passion fruit. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n. 3, p. 180-189, 2022.
- LIN, X.; WANG, Q.; MIN, X.; LIU, W.; LIU, Z. Análise comparativa de transcrição de perfis de transcrição de raiz e folha revela a mecanismos coordenados em resposta ao estresse de salinidade em ervilhaca comum. **International Journal Molecular Sciences**, v. 23, p. 84, 2022.
- MESQUITA, A., CAVALCANTI, J., CARDOSO, J., & BRAGA SOBRINHO, R. Ocorrência do escaravelho *Hilarianus* sp. (Coleoptera Scarabaeidae) em clones de cajueiro no nordeste do Brasil. **Congresso brasileiro de recursos genéticos**, v. 1, p. 196., 2010.
- MUNNS, R.; GILLIHAM, M. Salinity tolerance of crops – what is the cost?. **New Phytologist**, v. 208, n. 3, p. 668–673, 2015.
- NEGRÃO, S.; SCHMÖCKEL, S. M.; TESTER, M. Evaluating physiological responses of plants to salinity stress. **Annals of Botany**, v.119, n.1, p.1-11, 2017.
- NÓBREGA, J. S.; SILVA, T. I.; RIBEIRO, J. E. S.; VIEIRA, L. S.; FIGUEIREDO, F. R. A.; FÁTIMA, R. T.; BRUNO, R. L. A.; DIAS, T. J. Salinidade e ácido salicílico no desenvolvimento inicial de melancia. **Revista Desafios**, v. 7, n. 2, p.1-11, 2020.
- NOGUEIRA, N.W.; FREITAS, R.M.O.; LEAL, C.C.P.; TORRES, S.B. Estresse salino na emergência e desenvolvimento inicial de plântulas de jurema-branca. **Advances In Forestry Science**, v. 7, n. 3, p.1081-1087, 2020.
- NOVAIS, R. F.; NEVES J. C. L.; BARROS N. F. Ensaio em ambiente controlado. In: OLIVEIRA A. J. (ed) **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília: Embrapa- SEA. p. 189-253, 1991.
- NUNES, E. M.; AZEVEDO, E. S. DA S.; QUEIROZ, D. K. A dinâmica regional dos royalties do petróleo no território rural Sertão Central Cabugi e Litoral Norte, Rio Grande do Norte. **Geosul**, v. 38, n. 87, p. 317-344, 2023.
- PACHECO, F. V.; LAZZARINI, L. E. S.; ALVARENGA, I. C. Metabolismo relacionado com a fisiologia dos estômatos. **Enciclopédia Biosfera**, v. 18, n. 36, 2021.
- PAIVA, T. F. P. **Desenvolvimento de plântulas de cajueiro anão sob diferentes níveis de adubação e submetidas à diferentes níveis de salinidade**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, p. 97, 2018.
- SEKHON, K. S.; KAUR, A.; THAMAN, S.; SIDHU, A. S.; GARG, N.; CHOUDHARY, O. P.; CHAWLA, N. Irrigation water quality and mulching effects on tuber yield and soil properties in potato (*Solanum tuberosum* L.) under semi-arid conditions of Indian Punjab. **Field Crops Research**, v. 247, n. 1, p.1-11, 2020.
- SENA, E. S.; RODRIGUES, V. S.; SOUSA, G. G.; SALES, J. R. S.; LEITE, K. N.; CEITA, E. A. R. Crescimento e acúmulo de biomassa em milho irrigado com água salina. **Revista Agropecuária Técnica**, v. 39, n. 2, p. 164-172, 2018.

- SILVA, A. A. R.; LIMA, G. S.; AZEVEDO, C. A. V.; GHEYI, H. R.; SOUZA, L. de P.; VELOSO, L. L. de S. A. Salt stress and exogenous application of hydrogen peroxide on photosynthetic parameters of sour sop. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, p.257-263, 2019.
- SILVA, F. C. R.; DOS SANTOS, L. C. L.; DE OLIVEIRA, P. K. R. Estudo das técnicas aplicadas no tratamento da água produzida de petróleo. Rio Oil & Gas Expo and Conference 2022. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2022.
- SILVA, J. A. da; TAVARES, C. D. A.; MORAIS, S. M. de; OLIVEIRA, M. S. C. Caracterização química e fitoquímica, toxicidade e atividade antioxidante in vitro, de Clones de Pedúnculos de Caju (*Anacardium Occidentale* L.). **Brazilian Journal of Development**, v.7, n.8, p.79458-79470, 2021.
- SILVEIRA, J. A. G.; SILVA, S. L. F.; SILVA, E. N.; VIÉGAS, R. A. Mecanismos biomoleculares envolvidos com a resistência ao estresse salino em plantas. In: Gheyi, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; GOMES FILHO, E. (Org.). **Manejo da salinidade na agricultura**: Estudos básicos e aplicados. 2. ed. Fortaleza: INCTsal, v. 1, p. 180-196, 2016.
- SOUZA, V. D.; CAPITULINO, J. D.; LIMA, G. S.; AZEVEDO, C. A. V.; SILVA, A. A. R.; ARRUDA, T. F. L. Eficiência fotoquímica de gravioleira sob estresse salino e aplicação foliar de peróxido de hidrogênio. In: VIII Inovagri International Meeting e XXXII CONIRD, 2023, Fortaleza. **Anais eletrônicos** [...] Fortaleza, 2023. Disponível em: https://icolibri.com.br/2023/public/__anais/TC0750034.pdf. Acesso em: 30 ago. 2024.
- SOUZA, L. de P.; NOBRE, R. G.; GHEYI, H. R.; FÁTIMA, R. T.; LIMA, G. S.; DINIZ, G. L. Índices fisiológicos e crescimento de porta-enxertos de cajueiro sob estresse salino e concentrações de prolina. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 169-183, 2021.
- SOUZA, L. de P.; NOBRE, R. G.; GHEYI, H. R.; FÁTIMA, R. T.; SILVA, E. L.; ELIAS, J. J. Alocação de fitomassa e crescimento de clones de cajueiro irrigados com águas de diferentes salinidades. **Revista Desafios**, v. 7, n. 1, p. 52-63, 2020.
- SRINIVAS, A.; KUMAR V.; WANI, S.; SUPRASANNA, P.; TRAN, L. S. Implantação de mecanismos adaptados por halófitas para melhorar a tolerância à salinidade em plantas de cultivo: foco em características anatômicas, atributos estomáticos e eficiência no uso da água. **Springer**, v. 1, p. 399, 2018.
- SUASSUNA, C. F.; FERREIRA, N. M.; SÁ, F. V. S.; BERTINO, A. M. P.; MESQUITA, E. F.; PAIVA, E. P.; JESUS, P. L. M.; BERTINO, A. M. P. Produção de mudas de cajueiro anão precoce cultivado em diferentes substratos e ambientes. **Agrarian**, v. 9, n. 33, p. 197-209, 2016.
- VELOSO, L. L. S. A.; CAPITULINO, J. D.; LIMA, G. S.; AZEVEDO, C. A. V.; SILVA, A. A. R. da; Gheyi, H. R. Application methods of hydrogen peroxide in sour sop seedlings irrigated with saline water. **Comunicata Scientiae**, v.12, p.1-8, 2021.
- VELOSO, L. L. S. A.; NOBRE, R. G.; LIMA, G. S.; BARBOSA, J. L.; MELO, E. M.; GHEYI, H. R.; GONÇALVES, E. B.; SOUZA, C. M. A. Quality of sour sop (*Annona muricata* L.) seedlings under different water salinity levels and nitrogen fertilization. **Australian Journal of Crop Science**, v.12, n.1, p.306-310, 2018.
- VOIGT, E. L.; ALMEIDA, T. D.; CHAGAS, R. M.; PONTE, L. F. A. Source-sink regulation of cotyledonary reserve mobilization during cashew (*Anacardium occidentale*) seedling establishment under NaCl salinity. **Journal of Plant Physiology**, v. 166, n. 1, p. 80-89, 2009.

5. CONCLUSÕES GERAIS

O aumento da salinidade na água de irrigação, causado pela água produzida do petróleo, impacta negativamente o crescimento das mudas de cajueiro. Ainda assim, é possível utilizar água salobra com diluição 50% água não salina + 50% água produzida ($CE = 2,06 \text{ dS m}^{-1}$) para garantir um manejo viável e eficaz na formação de mudas de boa qualidade, promovendo maior eficiência fotossintética e crescimento das plantas.

O uso de água produzida do petróleo em diluições menores (AP-4 e AP-5) prejudica os processos fotossintéticos das plantas, afetando o crescimento e a qualidade das mudas de cajueiro devido ao excesso de sais. Entretanto, o genótipo FAGA-01 demonstrou maior eficiência no uso da água e de carboxilação, crescimento e de fitomassa seca de raízes sob condições de estresse salino, em comparação ao genótipo Crioula NP. Esses fatores podem ser considerados parâmetros relevantes para a seleção de genótipos mais tolerantes à salinidade.

A aplicação exógena de peróxido de hidrogênio não reduz os impactos da salinidade presente na água produzida do petróleo na irrigação de mudas de cajueiro. Todavia, em quantidades menores de água salina AP-2 ($CE = 1,26 \text{ dS m}^{-1}$) e AP-3 ($CE = 2,06 \text{ dS m}^{-1}$), em concentração de $15 \mu\text{M}$, o H_2O_2 amenizou os efeitos nocivos do estresse salino e promoveu o aumento de biomassa das mudas de cajueiro. Em água de irrigação com maior presença de água produzida (AP-4 e AP-5), o peróxido fomentou os efeitos do estresse salino e reduziu a produção de biomassa nas mudas de cajueiro.

A água produzida do petróleo, quando diluída em proporções adequadas, demonstra ser uma fonte hídrica viável para regiões que sofrem com a irregularidade das chuvas e dependem de águas de baixa qualidade para produção agrícola. Outrossim, a ampliação de pesquisas que envolvam os impactos do uso da água produzida do petróleo em campo, analisando o desempenho do cajueiro e os efeitos do uso dessa alternativa como irrigação prolongada, torna-se necessário.