



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

CHERLYSON CUNHA DE MEDEIROS

**LÂMINAS DE ÁGUA PRODUZIDA DO PETÓLEO SINTÉTICA NA IRRIGAÇÃO
DA MANDIOCA NO SEMIARIDO: RENDIMENTOS DE RAÍZES, ETANOL E
BIOCHAR**

MOSSORÓ

2026

CHERLYSON CUNHA DE MEDEIROS

**LÂMINAS DE ÁGUA PRODUZIDA DO PETÓLEO SINTÉTICA NA IRRIGAÇÃO
DA MANDIOCA NO SEMIARIDO: RENDIMENTOS DE RAÍZES, ETANOL E
BIOCHAR**

Dissertação apresentada ao 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: Salinidade, fertirrigação, manejo de irrigação, economia de baixo carbono e bioenergia.

Orientador: José Francismar de Medeiros, Prof. Dr.

MOSSORÓ

2026

©Todos os direitos estão reservados à 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 tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

C Cunha de Medeiros, Cherlyson .
488 LÂMINAS DE ÁGUA PRODUZIDA DO PETÓLEO SINTÉTICA
1 NA IRRIGAÇÃO DA MANDIOCA NO SEMIARIDO:
 RENDIMENTOS DE RAÍZES, ETANOL E BIOCHAR /
 Cherlyson Cunha de Medeiros. - 2026.
 88 f. : il.

 Orientador: José Francismar de Medeiros.
 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Manejo de Solo e Água, 2026.

 1. Manihot esculenta Crantz. 2. Água de
petróleo. 3. Salinidade. 4. Bioetanol. 5.
Eficiência do uso da água. I. Medeiros, José
Francismar de, 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

CHERLYSON CUNHA DE MEDEIROS

**LÂMINAS DE ÁGUA PRODUZIDA DO PETÓLEO SINTÉTICA NA IRRIGAÇÃO
DA MANDIOCA NO SEMIARIDO: RENDIMENTOS DE RAÍZES, ETANOL E
BIOCHAR**

Dissertação apresentada ao 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: Salinidade, fertirrigação, manejo de irrigação, economia de baixo carbono e bioenergia.

Defendida em: 20 / 02 / 2026.

BANCA EXAMINADORA

José Francismar de Medeiros, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Rafael Oliveira Batista, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Stefeson Bezerra de Melo, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Jaeveson da Silva, Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Robson Alexsandro de Sousa, Prof. Dr. (EAJ/UFRN)

Membro Examinador

Ao meu pai, José Junior, minha mãe, Ivaneidei Galdino, minhas irmãs Mariana e Rose, Tia Marly Paulino, e à minha companheira, Janile Soares. Pelo amor, apoio e incentivo.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, Pai, que na sua infinita bondade e misericórdia tem me guiado por caminhos sublimes que nunca imaginei passar.

À minha companheira, Janile Soares, por ter me incentivado e ser meu “porto seguro” nos momentos mais difíceis, minha motivação diária na busca de ser uma pessoa melhor, um profissional mais capacitado e por me possibilitar ver a vida de uma forma diferente.

À meus pais, que mesmo não sendo letrados me ensinaram desde cedo que o caminho para uma vida melhor seria através da educação.

Aos meus familiares, Tia Marly, Tia Marlene, Tia Netinha, Joselito pelo incentivo e apoio que recebi.

À Universidade Federal Rural do Semi-árido (UFERSA) e ao Programa de Pós Graduação em Manejo de Solo e Água, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

À EMBRAPA Mandioca e Fruticultura, na pessoa do pesquisador Jaeveson da Silva, pela indicação e fornecimento do material de plantio da pesquisa.

Ao Prof. José Francismar de Medeiros, pela oportunidade de orientação, pelos ensinamentos, pela confiança, por ter acreditado em mim na condução dessa pesquisa e por todo o apoio concedido durante o período que passei na UFERSA.

Ào Prof. Rafael Oliveira Batista, pelos ensinamentos, pelos conselhos que muito me ajudaram no curso.

Aos membros da banca, pelas contribuições e enriquecimento da dissertação.

Aos técnicos da UFERSA, Francisco das Chagas, Simone, Raniere, Daiane, Juliana, por todo o apoio. Aos funcionários da Fazenda Experimental, pela imensa ajuda na realização dos experimentos.

Aos integrantes do LASAPSA e Grupo de Estudos e Pesquisa em Manejo de Água e Solo na Agrícola Irrigada, pelos momentos que passamos juntos, por terem transformado até mesmo os momentos difíceis de trabalho em campo em momentos prazerosos, pelas horas trabalhadas em laboratório, pela convivência, por todo o companheirismo e amizade.

A cada pessoa que contribuiu com esse projeto, que contribuiu com meu crescimento no mestrado e pela companhia partilhada durante essa jornada.

Agradeço ao apoio financeiro do Programa de Capacitação em Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH-ANP), sob a gestão da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão da bolsa.

Muito obrigado!

Quanto mais aumenta nosso conhecimento,
mais evidente fica nossa ignorância”.

(John F. Kennedy)

RESUMO

A região semiárida destaca-se pela ocorrência de insuficiência hídrica, ocasionada por baixa precipitação e elevada evapotranspiração. Em paralelo a isso, a agricultura irrigada demanda grandes volumes de água. O uso de fontes hídricas não convencionais, como a água produzida de petróleo, surge como uma alternativa estratégica para a expansão da bioeconomia no Semiárido brasileiro. Este trabalho objetivou avaliar o potencial produtivo, a eficiência hídrica e o desempenho agroenergético das cultivares de mandioca Recife e Venâncio irrigadas com água produzida tratada sob diferentes lâminas de irrigação e tempos de colheita. Os experimentos foram conduzidos em delineamento de blocos casualizados, testando quatro lâminas de irrigação (25, 50, 75 e 100% - ET_c), dois níveis de salinidade da água (S1: 0,8 dS m^{-1} e S2: 4,8 dS m^{-1} - caracterizando a água produzida tratada) e quatro períodos de colheita (6, 8, 10 e 11 meses). Os resultados indicaram respostas genotípicas contrastantes: a cv. Recife demonstrou alta responsividade à disponibilidade hídrica, atingindo produtividades superiores a 30 t ha^{-1} sob irrigação plena (100% ET_c) e água doce, porém com severa restrição produtiva (queda de ~54%) sob salinidade. Em contraste, a cv. Venâncio exibiu elevada resiliência, mantendo a produtividade de amido estável e incrementando o teor de matéria seca das raízes sob irrigação com água produzida. Para ambos os genótipos, a Eficiência do Uso da Água (EUA) foi maximizada sob regimes de irrigação deficitária (25% e 50% da ET_c). A colheita aos 8 meses configurou-se como o ponto ótimo para ambas as cultivares, conciliando máxima eficiência hídrica, acúmulo de amido e produção potencial de bioetanol, que na cv. Venâncio superou 5,0 $m^3 ha^{-1}$, equiparando-se à média regional da cana-de-açúcar. Adicionalmente, o aproveitamento da biomassa aérea para a produção de biochar demonstrou o potencial do sistema no sequestro de carbono. Conclui-se que a água produzida de petróleo possui elevado potencial para a irrigação da mandioca, sendo a cultivar Venâncio a mais apta para sistemas de reuso, permitindo a transformação de um efluente industrial em insumo para a produção sustentável de energia e biomassa e contribuindo com uma economia circular no Semiárido Potiguar.

Palavras-chave: *Manihot esculenta* Crantz, Água de petróleo, Salinidade, Bioetanol, Eficiência do uso da água.

ABSTRACT

The semi-arid region is characterized by water scarcity, caused by low rainfall and high evapotranspiration. In parallel, irrigated agriculture demands large volumes of water. The use of unconventional water sources, such as produced water from petroleum, emerges as a strategic alternative for the expansion of the bioeconomy in the Brazilian semi-arid region. This study aimed to evaluate the productive potential, water efficiency, and agroenergetic performance of the cassava cultivars Recife and Venâncio irrigated with treated produced water under different irrigation depths and harvest times. The experiments were conducted in a randomized block design, testing four irrigation depths (25, 50, 75, and 100% - ET_c), two water salinity levels (S1: 0.8 dS m⁻¹ and S2: 4.8 dS m⁻¹ - characterizing treated produced water), and four harvest periods (6, 8, 10, and 11 months). The results indicated contrasting genotypic responses: the cv. Recife demonstrated high responsiveness to water availability, reaching yields greater than 30 t ha⁻¹ under full irrigation (100% ET_c) and freshwater, but with severe yield restriction (a drop of ~54%) under salinity. In contrast, the cv. Venâncio exhibited high resilience, maintaining stable starch productivity and increasing root dry matter content under irrigation with produced water. For both genotypes, Water Use Efficiency (WUE) was maximized under deficit irrigation regimes (25% and 50% of ET_c). Harvesting at 8 months was the optimal point for both cultivars, combining maximum water efficiency, starch accumulation, and potential bioethanol production, which in the Venâncio cultivar exceeded 5.0 m³ ha⁻¹, equaling the regional average for sugarcane. Additionally, the use of aboveground biomass for biochar production demonstrated the system's potential for carbon sequestration. It is concluded that water produced from petroleum has high potential for cassava irrigation, with the Venâncio cultivar being the most suitable for reuse systems, allowing the transformation of an industrial effluent into an input for the sustainable production of energy and biomass, contributing to a circular economy in the semi-arid region of Potiguar.

Keywords: *Manihot esculenta* Crantz, Produced water, Salinity, Bioethanol, Water use efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Imagem aérea da área experimental.	24
Figura 2	– Curvas de retenção nas camadas de 0–2 e 20–40 cm observadas na área experimental.	26
Figura 3	– Curva de Kc estimada para a cultura da mandioca par as condições de plantio.....	28
Figura 4	– Distribuição das lâminas de irrigação nas parcelas. Lâminas de 25 e 50% da ETc com mangueira em fileira simples, lâminas de 75 e 100% da Etc com mangueira em fileira dupla	28
Figura 5	– Produtividade média de raízes em função do tempo de colheita para diferentes lâminas de irrigação aplicada.....	37
Figura 6	– Produtividade de raízes, média de 4 épocas (6, 8, 10 e 11 meses), em função das lâminas, (% da ETc), de irrigação quando se utiliza água doce ($CE = 0,8 \text{ dS m}^{-1}$) e água produzida sintética ($CE = 4,8 \text{ dS m}^{-1}$).....	39
Figura 7	– Produtividade de raízes, média de 2 épocas (8 e 10 meses), em função da lâmina de irrigação quando se utiliza água doce ($CE = 0,8 \text{ dS m}^{-1}$) e água produzida sintética ($CE = 4,8 \text{ dS m}^{-1}$).....	41
Figura 8	– Médias estimadas da produtividade de raízes da cultivar Recife para a combinação dos fatores Salinidade, Lâmina e Tempo de colheita)..	43
Figura 9	– Produtividade de MS de raízes, média de 4 épocas (6, 8, 10 e 11 meses), em função das lâminas de irrigação quando se utiliza água doce ($CE = 0,8 \text{ dS m}^{-1}$) e água produzida sintética ($CE = 4,8 \text{ dS m}^{-1}$).....	45
Figura 10	– . . Produtividade de amido, média de 4 épocas (6, 8, 10 e 11 meses), em função das lâminas de irrigação quando se utiliza água doce ($CE = 0,8 \text{ dS m}^{-1}$) e água produzida sintética ($CE = 4,8 \text{ dS m}^{-1}$).....	47
Figura 11	– Eficiência do uso da água por lâmina, salinidade e tempo de colheita.	49
Figura 12	– Produção do potencial de etanol da macaxeira Recife em função da Lâmina de irrigação (% da ETc) para água doce e água produzida sintética..	52
Figura 13	– . Consumo de água de irrigação por tonelada de amido produzida em função da lâmina de irrigação aplicada (% da ETc) quando se utiliza água doce e produzida sintética na cultivar Recife.....	54
Figura 14	– Produção de biomassa seca e potencial de sequestro de carbono da macaxeira Recife colhida em diferentes épocas e irrigada com diferentes lâminas de irrigação utilizando água doce e água produzida sintética.....	57

Figura 15	–	Rendimento de raiz de mandioca fresca, média do tempo (4 tempos de colheita e de dois tipos de água de irrigação) em função da lâmina de irrigação aplicada.....	62
Figura 16	–	Teor de matéria seca nas raízes da cultivar Venâncio em função da lâmina de irrigação aplicada para dois tipos de água de irrigação.....	64
Figura 17	–	Produtividade média de biomassa da cultivar Venancio por lâmina x tempo de colheita.....	68
Figura 18	–	Medias de eficiência do uso da água cultivar Venâncio.	71
Figura 19	–	Produção média de biochar cultiva Venâncio por lâmina x tempo de colheita.....	73
Figura 20	–	Estimativa de sequestro de carbono por lâmina x tempo na cultivar Venâncio.....	74
Figura 21	–	Estimativa de produção de etanol a partir da produção de amido na cultivar Venâncio.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	— Precipitação pluviométrica acumulada por mês (mm), com suplementação hídrica por lâmina de irrigação ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$).....	24
Tabela 2	— Análise química e física do solo das áreas experimentais anterior a montagem dos experimentos (profundidades 0- 0,20; 0,24-0,40 m).....	25
Tabela 3	— Análise química da água de irrigação	29
Tabela 4	— P-valores da ANOVA Tipo III para todas as variáveis analisada da cultivar Recife.....	33
Tabela 5	— Produtividade de raízes frescas por nível de lâmina.....	36
Tabela 6	— P-valores para as variáveis analisadas no modelo para cultivar Venancio.....	59
Tabela 7	— Eficiência do uso da água (EUA) e consumo específico de água para produção de amido da cultivar Venancio.....	65
Tabela 8	— Rendimento de raízes e de amido, teor de matéria seca na parte aérea e uso específico de água de irrigação por produção de amido, em função do tempo de colheita da mandioca...	66
Tabela 9	— Melhores valores de eficiência do uso de água por tonelada de amido da cultivar Venancio.	69

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	13
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	14
REFERÊNCIAS.....	16
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	18
A Macaxeira como matéria-prima energética.....	18
Água Produzida de Petróleo: Potencial de uso.....	18
O Amido da Mandioca como Fonte de Etanol.....	21
Estratégias para a Descarbonização e Economia de Baixo Carbono.....	22
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	23
Área experimental.....	23
Características das cultivares utilizadas.....	26
Delineamento experimental.....	27
Condução do experimento.....	27
Manejo de irrigação.....	27
Preparo da água de irrigação.....	28
Preparo do solo e adubação.....	29
Avaliação da produtividade de biomassa da parte aérea.....	29
Produtividade de raízes.....	30
Teor de matéria seca.....	30
Teor e rendimento de amido.....	30
Estimativa de produção de Etanol.....	30
Tonelada de CO ₂ equivalente.....	31
Análise estatística.....	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
4.1 Respostas da cultivar. Recife a qualidade da água e lâminas de irrigação.....	33
4.1.2 Produção de raízes da Cultivar Recife.....	35
4.1.2.1 Efeito da lâmina de irrigação sobre a Produtividade.....	35

4.1.2.2 Efeito da interação Lâmina de Irrigação versus período de colheita sobre a Produtividade da cultivar Recife	37
4.1.2.3 Interação entre Lâmina de Irrigação e Salinidade da Água na Produtividade da cultivar Recife.....	39
4.1.2.4 Interação entre Lâmina de Irrigação e Salinidade da Água e tempo de colheita na Produtividade da cultivar Recife	42
4.1.3 Interação entre lâmina de irrigação e salinidade da água sobre o acúmulo de matéria seca das raízes da cultivar Recife	44
4.1.4 Produção de amido da cultivar Recife, em função da interação entre lâmina de irrigação e salinidade da água	46
4.1.5 Eficiência do Uso da Água em Função da Lâmina de Irrigação, Salinidade da Água e Tempo de Colheita.....	48
4.1.6 Produção potencial de etanol da cultivar Recife em função da lâmina de irrigação e da salinidade da água	51
4.1.7 Produção potencial de biochar e sequestro de carbono da cultivar Recife em função do tempo	56
4.1.8 Manejo Integrado e Potencial Bioenergético da cultivar Recife.....	58
4.2 Respostas da cultivar de macaxeira Venâncio a qualidade da água e lâminas de irrigação.	59
4.2.1. Produtividade de raízes da mandioca Venâncio	61
4.2.1.1 Produtividade de raízes em função das lâminas de irrigação	61
4.2.2 Teor de matéria seca da raiz e efeito da água produzida sintética.....	63
4.2.3 Produção de biomassa e matéria seca da parte aérea e eficiência agrônômica para produção de amido	64
4.2.4 Eficiência do uso da água e consumo hídrico	69
4.2.5 O potencial de produção de biochar e sequestro de CO ₂ sob uso de água produzida.....	72
4.2.6 Produção potencial de etanol da cultivar Venâncio em comparação à cana-de-açúcar no Nordeste brasileiro.....	75
4.2.7 Resiliência e viabilidade da cultivar Venâncio para uso agrícola	77
4.3 Comparação entre as cultivares Venâncio e Recife.....	78
5. CONCLUSÕES	81
6. REFERÊNCIAS	83

1. INTRODUÇÃO GERAL

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é uma espécie vegetal botanicamente considerada perene, pertencente à família das Euforbiáceas e nativa da América do Sul (LI *et al.*, 2010), com centro de origem localizado na região sudoeste da Amazônia, abrangendo atualmente as áreas do Brasil, Bolívia e Peru. Evidências arqueológicas, genéticas e etnobotânicas indicam que o processo de domesticação ocorreu há cerca de 7.000 a 10.000 anos, a partir de populações silvestres do gênero *Manihot*, especialmente a partir da espécie *Manihot esculenta* ssp. *flabellifolia* (OLSEN; SCHAAL, 1999; ALVES, 2002; LEBOT, 2009).

Embora seja uma planta perene por natureza, é tradicionalmente cultivada como cultura anual ou bianual nas zonas tropicais e subtropicais, principalmente para a produção de suas raízes tuberosas ricas em amido, que constituem seu principal produto econômico (OTEKUNRIN *et al.*, 2024). Na região Nordeste e especificamente no estado do Rio Grande do Norte, a mandioca mansa, caracterizada pelo baixo teor de ácido cianídrico, é denominada de macaxeira. Cultivares crioulas são as mais cultivadas por nossos produtores, por serem produtivas, de ciclo curto e também podem ser produzidas para consumo *in natura*, além de poderem ser utilizadas na indústria, pelos altos teores de amido. A cultivar Recife tem sido mais cultivada nas áreas do litoral leste do Nordeste e a cultivar Venâncio na Oeste do Rio Grande do Norte, de forma irrigada, e ambas têm se destacado entre as mais produtivas e aceitas pelo mercado de mandioca de mesa (MORAIS *et al.*, 2024; SILVA, 2021).

Além de sua relevância alimentar e socioeconômica, a mandioca apresenta elevado potencial para a produção de etanol, podendo alcançar rendimentos de até 200 litros por tonelada de raiz Segundo o diretor do Centro de Raízes e Amidos Tropicais (CERAT), Cláudio Cabello, em função da elevada eficiência de conversão do amido, além de se adaptar a diferentes tipos de solos (UECE, 2009). A aceitação social dessa rota energética é favorecida por sua forte ligação histórica e cultural com populações tradicionais, bem como pela possibilidade de consórcio com outras culturas agrícolas. Especialistas indicam ainda que as regiões Norte e Nordeste do Brasil tendem a ser as mais beneficiadas pela produção de etanol a partir da mandioca, em função de suas condições edafoclimáticas, socioeconômicas e da possibilidade de utilização de unidades industriais de menor porte, o que favorece a descentralização da produção e a inclusão de pequenos e médios produtores no setor bioenergético. (UECE, 2009).

Entretanto, a expansão sustentável dessa cadeia produtiva está diretamente condicionada à disponibilidade hídrica, fator particularmente limitante em regiões semiáridas.

A crescente demanda por fontes renováveis de energia, associada à escassez de água doce, impõe a necessidade de soluções integradas que conciliem produção agrícola, eficiência hídrica e sustentabilidade ambiental. Nesse contexto, o etanol proveniente da macaxeira destaca-se como alternativa promissora, desde que associado a estratégias inovadoras de manejo da água (ALVES, 2002).

Nesse contexto, esta pesquisa alinha-se diretamente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas. A proposta de utilização da água produzida do petróleo como fonte alternativa para irrigação contribui para a gestão eficiente e integrada dos recursos hídricos (ODS 6), ao mesmo tempo em que fortalece a produção de bioetanol e o aproveitamento energético da biomassa (ODS 7). A integração entre os setores de petróleo, agricultura irrigada e bioenergia promove inovação tecnológica e infraestrutura produtiva regional (ODS 9), baseada na valorização de resíduos e no reaproveitamento de efluentes sob a lógica da economia circular (ODS 12). Além disso, a substituição parcial de combustíveis fósseis por biocombustíveis e o potencial de sequestro de carbono associado ao uso de biochar contribuem para estratégias de mitigação das mudanças climáticas (ODS 13).

Nesse cenário, a água produzida de petróleo um subproduto inevitável do processo de extração de óleo e gás, emerge como uma potencial fonte hídrica alternativa em regiões petrolíferas semiáridas. Especificamente, na bacia Potiguar que produz 161.471 m³ de água produzida por dia, segundo dados da ANP. Volume que evidencia tanto o desafio ambiental quanto a oportunidade de aproveitamento produtivo.

A articulação entre a indústria do petróleo e gás e o setor agroenergético, por meio do uso da água produzida na irrigação agrícola e do aproveitamento da biomassa mandioca para geração de bioetanol e biochar, representa uma estratégia alinhada ao conceito de economia circular. Nesse modelo, um efluente classificado como passivo ambiental passa a ser reinserido no ciclo produtivo como insumo hídrico, enquanto subprodutos da cadeia produtiva da mandioca podem ser convertidos em energia renovável e condicionadores de solo com potencial de sequestro de carbono. Essa integração reduz o descarte de resíduos, promove sinergias intersetoriais e fortalece sistemas produtivos mais resilientes no semiárido Brasileiro produtor de petróleo.

Assim, a água produzida com qualidade adequada pode se tornar uma alternativa de irrigação em ambientes com restrições hídricas, embora seu uso deva ser acompanhado de tratamento adequado e monitoramento de propriedades físico-químicas para evitar impactos negativos sobre a produtividade e a qualidade do solo (MILLER *et al.*, 2020). Dependendo das

condições geológicas, esta pode apresentar elevada concentração de sais, especificamente o sódio. Se razão de adsorção de sódio for elevada e a condutividade elétrica da água for baixa a moderada pode causar salinização e sodificação do solo, reduzindo a infiltração, fertilidade e produtividade das culturas.

Apesar de avanços isolados nas áreas de uso agrícola de água produzida e bioenergia, ainda são escassos estudos que integrem, de forma sistêmica, o manejo da irrigação com água produzida, a avaliação detalhada dos impactos edáficos e a quantificação do rendimento potencial de etanol em cultivares regionais de mandioca sob condições semiáridas. Persiste, portanto, uma lacuna científica na interface entre manejo de solo e água e a indústria de petróleo e gás, especialmente quanto à utilização de água produzida sintética sob diferentes lâminas de irrigação, associando produtividade agrícola, eficiência hídrica e desempenho energético comparativo com culturas consolidadas, como a cana-de-açúcar. Informações específicas sobre o comportamento das cultivares Recife e Venâncio nesse contexto ainda são limitadas, conferindo caráter inovador à presente investigação.

Diante desse cenário, este estudo teve como objetivo quantificar a produtividade de etanol e a eficiência hídrica de duas cultivares de mandioca mansa crioulas tradicionalmente cultivadas por produtores do litoral leste da região Nordeste do Brasil e na região Oeste do estado do Rio Grande do Norte, sob diferentes manejos de irrigação, avaliando sua resposta à utilização de água produzida sintética e comparando seu desempenho com padrões consolidados da cana-de-açúcar. Essa abordagem busca compreender o potencial real da mandioca como cultura bioenergética em ambientes limitados por disponibilidade hídrica e qualidade da água, oferecendo subsídios para sistemas produtivos mais eficientes e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ALVES, A. A. C. Cassava botany and physiology. In: HILLOCKS, R. J.; THRESH, J. M.; BELLOTTI, A. C. (Eds.). **Cassava: biology, production and utilization**. Wallingford: CABI, 2002. p. 67-89. <https://doi.org/10.1079/9780851995243.0067>

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Painéis dinâmicos de produção de petróleo e gás natural**. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/paineis-dinamicos-de-producao-de-petroleo-e-gas-natural>. Acesso em: 6 jan. 2025.

LI, K.; ZHU, W.; ZENG, K.; ZHANG, Z.; YE, J.; OU, W.; REHMAN, S.; HEUER, B.; CHEN, S. Proteome characterization of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) somatic embryos, plantlets and tuberous roots. **Proteome Science**, cidade, v. 8, n. 10, 2010.

LEBOT, V. (2009) Culturas tropicais de raízes e tubérculos: mandioca, batata-doce, inhame e aráceas. CABI Publishers, Wallingford, Reino Unido.

MILLER, H.; DIAS, K.; HARE, H.; BORTON, M. A.; BLOTEVOGEL, J.; DANFORTH, C.; WRIGHTON, K. C.; IPPOLITO, J. A.; BORCH, T. Reusing oil and gas produced water for agricultural irrigation: Effects on soil health and the soil microbiome. **Science of the Total Environment**, v. 722, p. 137888, 20 jun. 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137888.

Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720314017?utm_source=chatgpt.com.

MORAIS, L.K; SANTIAGO, A.D; BISNETO, J. S.B. Desempenho de genótipos de mandioca de mesa em Alagoas. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, Aracaju, SE / Dez, 2024. ISSN 1678-1961. Disponível em :

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1170874/1/Desempenho-de-genotipos-de-mandioca.2024.pdf>

OLSEN, K. M.; SCHAAL, B. A. Evidence on the origin of cassava: phylogeography of *Manihot esculenta*. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 96, n. 10, p. 5586–5591, 1999. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.96.10.5586>. Acesso em: 2 jan. 2026.

OTEKUNRIN, O. A. Mandioca (*Manihot esculenta* Crantz): uma pegada científica global — produção, comércio e insights bibliométricos. **Discov Agric**. v 2 , 94 (2024). <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00121-3>.

SILVA, J. Tamanhos de manivas tratadas com enraizante na produção de mandioca de mesa cv. Venâncio em cultivo irrigado. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2021. 27 p. (**Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, 120) ISSN 1809-5003. Disponível em; <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1131825/1/BoletimPesquisa120-Jaeveson-2021-AINFO.pdf>

UECE. Produção de etanol a partir da mandioca pode ser mais barata do que com a cana. *Agência de Inovação da UECE*, 18 mar. 2009. Disponível em: <https://www.uece.br/agin/noticias/producao-de-etanol-a-partir-da-mandioca-pode-ser-mais-barata-do-que-com-a-cana/>. Acesso em: 3 jan. 2026

2. REVISÃO DE LITERATURA

A Macaxeira como matéria-prima energética

A mandioca mansa ou macaxeira (*Manihot esculenta* Crantz) é uma cultura de origem brasileira amplamente adaptada às condições edafoclimáticas, inclusive no Nordeste brasileiro, e especialmente no semiárido, onde desempenha papel estratégico na segurança alimentar e na sustentabilidade dos sistemas produtivos (CAVALCANTI, 2000). Sua ampla difusão regional está associada à elevada tolerância ao déficit hídrico, à capacidade de se desenvolver em solos de baixa fertilidade natural e à eficiência no uso de recursos limitados, características que permitem sua produção sob regimes de precipitação irregulares e ambientes de sequeiro (ALVES *et al.*, 2007). Desde que o solo possua boa drenagem e textura arenosa ou areno-argilosa adequada ao desenvolvimento radicular, esses atributos, aliados à rusticidade fisiológica da cultura, explicam a persistência do cultivo da mandioca e sua importância socioeconômica no semiárido nordestino (CAVALCANTI, 2000).

A extensão e a estruturação das variedades tradicionais constituem uma importante fonte de diversidade genética e, portanto, devem receber maior atenção nas estratégias de manejo e conservação dos recursos genéticos de plantas cultivadas. Estudos baseados em marcadores microsatélites demonstram que as cultivares tradicionais de mandioca, cultivadas por agricultores em agroecossistemas sul-americanos, apresentam ampla diversidade genética, incluindo alelos não representados em coleções mundiais de germoplasma, o que evidencia o elevado valor dessas variedades crioulas como fonte de variabilidade genética para programas de conservação e melhoramento da espécie (ELIAS *et al.*, 2004).

Estudos fisiológicos indicam que a mandioca apresenta mecanismos adaptativos importantes, como ajuste osmótico, controle estomático eficiente e capacidade de recuperação após períodos de estresse hídrico, favorecendo sua estabilidade produtiva em condições semiáridas (CARVALHO *et al.*, 2016). Além disso, programas de melhoramento e avaliações regionais têm identificado genótipos com maior tolerância à seca, reforçando o potencial da cultura para sistemas agrícolas resilientes frente às mudanças climáticas (ALVES *et al.*, 2007).

Água Produzida de Petróleo: Potencial de uso

Sendo o principal efluente gerado durante a produção de petróleo e gás natural, a água produzida é definida pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), como o volume de água extraído dos reservatórios junto com o petróleo e/ou gás natural, cuja

produção é encaminhada inicialmente para uma Unidade Estacionária de Produção (UEP), trata-se de um subproduto com elevado volume e complexidade composicional, cuja gestão requer cuidados técnicos, operacionais e ambientais específicos (PETROBRAS, 2025). Em muitos campos de petróleo, o volume de água chega a ser dez vezes maior que o volume de hidrocarbonetos produzidos (SILVA, 2019).

Os componentes da água produzida incluem minerais dissolvidos da formação produtora, constituintes oleosos dissolvidos e dispersos, produtos químicos utilizados durante o processo de produção, sólidos e gases dissolvidos. Muitos desses compostos são resistentes aos tratamentos convencionais, exigindo processos de tratamento mais complexos (IGNUNNU; CHEN, 2014).

Dados da ANP indicam que, em novembro de 2024, o Brasil produziu diariamente cerca de 554.953,18 m³ de água produzida, o que evidencia a magnitude do desafio ambiental e a oportunidade de reaproveitamento em cadeias produtivas compatíveis com seus atributos físico-químicos e ambientais.

Embora a utilização de água produzida para fins potáveis enfrente barreiras técnicas, econômicas e de aceitação pública, como os altos custos de tratamento e o potencial de toxicidade residual, há um movimento crescente em direção ao uso não potável quando respaldado por monitoramento, gestão de riscos e base normativa robusta (SPE, 2016).

Apesar do potencial de aproveitamento agrícola, ainda existe certo receio quanto ao uso da água produzida de petróleo no Brasil, especialmente em função de preocupações ambientais e sanitárias associadas à sua composição físico-química. No entanto, esse receio tem sido gradualmente mitigado à medida que se consolidam avanços nos processos de tratamento e no arcabouço regulatório que disciplina seu descarte e uso.

No contexto normativo brasileiro, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) regula tanto o lançamento de efluentes tratados quanto a proteção do solo que poderá receber esses efluentes. A Resolução CONAMA nº 430/2011 estabelece as condições e padrões para o lançamento de efluentes em corpos receptores, definindo limites para parâmetros físicos, químicos e biológicos que um efluente tratado deve atender antes de ser descartado no ambiente. Já a Resolução CONAMA nº 420/2009 dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o monitoramento, prevenção e controle da contaminação do solo e das águas subterrâneas,

incluindo a exigência de programas de monitoramento contínuo em áreas com potenciais fontes de contaminação (CONAMA, 2011).

Nesse sentido, se a água produzida, após tratamento adequado, atende aos padrões ambientais exigidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011 para efluentes, pode-se inferir que, sob monitoramento compatível com a Resolução CONAMA nº 420/2009 para solos que receberão esse efluente tratado, seu uso pode ser estendido para aplicações agrícolas, especialmente aquelas não voltadas diretamente ao consumo humano. De acordo com a Agência Nacional de Águas, o reúso agrícola de águas residuárias tratadas pode ser considerado ambientalmente seguro quando há monitoramento contínuo da qualidade da água, do solo e das culturas irrigadas (ANA, 2020).

Diretrizes internacionais consolidadas, como as apresentadas no relatório *Water Quality in Agriculture: Risks and Risk Mitigation* da Food and Agriculture Organization of the United Nations e do International Water Management Institute (IWMI), enfatizam a importância da avaliação integrada da qualidade da água, do solo e dos riscos associados ao seu uso em agricultura. Essas diretrizes estabelecem parâmetros de avaliação de qualidade da água irrigada (incluindo aspectos físicos, químicos e microbiológicos) e sugerem medidas de mitigação de riscos, especialmente em contextos de uso de águas alternativas ou salobras, sempre orientadas pela sustentabilidade e pela proteção da saúde humana e ambiental (DRECHSEL *et al.*, 2023).

Adicionalmente, estudos indicam que o uso controlado da água produzida tratada pode contribuir para a redução da pressão sobre mananciais convencionais, particularmente em regiões semiáridas, onde a disponibilidade hídrica é limitada. Assim, a aplicação dessa água na irrigação de espécies vegetais nativas e cultivos comerciais não alimentícios configura-se como uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente responsável, desde que respaldada por critérios normativos, monitoramento ambiental e manejo agrônômico adequado (VEIL; PUDER; ELCOCK, 2004).

Dessa forma, o aproveitamento da água produzida de petróleo tratada para fins de irrigação insere-se em uma perspectiva de economia circular e sustentabilidade, alinhando a gestão de resíduos da indústria petrolífera às demandas hídricas da agricultura no semiárido brasileiro.

O Amido da Mandioca como Fonte de Etanol

O uso da mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) como matéria-prima para a produção de etanol não constitui uma alternativa recente no contexto da bioenergia. Registros históricos apontam que essa possibilidade já foi considerada na década de 1970, especialmente durante a crise internacional do petróleo, período em que o Brasil instituiu o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) com o objetivo de diversificar a matriz energética e reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Naquele cenário, estudos iniciais evidenciaram que o etanol obtido a partir da mandioca apresentava qualidade química adequada e desempenho satisfatório como combustível, revelando seu potencial técnico como fonte alternativa de energia renovável.

Do ponto de vista tecnológico, a mandioca destaca-se pelo elevado teor de amido presente em suas raízes, o que favorece sua conversão em açúcares fermentescíveis e, conseqüentemente, em etanol. Trabalhos como o de CAMILI & CABELLO (2012) demonstraram a viabilidade da produção de etanol a partir da polpa de mandioca por meio de processos de hidrólise e fermentação alcoólica, obtendo rendimentos expressivos e confirmando o potencial dessa cultura para fins energéticos. Resultados semelhantes também são relatados em estudos mais recentes, que apontam a mandioca como uma matéria-prima eficiente, especialmente em regiões tropicais e semiáridas, onde apresenta boa adaptação agrônômica (SILVA *et al.*, 2019).

Além do aproveitamento direto das raízes, pesquisas atuais têm ampliado o enfoque para o uso de resíduos gerados no processamento da mandioca, como farelos, bagaços e cascas. Esses subprodutos apresentam quantidades significativas de amido residual e frações lignocelulósicas, que podem ser convertidas em etanol por meio de rotas tecnológicas adequadas, contribuindo para o aumento da eficiência do sistema produtivo e para a redução de impactos ambientais (MARTINEZ, 2017). Segundo o referido autor, a valorização dos resíduos agroindustriais da mandioca representa uma estratégia promissora para a produção de etanol de segunda geração.

Apesar do potencial técnico amplamente comprovado, a adoção da mandioca como matéria-prima para a produção de etanol em larga escala ainda enfrenta limitações. Entre os principais entraves destacam-se dificuldades logísticas relacionadas ao fornecimento contínuo de matéria-prima, à perecibilidade das raízes, à necessidade de infraestrutura específica para processamento e à forte competitividade da cana-de-açúcar, cuja cadeia produtiva se encontra mais consolidada no Brasil (CAMILI; CABELLO, 2012; SILVA *et al.*, 2019). Esses fatores

explicam, em parte, a menor participação da mandioca na matriz de biocombustíveis, apesar de suas reconhecidas vantagens agronômicas e energéticas.

Estratégias para a Descarbonização e Economia de Baixo Carbono

A economia circular configura-se como um modelo econômico alternativo ao sistema linear tradicional, baseado nas etapas de extrair, produzir e descartar. Segundo PALACIOS & OLALLA (2021), esse modelo busca manter materiais e energia em ciclos fechados, transformando resíduos em recursos por meio de práticas como reutilização, reciclagem e recuperação. O objetivo central é reduzir a geração de resíduos, o consumo de recursos naturais e os impactos ambientais associados aos sistemas produtivos, promovendo maior eficiência no uso de materiais e energia.

Nesse contexto, a economia circular, concebida como um sistema que reduz desperdícios e intensifica a reutilização de recursos, desempenha um papel relevante na redução das emissões de carbono e na melhoria da capacidade produtiva com menor intensidade de carbono. De acordo com CUI & ZHANG (2022), indicadores associados à economia circular influenciam positivamente a produtividade do carbono em diferentes escalas, sugerindo que políticas orientadas à circularidade contribuem de forma significativa para o alcance de metas de pico de emissões e neutralidade climática. Esses resultados reforçam a importância da economia circular como instrumento estratégico na transição para uma economia de baixo carbono.

Dentro desse arcabouço, YANG *et al.* (2023) analisam estratégias de economia circular aplicáveis à mitigação das mudanças climáticas e destacam a produção de biochar a partir de resíduos como uma abordagem alinhada a esse paradigma. A utilização de resíduos agrícolas, florestais ou de biomassa cultivada em terras marginais para a produção de biochar permite evitar a competição com áreas destinadas à produção de alimentos, ao mesmo tempo em que gera produtos de maior valor ambiental. O biochar é apontado como uma via eficaz para a redução de emissões de gases de efeito estufa, uma vez que possibilita a remoção de carbono da atmosfera e seu armazenamento de forma estável e duradoura. Exemplos apresentados pelos autores, como o uso de biochar produzido a partir de salgueiros cultivados em terras marginais na Finlândia, demonstram a capacidade dessa tecnologia de compensar parte das emissões agrícolas, evidenciando seu potencial mitigador em sistemas circulares de uso de recursos.

Embora o foco principal do estudo de YANG *et al.* (2023) não seja exclusivamente o biochar, os autores inserem essa tecnologia em um conjunto mais amplo de estratégias de economia circular voltadas ao enfrentamento das mudanças climáticas. A conversão de resíduos em biochar está alinhada aos princípios fundamentais da circularidade, como o fechamento de ciclos materiais, a redução de resíduos e o aproveitamento de subprodutos, contribuindo para a transição para uma economia de baixo carbono ao capturar e reter carbono em formas estáveis, reduzir a dependência de insumos fósseis e aumentar a eficiência no uso de recursos materiais e energéticos.

Por fim, PALACIOS & OLALLA (2021) ressaltam que, embora a economia circular seja amplamente associada à sustentabilidade, sua implementação não garante automaticamente resultados sustentáveis. Torna-se, portanto, essencial a avaliação criteriosa dos impactos ambientais, econômicos e sociais das estratégias adotadas. Nesse sentido, os autores destacam a importância do uso de indicadores de sustentabilidade, como eficiência no uso de recursos e redução da pegada ambiental, para assegurar que modelos circulares de gestão de resíduos e tecnologias associadas, como o biochar, contribuam efetivamente para o desenvolvimento sustentável e para a consolidação de uma economia de baixo impacto ambiental.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Área experimental

Os experimentos foram realizados na Fazenda Experimental Rafael Fernandes (5°03'31,00"S, 37°23'47,57"W e 80 m de altitude), pertencente à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), localizada no distrito de Alagoinha, zona rural do município de Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil, na safra agrícola 2023/24.

Figura 1. Imagem aérea da área experimental.



Fonte: google maps, 2024.

O clima local, segundo a Classificação de Köppen, é do tipo BSh (ALVARES *et al.*, 2013), caracterizada como sendo seco e muito quente, com duas estações climáticas: uma chuvosa que compreende os meses de fevereiro a maio, e outra seca que vai de junho a janeiro conforme observa-se na tabela 1.

Tabela 1. Precipitação pluviométrica acumulada por mês (mm), com suplementação hídrica por lâmina de irrigação ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$).

	2024					2025					
	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Ago	Set
Precipitação (mm)											
				102	82	60	77,4	50,6	27,5		
Suplementação hídrica ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)											
L1	300	278	300	171	107	128	171	85	107	171	171
L2	600	557	600	342	214	257	342	171	214	342	342
L3	900	835	900	514	321	385	514	257	514	514	514
L4	1200	1114	1200	685	428	514	685	342	685	685	685

Lâmina: L1- 25% ETc, L2 - 50%ETc, L3 - 75% ETc, L4 - 100% ETc.

O solo foi classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico, segundo os critérios da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Solos), sendo equivalente à classe Ultisol na classificação internacional Soil Taxonomy. (SANTOS *et al.*, 2025). Foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m para caracterização química e física (Tabela 2).

Tabela 2. Análise química e física do solo das áreas experimentais anterior a montagem dos experimentos (profundidades 0- 0,20; 0,24-0,40 m).

Perfil do solo (m)	pH	CE	P	K	Na	Ca ²	Mg	Al	H+Al
		uS/cm	----- mg dm ⁻³ -----			-----cmolc dm ⁻³ -----			
0,0 - 0,20	5,22	149	12	111	14	0,61	0,86	0,3	1,0
0,20 - 0,40	5,42	58	6	74	14	0,65	0,43	0,1	1,0
		ΘCC		ΘPMP			Areia	Silte	Argila
							-----Kg kg ⁻¹ -----		
0,0 - 0,20		0,11		0,06			0,78	0,12	0,10
0,20 - 0,40		0,22		0,11			0,76	0,11	0,13

ΘCC- capacidade de campo; ΘPMP- ponto de murcha permanente.

Coletou-se amostras indeformadas de solo nas camadas de 20, 40 e 60 cm utilizando anéis volumétricos de aproximadamente 50 cm³, a fim de verificar a umidade do solo e garantir a eficácia dos tratamentos aplicados. As amostras foram levadas ao laboratório para limpeza. Com esse material, as amostras foram pesadas para determinar a densidade do solo (Ds) e submetidas a tensões de 1, 3, 6 e 10 kPa em uma mesa de tração e de 30, 60, 100, 300 e 1500 kPa em uma câmara de Richards para determinação da umidade volumétrica. Conforme metodologia descrita por QUEIROZ *et al* (2023). Os dados foram apresentados para as camadas de 0–20 cm e 20–40 cm.

No início do experimento, tensiômetros foram instalados a 20, 40 e 60 cm de profundidade, representando a camada de 0–20 cm, e a 20-40 cm e 40–60 cm, para verificar a retenção de água no solo. Registrou-se a altura da coluna de água nos tensiômetros e mediu-se a tensão com um tensímetro, sempre antes do início da irrigação. Com base na umidade volumétrica observada, obtive-se curvas de retenção de água nessas camadas. As curvas, bem como os parâmetros determinados pela equação de Van Genuchten, podem ser observadas na Figura 2.

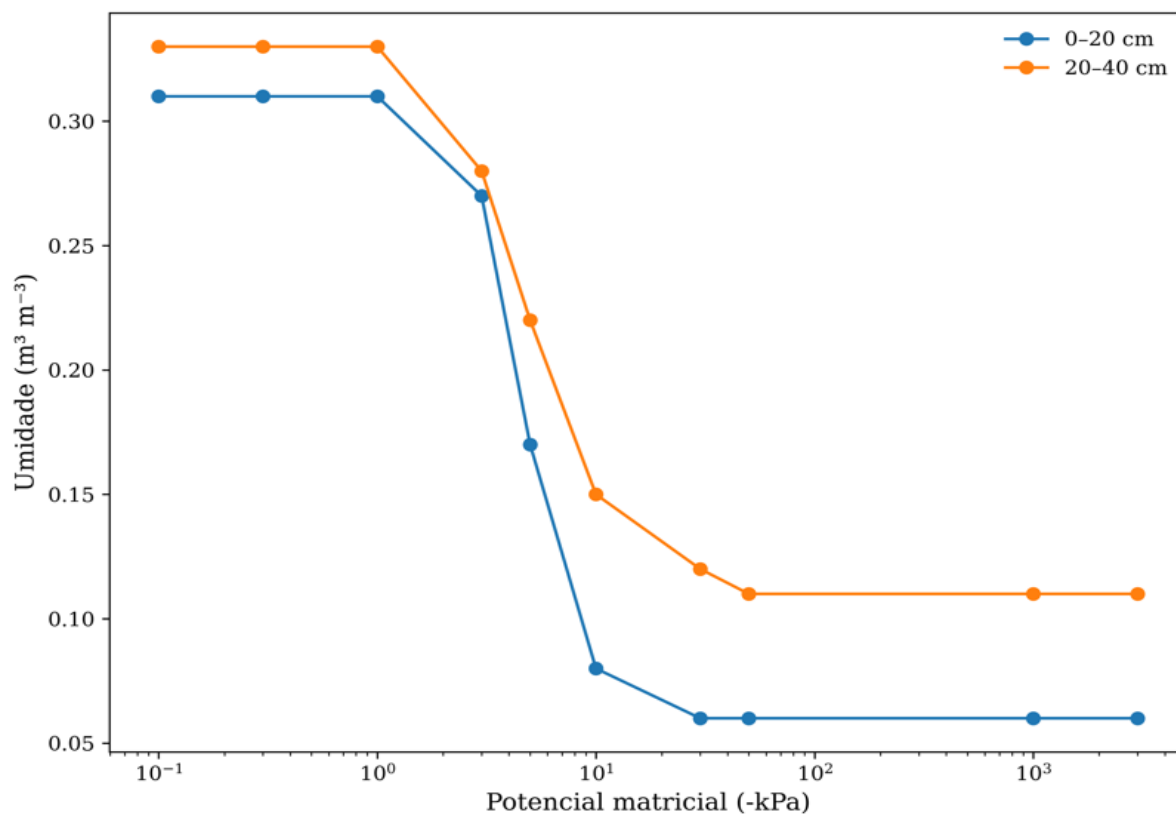


Figura 2. Curvas de retenção nas camadas de 0–2 e 20–40 cm observadas na área experimental

Características das cultivares utilizadas

A cultivar Recife caracteriza-se por apresentar raízes com casca externa de coloração marrom-escuro; o córtex da raiz apresenta coloração branca ou creme, enquanto a polpa é predominantemente branca, atributo associado à ampla aceitação para consumo in natura e ao processamento, especialmente para fins alimentares e industriais. Essas características morfológicas conferem à cultivar Recife um padrão visual típico das mandiocas de mesa, refletindo seu potencial de uso tanto para o consumo humano quanto em sistemas produtivos regionais.

A cultivar Venâncio apresenta raízes com casca externa de coloração marrom-escuro, característica comum às mandiocas de mesa adaptadas às condições do Semiárido, conferindo proteção mecânica e resistência durante a colheita e o manuseio. O córtex da raiz possui coloração rosada, atributo morfológico distintivo da cultivar, que facilita sua identificação em campo e no processamento pós-colheita. A polpa é de coloração branca, característica amplamente associada à boa aceitação para consumo in natura e ao uso agroindustrial, especialmente para produtos derivados do amido.

Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, em esquema fatorial 4×2 , com 4 repetições. Foram aplicadas quatro lâminas de irrigação ($L1 = 0,25 \text{ ETc}$; $L2 = 0,50 \text{ ETc}$; $L3 = 0,75 \text{ ETc}$; e $L4 = 1,00 \text{ ETc}$), e duas concentrações de sais da água de irrigação (condutividade elétrica de $0,8$ e $4,8 \text{ dS m}^{-1}$, respectivamente, água natural de poço oriunda do aquífero arenito Açu e água produzida sintética obtida a partir de adição de sais para simular água produzida do petróleo da região de Mossoró, e que é similar a águas de poços obtidas no aquífero calcário Jandaíra na região de Mossoró. Os tratamentos foram introduzidos após 30 dias do plantio, quando se estabeleceu o estande.

Condução do experimento

Foram realizados dois experimentos, um com cada cultivar, simultaneamente um ao lado do outro. Cada parcela experimental foi representada por 3 fileiras de plantas de aproximadamente $6,0 \text{ m}$ de comprimento, contendo 30 plantas. Desta forma, cada experimento consistiu em 32 parcelas experimentais.

O plantio foi feito de forma manual, com uma maniva de $0,13 \text{ m}$ de comprimento e 5-7 gemas por cova, a uma profundidade de $0,07 \text{ m}$. O espaçamento empregado foi de $1,40 \text{ m}$ entre fileiras de plantas por $0,60 \text{ m}$ entre plantas na mesma linha, com densidade de $11.904,7$ plantas por hectare.

Manejo de irrigação

As irrigações foram realizadas pela estimativa da evapotranspiração da cultura, utilizando a estimativa do coeficiente de cultura dual (Pereira *et al.*, 2025) e ajustada pelo monitoramento da umidade do solo no decorrer do experimento nas parcelas, considerando a lâmina para atender a evapotranspiração potencial da cultura ($L4-100\% \text{ ETc}$) e para o uso da água doce ($S1- 0,8 \text{ dS m}^{-1}$), mantendo o solo a uma tensão entre a capacidade de campo do solo e a umidade crítica, usando o fator de disponibilidade hídrica de $0,4$, equivalente a uma tensão de 20 kPa . A curva do coeficiente da cultura (Kc) estimada para a cultura da mandioca está apresentada na Figura 3.

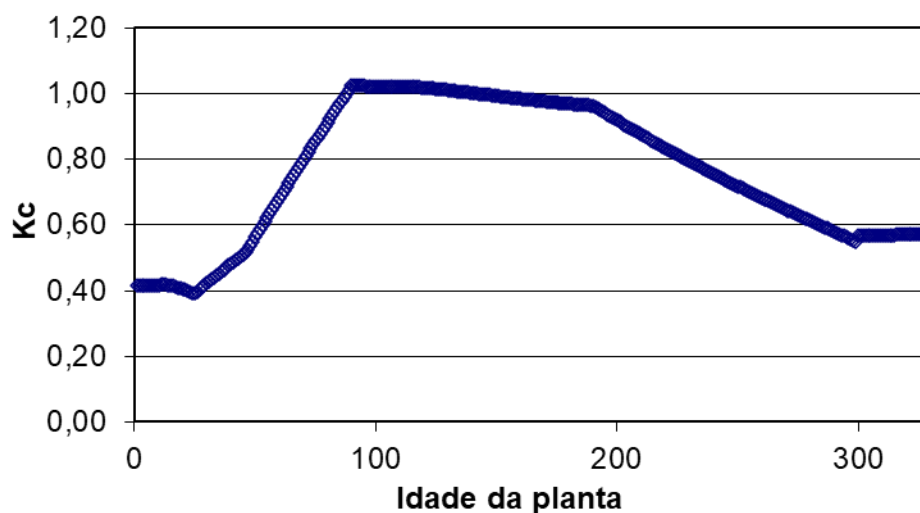


Figura 3. Curva de Kc estimada para a cultura da mandioca par as condições de plantio

As diferentes águas de irrigação foram distribuídas por tubulações em PVC de 50mm e as lâminas de irrigação de 25%, 50%, 75% e 100% da ETc sendo controladas pela utilização de fitas com gotejadores espaçados de 40, 20, 40+20 e 20+20 cm, respectivamente, com vazão nominal dos emissores de 1,6 L h⁻¹ (Figura 4).

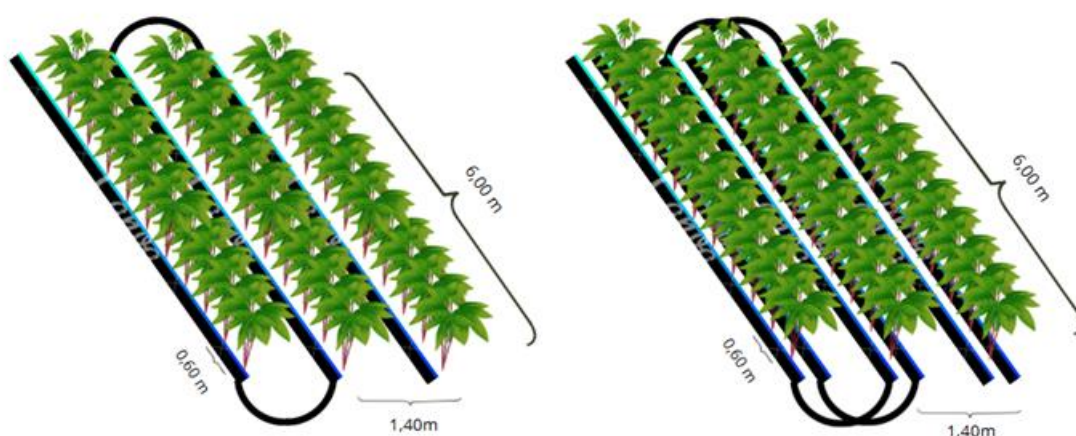


Figura 4. Distribuição das lâminas de irrigação nas parcelas. Lâminas de 25 e 50% da ETc com mangueira em fileira simples, lâminas de 75 e 100% da ETc, com mangueira em fileira dupla.

Preparo da água de irrigação

Devido à natureza alimentícia da cultura e para garantir a segurança dos ensaios, utilizou-se água produzida de petróleo (S2) sintética simulando os padrões de água produzida de petróleo apresentados por CRUZ *et al* (2025). A solução foi formulada para mimetizar a salinidade característica da água produzida de petróleo real. O uso de "água sintética" foi para

simular as propriedades da água produzida real (como salinidade) sem os riscos biológicos ou a instabilidade da amostra real, especialmente quando se está testando algo relacionado a alimentos (como o uso de efluentes tratados na agricultura ou bioprocessos). como no caso de usar a macaxeira, variedade muito utilizada para alimentação humana e animal.

Para o preparo da Água produzida sintética, foram utilizados os sais de NaCl, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e Água mãe, dissolvidos em água de poço, na proporção de 7:2:1, obedecendo-se à relação entre a condutividade elétrica da água de irrigação (CEa) e sua concentração ($\text{mmolc L}^{-1} = \text{CE} \times 10$), extraída de RHOADES *et al.*, (1992).

Tabela 3. Análise química da água de irrigação.

	pH	CE dS m^{-1}	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	CO_3^{2-}	HCO_3^-	RAS	Dureza mg L^{-1}
			----- mmolc L^{-1} -----								
S1	7,90	0,81	0,46	2,19	3,21	2,59	4,40	0,13	4,06	1,29	290
S2	7,70	4,80	0,62	26,77	10,60	3,32	44,00	0,12	4,05	10,1	696

Preparo do solo e adubação

O preparo do solo foi realizado por meio de gradagem pesada, com o objetivo de incorporar o material vegetal remanescente da área em pousio, seguida de gradagem niveladora, destinada à uniformização da superfície do solo, previamente à instalação do experimento. A adubação foi efetuada conforme as recomendações de SILVA & GOMES (2008), com base nos resultados da análise de solo. Na fundação foi aplicado 280 kg ha^{-1} da formulação 6-24-12, e em fertirrigação aplicou-se $73,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de ureia, 20 kg ha^{-1} de KCl e 25 kg ha^{-1} de K_2SO_4 .

Avaliação da produtividade de biomassa da parte aérea

Foram coletadas duas plantas inteiras de cada subparcela nos meses 6º, 8º, 10º, e 11º mês por parcela, selecionadas aleatoriamente no início do cultivo, para avaliação das seguintes características: matéria seca das folhas (MSF, kg planta^{-1}) e caule (MSC, kg planta^{-1}) obtidas a partir da medição do teor de matéria seca determinada em sub-amostras dos órgãos das plantas coletadas. As amostras foram secadas em estufa de circulação forçada a 65°C até a estabilização do peso. Com a massa fresca de folha e caule, média das duas plantas e teor de matéria seca medida nas sub-amostras estimou-se a MSF e MSC, e a matéria seca da parte aérea da planta

(MSP, kg planta⁻¹) foi obtida pela soma das matérias seca dessas partes da planta. Em seguida, estimou-se a produção por hectare, multiplicando pela densidade de plantio.

Produtividade de raízes

A produtividade de raízes comerciais foi obtida pela pesagem de raízes das plantas colhidas (2 plantas por parcela no 6º, 8º e 10º mês, e 10 plantas no 11º mês), com comprimento superior a 0,10 m e diâmetro superior a 0,02 m, sendo extrapolados os dados para t ha⁻¹, multiplicando a produção média por planta pela densidade de plantas de 11.905 plantas.

Teor de matéria seca

Também estimou-se a produção de matéria seca de raízes (MRS), conforme metodologia descrita por DEUS (2019) com adaptações, medida a partir do rendimento de raízes comerciais e o teor de MS determinada numa amostra de raízes obtida de cada parcela.

Teor e rendimento de amido

O teor de amido na matéria seca das raízes foi determinado conforme a metodologia proposta por DEUS (2019), com adaptações. Amostras de farinha (20 mg) foram submetidas à cozimento em estufa de circulação forçada a 90° por 60 minutos, resfriada e adicionada uma solução de cloreto de cálcio 40% com pH 3,0 e ácido acético 0,033 mol L⁻¹ e posterior aquecimento em banho-maria por 15 minutos. Após resfriamento, procedeu-se à adição de reagentes iodeto/iodato de potássio 0,0017 mol L⁻¹ para desenvolvimento da coloração. A quantificação do amido foi realizada por espectrofotometria, com leitura da absorbância a 700 nm, comparando-se as amostras a um branco analítico.

O rendimento de amido foi obtido por meio da equação 1:

$$\text{Amido (t ha}^{-1}\text{)} = \text{Teor de Amido(\%)} \times \text{MSR(t ha}^{-1}\text{)} \quad (1)$$

Estimativa de produção de Etanol

A obtenção do etanol neste trabalho baseia-se na estimativa dos rendimentos estequiométricos médios do processo industrial, onde o etanol é obtido a partir da hidrólise do amido em açúcares fermentescíveis e posterior fermentação alcoólica empregando as equações 2 e 3.

$$E = \frac{T}{0,789} \times 1000 \quad (2)$$

$$Et = E \times \text{MSR} \quad (3)$$

Em que:

E – Etanol, em L t⁻¹;

T – Teor de amido, em %;

Et – Etanol, em L ha⁻¹; e

MSR - Matéria seca de raízes, em t ha⁻¹.

Tonelada de CO₂ equivalente

A estimativa de tCO₂/eq se deu a partir da produção de biocarvão obtido através da pirolise lenta da biomassa seca das manivas. Para a obtenção da estimativa de tCO₂/eq utilizou-se a equação 4.

$$tCO_{2/eq} = Est \times 3,67 \quad (4)$$

Em que:

Est – Estoque de carbono, em tC ha⁻¹;

Inicialmente foi determinado o Carbono Orgânico Total (COT) conforme a metodologia descrita por TEDESCO *et al.* (1995) com adaptações, baseada na oxidação úmida da matéria orgânica pelo dicromato de potássio em meio ácido, com posterior quantificação por titulação. Inicialmente, amostras de biocarvão foram pesadas (0,01 g) em erlenmeyer de 250 mL. Em seguida, adicionaram-se 5 mL de solução de dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇) 1,0 mol L⁻¹ e 7,5 mL de ácido sulfúrico concentrado (H₂SO₄), promovendo a oxidação do carbono orgânico presente na amostra.

Após repouso para digestão, o excesso de dicromato não reduzido foi titulado com solução de sulfato ferroso amoniacal (Fe(NH₄)₂(SO₄)₂·6H₂O) 0,5 mol L⁻¹, utilizando-se difenilamina como indicador. A diferença entre o volume gasto na titulação do branco e da amostra foi utilizada para o cálculo do teor de carbono orgânico, expressando-se os resultados em g kg⁻¹.

Análise estatística

Os dados foram analisados por meio de análise de variância (ANOVA), utilizando-se modelos lineares mistos, implementados no software R script, considerando-se um delineamento em blocos ao acaso, em esquema fatorial 4 × 2 × 4, correspondente a quatro lâminas de irrigação, duas salinidades da água e quatro tempos de colheita. O modelo estatístico

incluiu os efeitos de blocos, dos fatores principais e de suas interações de segunda e terceira ordem. Os efeitos foram avaliados por meio de ANOVA do tipo III, adotando-se o teste F a 5% ($p \leq 0,05$) de probabilidade. Quando identificados efeitos significativos, foram estimadas médias marginais ajustadas (Estimated Marginal Means – EMMs) para interpretação dos efeitos dos fatores e de suas interações.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Respostas da cultivar. Recife a qualidade da água e lâminas de irrigação

A análise de variância (ANOVA tipo III) evidenciou que a lâmina de irrigação (L) foi o fator de maior influência sobre a maioria das variáveis avaliadas na variedade Recife, especialmente sobre a produtividade de raízes frescas (RAIZ), matéria seca de raízes (Raiz MS), produtividade de amido e eficiência do uso da água (EUA). Além disso, foram observadas interações significativas entre lâmina e salinidade (L×S), lâmina e tempo de colheita (L×T) e, para a variável RAIZ, interação tripla (L×S×T), indicando que os fatores não atuam de forma independente (Tabela 4).

Esses resultados confirmam que o desempenho produtivo da variedade Recife depende fortemente da combinação entre volume de água aplicada, qualidade da água e época de colheita, o que reforça a importância de análises multifatoriais em ambientes semiáridos.

Tabela 4. P-valores da ANOVA Tipo III para todas as variáveis analisada da cultivar Recife.

Variável	Bloco	L	S	T	L×S	L×T	S×T	CV(%)
Raiz t ha-1	0,185	<0,001***	0,196ns	0,747ns	0,001**	0,003**	0,780ns	29,21
Raiz MS	0,120	<0,001***	0,084ns	0,898ns	0,008**	0,018*	0,892ns	14,1
Amido t ha-1	0,039	<0,001***	0,086ns	0,832ns	0,008**	0,071ns	0,853ns	21,03
EUA	0,046	<0,001***	0,002**	0,006**	0,069ns	0,062ns	0,502ns	39,94
Água m³ t amido-1	0,010	0,059ns	0,505ns	0,833ns	0,010**	0,456ns	0,981ns	43,27
Biomassa t ha-1	<0,00	0,399ns	0,971ns	0,111ns	0,585ns	0,739ns	0,750ns	49,32
Biomassa MS	<0,00	0,829ns	0,962ns	0,035*	0,122ns	0,710ns	0,858ns	41,66
tCO2/eq	0,044	0,897ns	0,997ns	0,047*	0,413ns	0,440ns	0,708ns	21,77

p < 0,001 Altamente significativo (***) Evidência MUITO FORTE de efeito real

p < 0,01 Muito significativo (**) Evidência FORTE de efeito real

p < 0,05 Significativo (*) Evidência MODERADA de efeito real

p ≥ 0,05 Não significativo (ns) SEM evidência suficiente de efeito real.

Nota: A interação tripla L×S×T também é significativa para RAIZ (p=0,007).

O efeito de blocos foi significativo para algumas variáveis, indicando a existência de variabilidade espacial na área experimental. Esse comportamento é esperado em experimentos de campo e confirma a adequação do delineamento em blocos ao acaso, uma vez que a inclusão desse fator no modelo estatístico permitiu controlar variações ambientais não controláveis, aumentando a precisão das estimativas dos efeitos dos tratamentos e a confiabilidade das inferências estatísticas.

A lâmina de irrigação destacou-se como o fator de maior impacto sobre o desempenho da variedade Recife, apresentando efeito altamente significativo para a produtividade de raízes frescas, produtividade de matéria seca de raízes, produtividade de amido e eficiência do uso da água. Esses resultados indicam que o volume de água aplicado exerce influência direta tanto sobre o acúmulo de biomassa subterrânea quanto sobre a eficiência com que a água é convertida em produto agrícola. A ausência de efeito significativo da lâmina sobre a biomassa da parte aérea e sobre o teor de matéria seca da biomassa sugere que o incremento hídrico favorece principalmente o crescimento das raízes, característica desejável do ponto de vista agrônomo e comercial da cultura da mandioca.

Quando analisada de forma isolada, a salinidade da água apresentou efeito significativo apenas sobre a eficiência do uso da água, indicando que a qualidade da água interfere na relação entre produção e volume aplicado, mesmo quando não se observam diferenças estatisticamente significativas nas médias de produtividade. Entretanto, a ausência de significância da salinidade como efeito principal para as variáveis de produção não deve ser interpretada como ausência de impacto do estresse salino, uma vez que a presença de interações significativas entre lâmina e salinidade evidencia que os efeitos da salinidade são condicionados pelo nível de irrigação adotado.

O tempo de colheita influenciou significativamente ($p \leq 0,01$) de probabilidade na eficiência do uso da água, o teor de matéria seca da biomassa e o potencial de sequestro de carbono, indicando que, ao longo do ciclo da cultura, ocorrem alterações fisiológicas que afetam a alocação de biomassa e a eficiência produtiva. Por outro lado, a ausência de efeito principal significativo do tempo de colheita sobre a produtividade média de raízes sugere que, quando considerado isoladamente, o momento da colheita não resulta em diferenças consistentes de rendimento. No entanto, esse fator torna-se relevante quando analisado em interação com a lâmina de irrigação, conforme evidenciado pela significância da interação entre esses fatores.

A interação entre lâmina de irrigação e salinidade da água foi significativa para as principais variáveis de produção e para o consumo específico de água, demonstrando que o efeito da lâmina sobre a produtividade depende da qualidade da água utilizada. Esse resultado indica que aumentos na lâmina de irrigação não necessariamente resultam em incrementos produtivos quando se utiliza água com maior salinidade, podendo, inclusive, intensificar os efeitos negativos do estresse salino em função do maior aporte de sais no solo ao longo do ciclo da cultura.

A interação entre lâmina de irrigação e tempo de colheita também foi significativa para a produtividade de raízes e matéria seca, indicando que o tempo ótimo de colheita varia em função do nível de irrigação aplicado. Esse comportamento sugere que lâminas mais elevadas favorecem o prolongamento do ciclo para maximização do acúmulo de biomassa, enquanto lâminas reduzidas tendem a apresentar melhor desempenho relativo em colheitas mais precoces, especialmente sob condições de restrição hídrica.

Por fim, esses resultados confirmam a complexidade da resposta da cultura às condições de manejo hídrico e reforça a necessidade de análises integradas para a definição de estratégias de manejo mais eficientes. Em conjunto, os resultados da ANOVA tipo III demonstram que a lâmina de irrigação constitui o principal fator de controle da produtividade da variedade Recife, porém seus efeitos são fortemente modulados pela salinidade da água e pelo tempo de colheita, indicando que recomendações baseadas em efeitos isolados podem conduzir a decisões agronômicas inadequadas, sobretudo em ambientes com limitação hídrica e uso de águas de qualidade variável.

4.1.2 Produção de raízes da Cultivar Recife

4.1.2.1 Efeito da lâmina de irrigação sobre a Produtividade

As médias marginais (Tabela 5) foram estimadas da produtividade de raízes frescas da variedade Recife em função dos diferentes níveis de lâmina de irrigação. Observa-se que o aumento da lâmina promoveu incremento na produtividade média de raízes, evidenciando resposta positiva da cultura ao maior suprimento hídrico. A lâmina correspondente a 100% da evapotranspiração da cultura (L4) apresentou a maior produtividade média, alcançando 22,91 t ha⁻¹, superando as demais lâminas avaliadas e confirmando o efeito altamente significativo da lâmina de irrigação identificado na análise de variância.

Tabela 5. Produtividade de raízes frescas por nível de lâmina.

Lâmina	Média (t ha ⁻¹)	DP	IC95% inf	IC95% sup
L4 (100%)	22,91	11,05	19,08	26,74
L3 (75%)	17,77	8,50	14,83	20,71
L1 (25%)	15,77	5,03	14,03	17,50
L2 (50%)	15,45	5,95	13,39	17,51

DP – Desvio padrão, **IC95%inf** – intervalo de confiança inferior, **IC95%sup** – intervalo de confiança superior.
L1- 25% ETc, L2 - 50%ETc, L3 - 75% ETc, L4 - 100% ETc.

A lâmina de 75% da ETc (L3) apresentou produtividade intermediária, com média de 17,77 t ha⁻¹, sendo aproximadamente 29% inferior à observada em L4. Esse resultado indica que, embora a redução moderada da lâmina resulte em diminuição da produtividade, a cultura ainda mantém desempenho produtivo relativamente elevado, sugerindo certa capacidade de adaptação da variedade Recife a níveis intermediários de suprimento hídrico. As lâminas de 25% e 50% da ETc apresentaram produtividades médias semelhantes, com valores de 15,77 e 15,45 t ha⁻¹, respectivamente, indicando que, em condições de restrição hídrica mais acentuada, o incremento da lâmina de 25% para 50% não foi suficiente para promover ganhos expressivos de produtividade.

A amplitude dos desvios-padrão observados, especialmente nas lâminas mais elevadas, reflete a influência das interações entre lâmina, salinidade da água e tempo de colheita, previamente identificadas na ANOVA. Esse comportamento evidencia que, embora a lâmina de irrigação exerça influência direta sobre a produtividade média de raízes, a intensidade dessa resposta é fortemente condicionada pela qualidade da água utilizada e pelo momento da colheita. Assim, os efeitos da irrigação não podem ser interpretados de forma isolada, uma vez que resultam da interação entre múltiplos fatores de manejo e ambientais, corroborando os resultados reportados por SILVA *et al.* (2021), que destacam a dependência da resposta produtiva da mandioca à irrigação em função do regime hídrico e das condições de cultivo.

Do ponto de vista agrônomo, os resultados apresentados na Tabela 5 indicam que a aplicação de lâminas elevadas favorece a maximização da produtividade de raízes frescas da variedade Recife, desde que associada a condições adequadas de manejo, especialmente no que se refere à qualidade da água de irrigação. Contudo, a diferença relativamente pequena entre as produtividades obtidas com as lâminas de 25% e 50% da ETc sugere que, em cenários de escassez hídrica, a adoção de lâminas reduzidas pode ser uma estratégia viável para manutenção

de níveis mínimos de produção, ainda que com perdas em relação ao potencial máximo da cultura.

4.1.2.2 Efeito da interação Lâmina de Irrigação versus período de colheita sobre a Produtividade da cultivar Recife

A existência de interação significativa entre lâmina de irrigação e tempo de colheita na produção de raízes da cultivar Recife, conforme indicado pelo valor de $p = 0,003$, apresentada na Figura 5, demonstra que o efeito do tempo de colheita sobre a produtividade não é constante, variando de acordo com a lâmina aplicada.

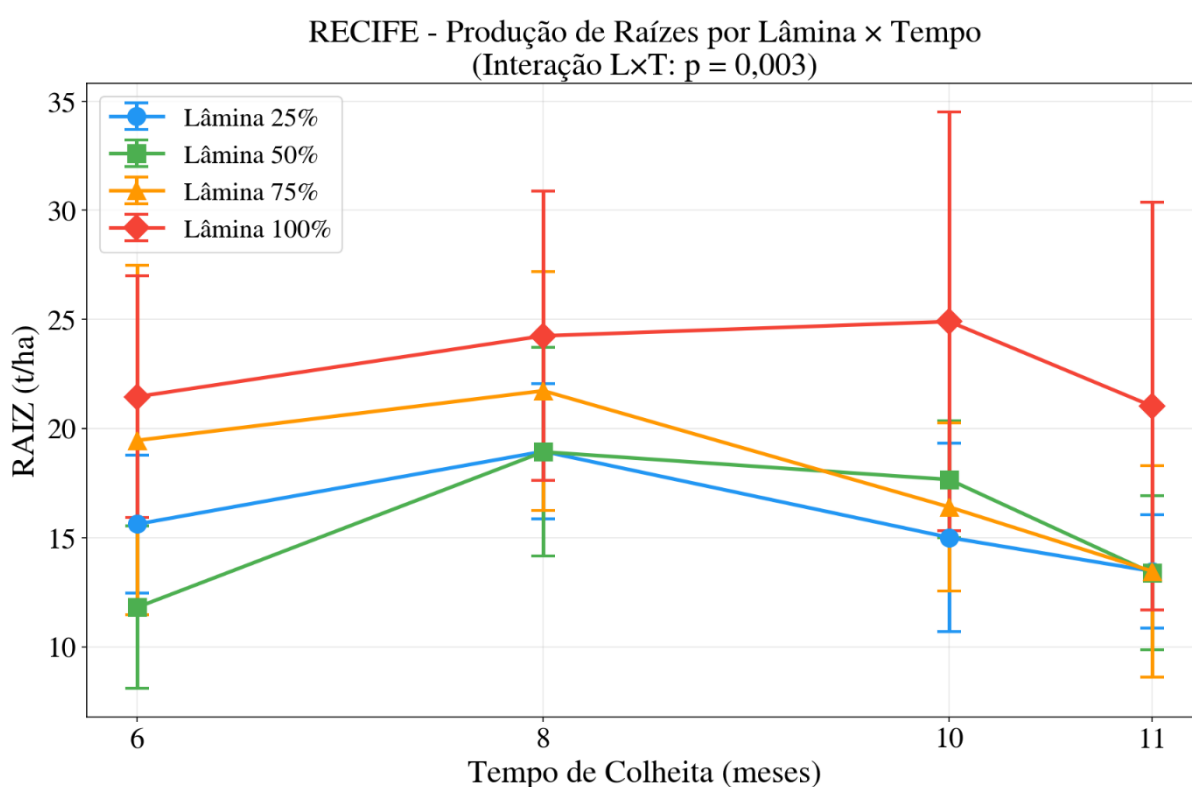


Figura 5. Produtividade média de raízes em função do tempo de colheita para diferentes lâminas de irrigação aplicada.

Observa-se que, sob a lâmina de 100% da ETc, a produtividade de raízes apresenta comportamento crescente do sexto ao décimo mês após o plantio, atingindo valores máximos próximos a 25 t ha⁻¹ aos 10 meses, seguido de uma leve redução aos 11 meses. Esse padrão sugere que, em condições de suprimento hídrico pleno, a cultivar Recife expressa maior potencial produtivo em colheitas intermediárias, particularmente em torno de 10 meses, período em que ocorre maior acúmulo de reservas nas raízes tuberosas. A redução observada aos 11

meses pode estar associada ao início de processos de senescência foliar ou redistribuição de assimilados para a parte aérea.

Estudos recentes indicam que o acúmulo de matéria seca e de amido nas raízes varia ao longo do ciclo da cultura e pode atingir um ponto ótimo antes de ocorrências de perdas fisiológicas ou redistribuição de reservas vegetativas, refletindo queda de produtividade em estágios mais avançados da colheita (ENESI *et al.*, 2022; SILVA *et al.*, 2023). Além de possíveis perdas relacionadas à mecanismos de deterioração fisiológica das raízes, associados à permanência prolongada no solo, que têm sido evidenciados como fatores que afetam a qualidade e o rendimento das raízes tuberosas (MENEGUCCI *et al.*, 2025).

Para a lâmina de 75%, o comportamento é semelhante até o 8º mês, com incremento da produtividade em relação aos 6 meses, seguido por queda acentuada a partir do 10º mês. Esse resultado indica que, embora a lâmina intermediária permita bom desempenho produtivo em colheitas mais precoces, a manutenção do ciclo por períodos mais longos, sob menor disponibilidade hídrica, limita o enchimento das raízes, possivelmente em função de estresse hídrico cumulativo ao longo do tempo.

As lâminas de 50% e 25% apresentam respostas distintas, porém convergentes em relação ao tempo. Em ambas, verifica-se aumento da produtividade até os 8º mês, seguido de redução progressiva do 10º ao 11º mês. Esse comportamento indica que, sob condições de restrição hídrica, o prolongamento do ciclo não resulta em ganhos produtivos e pode até comprometer o rendimento final. Assim, para lâminas reduzidas, colheitas mais precoces parecem ser mais adequadas para otimizar a produção de raízes, uma vez que à medida que a idade da planta aumenta, a produtividade pode não acompanhar proporcionalmente o acúmulo de biomassa e o teor de amido nas raízes (PANNAKKONG *et al.*, 2022; SILVA *et al.*, 2023).

De modo geral, a análise conjunta desses resultados demonstra que o tempo ótimo de colheita da cultivar Recife depende diretamente da lâmina de irrigação utilizada. Enquanto lâminas elevadas permitem estender o ciclo até aproximadamente 10 meses com ganhos produtivos, lâminas reduzidas favorecem colheitas antecipadas, especialmente aos 8 meses, evitando perdas associadas ao estresse hídrico prolongado. Esses achados têm implicações práticas importantes para o manejo da irrigação e da colheita, indicando que estratégias uniformes de tempo de colheita podem ser ineficientes quando aplicadas a diferentes níveis de suprimento hídrico.

Portanto, a interação $L \times T$ confirma que a maximização da produtividade da cultivar Recife requer ajustes simultâneos da lâmina de irrigação e do tempo de colheita, reforçando a ideia de que o manejo hídrico deve ser planejado de forma integrada ao ciclo da cultura, especialmente em ambientes semiáridos onde a disponibilidade de água é um fator limitante.

4.1.2.3 Interação entre Lâmina de Irrigação e Salinidade da Água na Produtividade da cultivar Recife

A produção de mandioca em ambientes semiáridos está fortemente condicionada não apenas à quantidade de água aplicada, mas também à sua qualidade, especialmente no que se refere à salinidade. Nesse contexto, a Figura 6 evidencia a existência de interação significativa entre esses fatores ($p = 0,001$), indicando que a resposta da cultura ao aumento da lâmina de irrigação depende diretamente da qualidade da água utilizada.

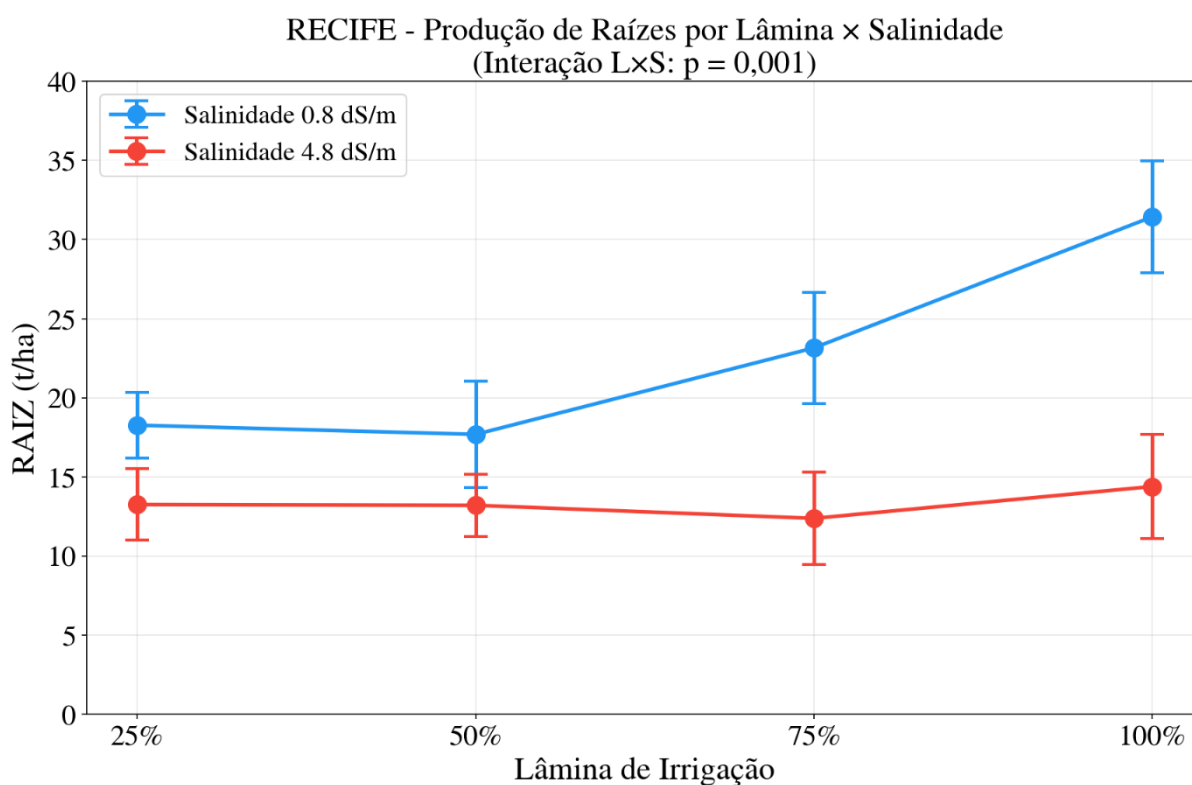


Figura 6. Produtividade de raízes, média de 4 épocas (6, 8, 10 e 11 meses), em função das lâminas, (% da ET_c), de irrigação quando se utiliza água doce ($CE = 0,8 \text{ dS m}^{-1}$) e água produzida sintética ($CE = 4,8 \text{ dS m}^{-1}$).

Sob condição de baixa salinidade ($0,8 \text{ dS m}^{-1}$), observa-se resposta positiva da produtividade ao incremento da lâmina de irrigação. A produção de raízes apresenta valores

semelhantes nas lâminas de 25% e 50% da ET_c, mas aumenta de forma expressiva a partir de 75%, atingindo o máximo na lâmina de 100%, com produtividade superior a 30 t ha⁻¹. Esse comportamento indica que, quando irrigada com água de boa qualidade, a cultivar Recife é altamente responsiva ao aumento do suprimento hídrico, conseguindo converter maiores volumes de água em acúmulo de biomassa radicular e expressando seu potencial produtivo. Isso está de acordo com estudos que indicam que a irrigação melhora significativamente tanto a produtividade de raízes quanto a biomassa total em mandioca (SILVA *et al.*, 2022). Evidências de meta-análises globais sugerem que a água com menor salinidade é associada a maiores rendimentos produtivos, destacando a importância da qualidade da água de irrigação para a eficiência produtiva (CHENG *et al.*, 2021).

Quando se utiliza água com elevada salinidade (por exemplo, 4,8 dS m⁻¹), como é o caso da água produzida de petróleo, a resposta produtiva da cultura é limitada, mantendo-se em patamares relativamente baixos mesmo com o aumento da lâmina aplicada. Esse comportamento é consequência do estresse salino, que intensifica o aporte de sais ao solo, impactando negativamente processos fisiológicos essenciais como a absorção de água e nutrientes, a condutância estomática e a assimilação de carbono, e que restringem a produtividade das raízes tuberosas (OLIVEIRA *et al.*, 2018; CRUZ *et al.*, 2017).

A comparação entre os dois níveis de salinidade evidencia que o efeito negativo da água salina se intensifica-se com o aumento da lâmina de irrigação. Em lâminas reduzidas, as diferenças de produtividade entre as salinidades são menores, enquanto em lâminas elevadas a discrepância se amplia de forma marcante, com a produtividade sob água de boa qualidade sendo mais que o dobro daquela obtida com água salina na lâmina de 100%.

A interação lâmina × salinidade demonstra que a cultivar Recife apresenta elevado potencial produtivo apenas quando há disponibilidade de água de boa qualidade, enquanto, em condições de água salina, o manejo deve priorizar lâminas moderadas ou reduzidas para mitigar os efeitos do estresse salino. Esse entendimento é fundamental para o planejamento racional da irrigação em regiões semiáridas, onde a limitação hídrica e a salinização das fontes de água representam desafios recorrentes à sustentabilidade da produção agrícola.

Houve interação significativa entre irrigação, salinidade e tempo de colheita para a produção de raízes da cultivar Recife aos 8 e 10 meses (L × S × T; $p = 0,007$), conforme evidenciado na Figura 7. Com baixa salinidade (CE 0,8 dS m⁻¹) o aumento da lâmina de

irrigação elevou consistentemente a produtividade, especialmente aos 10 meses, indicando que a maior disponibilidade hídrica favorece o acúmulo de biomassa radicular quando não há limitação osmótica significativa.

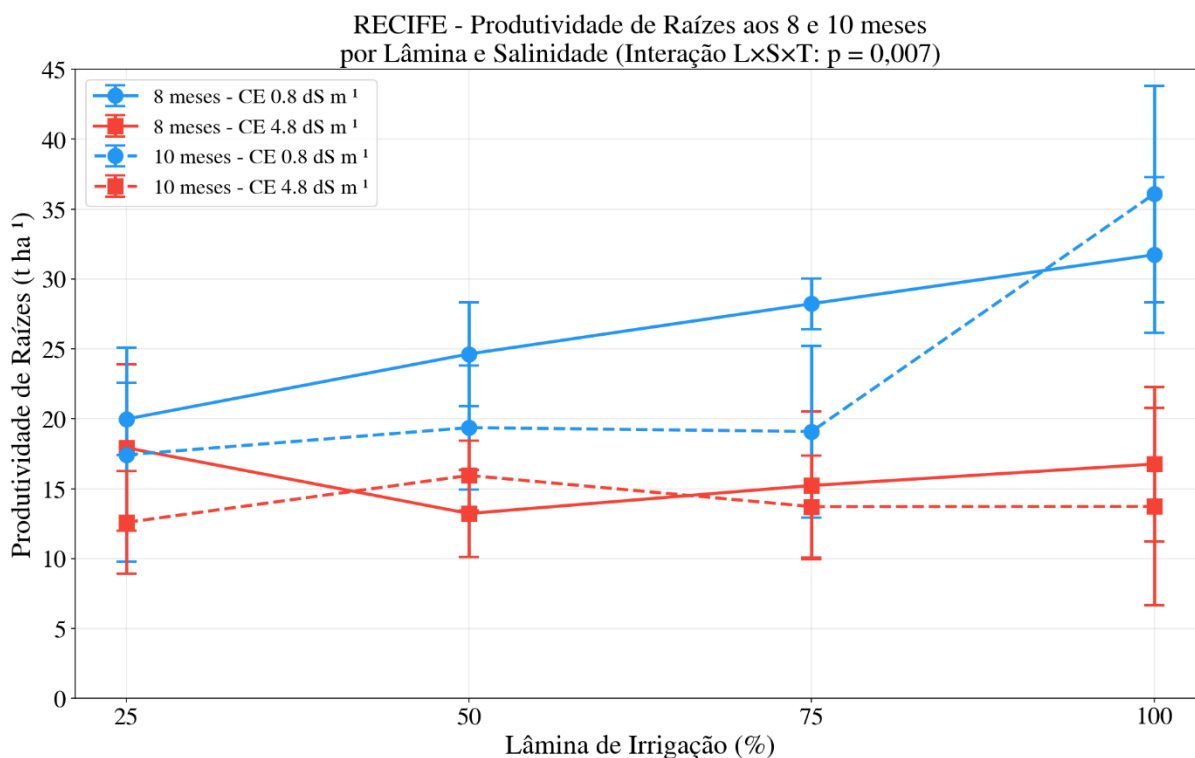


Figura 7. Produtividade de raízes, média de 2 épocas (8 e 10 meses), em função da lâmina de irrigação quando se utiliza água doce ($CE = 0,8 \text{ dS m}^{-1}$) e água produzida sintética ($CE = 4,8 \text{ dS m}^{-1}$).

Na colheita aos 8 meses, observou-se incremento consistente da produtividade de raízes com o aumento da lâmina de irrigação quando utilizada água de baixa salinidade ($CE = 0,8 \text{ dS m}^{-1}$). A produtividade passou de aproximadamente 20 t ha^{-1} na lâmina de 25% para valores superiores a 30 t ha^{-1} na lâmina de 100%, indicando elevada sensibilidade da cultura à disponibilidade hídrica nessa fase inicial do ciclo. Esse resultado sugere que, aos 8 meses, o crescimento das raízes ainda se encontra em fase ativa de expansão, sendo fortemente limitado pelo déficit hídrico, o que reforça a importância de uma irrigação adequada para antecipar ganhos produtivos.

Por outro lado, sob água salina ($CE = 4,8 \text{ dS m}^{-1}$), a produtividade aos 8 meses manteve-se inferior e com resposta mais discreta ao aumento da lâmina, variando em torno de 13 a 17 t ha^{-1} . Esse comportamento indica que, mesmo com maior aporte hídrico, o estresse

salino limita a eficiência fisiológica da planta, reduzindo a absorção de água e nutrientes e restringindo a translocação de fotoassimilados para as raízes. Assim, o aumento da lâmina não é suficiente para compensar os efeitos negativos da salinidade nessa fase do ciclo, podendo inclusive intensificar o acúmulo de sais no solo.

Na colheita aos 10 meses, a resposta da produtividade à lâmina de irrigação tornou-se ainda mais evidente sob água de baixa salinidade, com destaque para a lâmina de 100%, que apresentou os maiores valores produtivos, superiores a 35 t ha^{-1} . Esse resultado indica que o prolongamento do ciclo, associado a condições hídricas favoráveis, permite maior acúmulo de reservas nas raízes tuberosas, refletindo o potencial da mandioca para responder positivamente a ciclos mais longos quando não há restrições severas de água ou salinidade.

Entretanto, sob água salina, a produtividade aos 10 meses permaneceu relativamente estável e inferior, independentemente da lâmina aplicada, evidenciando que o estresse salino se intensifica ao longo do tempo. Esse efeito cumulativo da salinidade pode estar associado ao acúmulo progressivo de sais na zona radicular, à redução do potencial osmótico do solo e a alterações fisiológicas, como fechamento estomático e redução da fotossíntese, que comprometem o crescimento das raízes mesmo em condições de maior disponibilidade hídrica.

De forma geral, os resultados demonstram que a colheita aos 8 meses pode ser uma alternativa viável sob condições de baixa salinidade e lâminas adequadas, permitindo antecipação da produção com produtividade expressiva. Contudo, em ambientes com uso de água salina, o prolongamento do ciclo até 10 meses não resulta em ganhos proporcionais de produtividade, reforçando que o manejo da lâmina deve ser ajustado em função da qualidade da água e do tempo de colheita. Esses achados evidenciam a necessidade de estratégias integradas de manejo hídrico, especialmente em regiões semiáridas, para maximizar a produtividade da mandioca e reduzir os impactos negativos do estresse salino.

4.1.2.4 Interação entre Lâmina de Irrigação e Salinidade da Água e tempo de colheita na Produtividade da cultivar Recife

As médias marginais estimadas apresentadas no mapa de cores (Figura 8) mostram que, sob condições de baixa salinidade da água ($0,8 \text{ dS m}^{-1}$), a produtividade de raízes aumenta de forma expressiva com o incremento da lâmina de irrigação. Nessa condição, a lâmina correspondente a 100% da ET_c proporcionou a maior produtividade média, atingindo $31,43 \text{ t ha}^{-1}$, seguida pelas lâminas de 75%, 25% e 50% da ET_c . Esse comportamento indica que,

quando a água apresenta boa qualidade, o aumento do suprimento hídrico favorece o crescimento e o acúmulo de biomassa nas raízes, permitindo que a variedade Recife expresse seu elevado potencial produtivo.

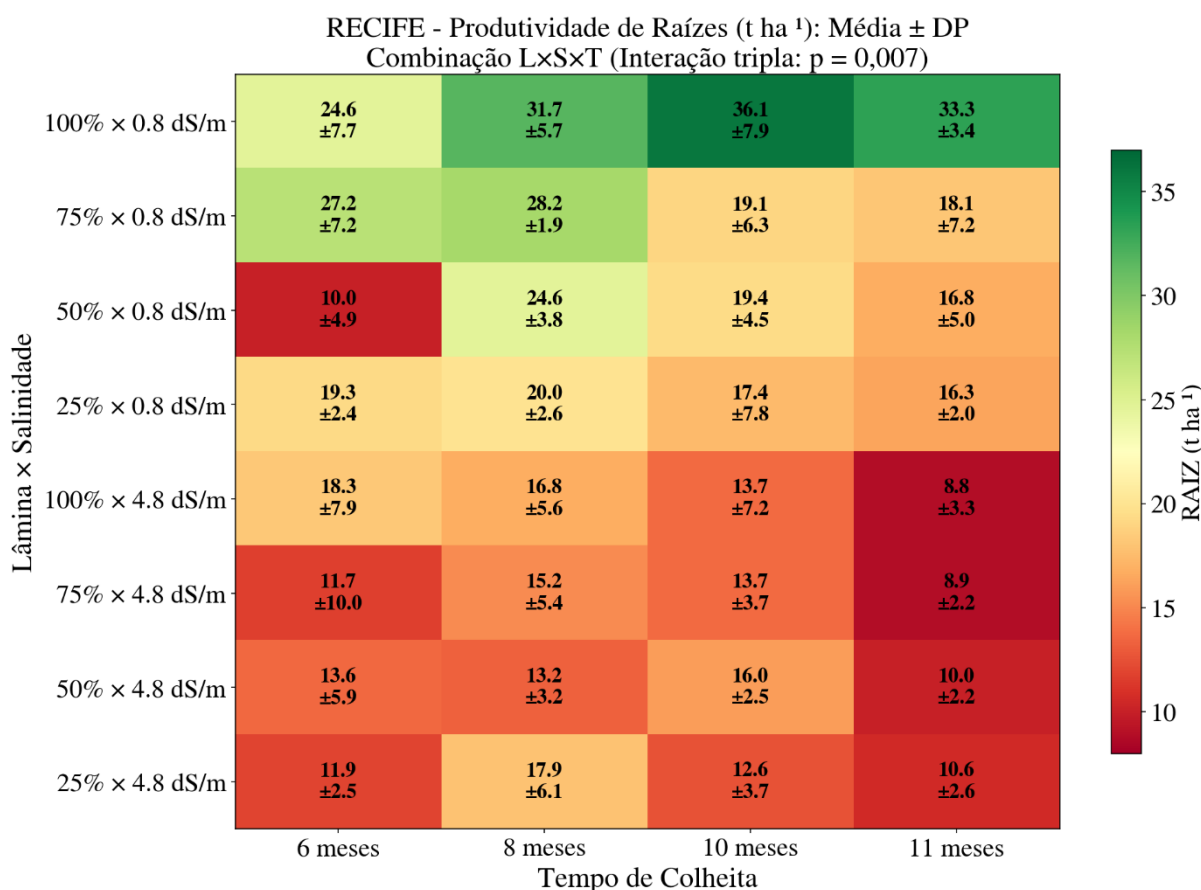


Figura 8. Médias estimadas da produtividade de raízes da cultivar Recife para a combinação dos fatores Salinidade, Lâmina e Tempo de colheita).

Em contraste, quando se utiliza água com maior salinidade (4,8 dS m⁻¹), como a água produzida de petróleo, observa-se redução acentuada da produtividade em todas as lâminas avaliadas, sendo esse efeito particularmente intenso nas lâminas mais elevadas. A produtividade obtida com a lâmina de 100% da ETc caiu de 31,43 para 14,40 t ha⁻¹, representando uma redução de aproximadamente 54%. Esse resultado indica que o aumento do volume de água salina aplicado ao solo pode intensificar o aporte e o acúmulo de sais ao longo do ciclo da cultura, elevando o estresse osmótico e iônico imposto às plantas podendo comprometer severamente o desenvolvimento das raízes.

Nas lâminas reduzidas, o impacto da salinidade foi relativamente menos pronunciado. A lâmina de 25% da ETc, por exemplo, apresentou redução de produtividade de 18,27 para

13,26 t ha⁻¹ quando se passou da água de baixa para a de alta salinidade, correspondendo a uma queda de cerca de 27%. Esse comportamento sugere que a menor aplicação de água salina limita o acúmulo de sais no solo, atenuando os efeitos negativos do estresse salino sobre a cultura. Ainda assim, mesmo nessas condições, a salinidade resultou em perdas produtivas relevantes, indicando alta sensibilidade da variedade Recife ao estresse salino.

Esses efeitos refletem mecanismos fisiológicos bem estabelecidos na literatura. Nessas condições, a elevação da salinidade impõe estresse osmótico e iônico, resultando na redução da condutância estomática e da assimilação de carbono, o que compromete a eficiência fotossintética e o uso da água pelas plantas (CRUZ *et al.*, 2017), corroborando também os resultados descritos por RAI *et al.* (2023) para o estresse salino.

De modo geral, os resultados da interação L×S para a cultivar Recife evidenciam que o aumento da lâmina de irrigação só seria agronomicamente vantajoso quando associado ao uso de água de boa qualidade. Em condições de água salina, lâminas elevadas não apenas deixam de promover ganhos produtivos, como intensificam as perdas de rendimento, tornando esse manejo tecnicamente inadequado. Assim, a definição da lâmina de irrigação deve considerar, de forma prioritária, a salinidade da água disponível, sob pena de comprometer significativamente o desempenho produtivo da cultura.

4.1.3 Interação entre lâmina de irrigação e salinidade da água sobre o acúmulo de matéria seca das raízes da cultivar Recife

A matéria seca da raiz constitui um dos principais indicadores da qualidade da mandioca, uma vez que está diretamente associada ao acúmulo de carboidratos estruturais e de reserva, especialmente o amido. A análise da interação entre lâmina de irrigação e salinidade da água permite compreender como a disponibilidade hídrica e a qualidade da água afetam simultaneamente o crescimento da cultura e a concentração de sólidos na raiz (Figura 9), aspecto particularmente relevante em sistemas irrigados do semiárido que utilizam fontes hídricas não convencionais.

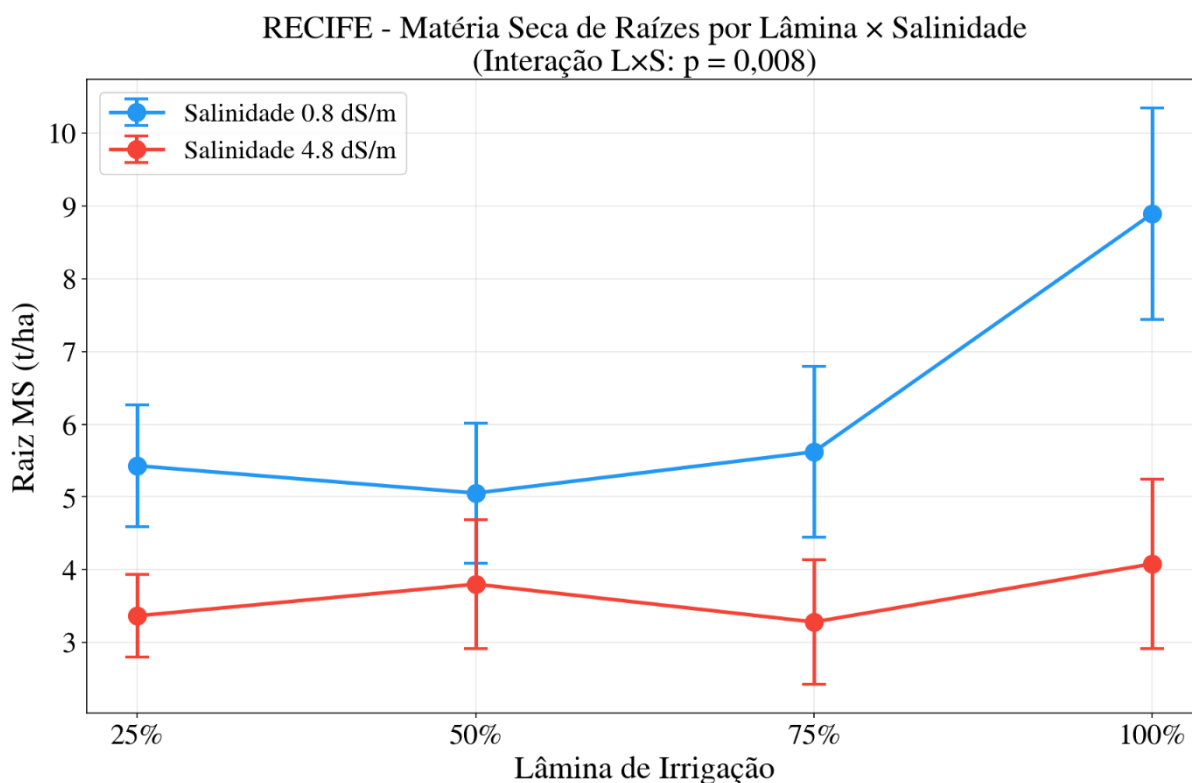


Figura 9. Produtividade de MS de raízes, média de 4 épocas (6, 8, 10 e 11 meses), em função das lâminas de irrigação quando se utiliza água doce ($CE = 0,8 \text{ dS m}^{-1}$) e água produzida sintética ($CE = 4,8 \text{ dS m}^{-1}$).

Os resultados evidenciam interação significativa entre os fatores, indicando que o efeito da lâmina de irrigação sobre a matéria seca da raiz depende da salinidade da água utilizada. Sob baixa salinidade ($0,8 \text{ dS m}^{-1}$), observa-se aumento da matéria seca com o incremento da lâmina de irrigação, sobretudo para a lâmina de 100% da ETc, que apresentou o maior valor ($8,8 \text{ t ha}^{-1}$), evidenciando que, em condições de água de boa qualidade, a maior disponibilidade hídrica favorece tanto o crescimento radicular quanto o acúmulo de assimilados na raiz. Esse padrão está alinhado com estudos que demonstram que, em condições favoráveis de água e manejo hídrico adequado, a irrigação pode promover trocas gasosas mais eficientes e maior acúmulo de biomassa, refletindo em aumento de matéria seca em culturas radiculares mesmo sob estresse moderado de outros fatores ambientais (SILVA *et al.* 2022).

Em contraste, sob salinidade elevada ($4,8 \text{ dS m}^{-1}$), os valores de matéria seca foram sistematicamente inferiores aos observados em água de baixa salinidade, independentemente da lâmina aplicada. Ainda que a lâmina de 100% da ETc tenha apresentado o maior valor nesse nível de salinidade ($4,1 \text{ t ha}^{-1}$), mas não sendo estatisticamente superior à produção obtida para as outras lâminas, observa-se que esse valor corresponde a menos da metade daquele obtido

sob baixa salinidade, evidenciando o forte impacto negativo da salinidade sobre o acúmulo de matéria seca. Esse comportamento indica que os efeitos osmóticos e iônicos associados à água salina limitam a assimilação de carbono e o enchimento das raízes, reduzindo a eficiência da cultura em converter água e nutrientes em biomassa seca. Estudos experimentais demonstram que a salinidade pode reduzir drasticamente a acumulação de matéria seca nas raízes tuberosas de mandioca, devido justamente à redução da taxa fotossintética e dos mecanismos de assimilação de carbono sob estresse salino (CRUZ *et al*, 2018).

Do ponto de vista fisiológico, a redução da matéria seca sob alta salinidade pode estar associada à menor taxa fotossintética, ao desbalanço nutricional e ao maior gasto energético da planta com mecanismos de tolerância ao estresse salino, como a exclusão ou compartimentalização de íons. Além disso, o uso de lâminas elevadas com água salina pode intensificar o aporte de sais ao solo, agravando o estresse radicular e limitando os ganhos proporcionados pelo aumento da disponibilidade hídrica.

Agronomicamente, os resultados indicam que, embora o aumento da lâmina de irrigação favoreça o acúmulo de matéria seca em condições de baixa salinidade, esse efeito é parcialmente neutralizado quando se utiliza água com elevada condutividade elétrica. Assim, em cenários de uso de água salina, estratégias de manejo que priorizem lâminas moderadas podem ser mais adequadas, uma vez que o aumento do volume de água aplicada não resulta em incrementos proporcionais na qualidade da raiz. Esses achados reforçam a necessidade de manejo integrado da irrigação e da qualidade da água, especialmente em sistemas produtivos do semiárido, onde a matéria seca da raiz representa um atributo essencial tanto para a produção de alimentos quanto para fins industriais e bioenergéticos.

4.1.4 Produção de amido da cultivar Recife, em função da interação entre lâmina de irrigação e salinidade da água

A produção de amido constitui um dos principais indicadores agronômicos e econômicos da cultura da mandioca, sendo fortemente influenciada tanto pela disponibilidade hídrica quanto pela qualidade da água de irrigação. A análise conjunta desses fatores é fundamental, especialmente em regiões semiáridas, onde a escassez hídrica e o uso de águas salobras são realidades frequentes. Nesse contexto, a avaliação da interação entre lâmina de irrigação e salinidade permite compreender de forma mais integrada como esses fatores modulam o desempenho produtivo da cultivar Recife, fornecendo subsídios para o manejo racional da irrigação.

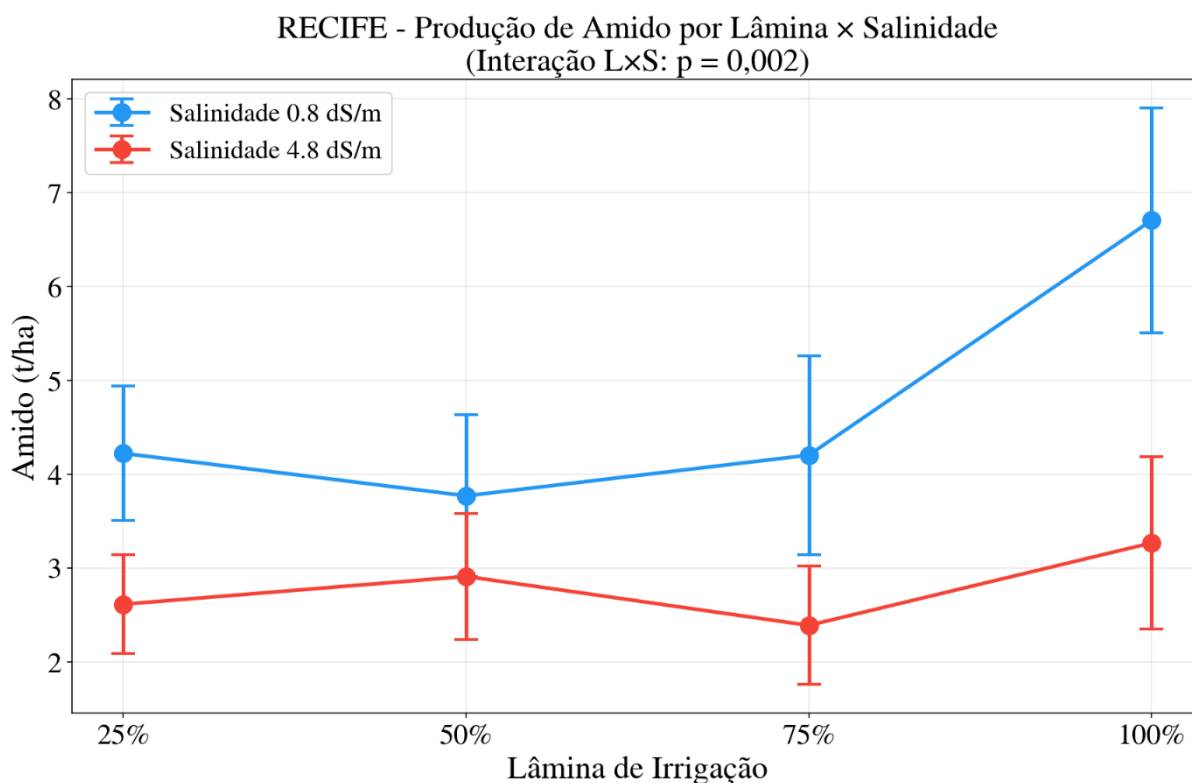


Figura 10. Produtividade de amido, média de 4 épocas (6, 8, 10 e 11 meses), em função das lâminas de irrigação quando se utiliza água doce ($CE = 0,8 \text{ dS m}^{-1}$) e água produzida sintética ($CE = 4,8 \text{ dS m}^{-1}$).

Os resultados apresentados no gráfico evidenciam efeito significativo da interação entre lâmina de irrigação e salinidade da água ($p = 0,002$), indicando que a resposta da produção de amido às lâminas aplicadas depende diretamente da qualidade da água utilizada. Sob baixa salinidade ($0,8 \text{ dS m}^{-1}$), observa-se aumento expressivo da produção de amido com o incremento da lâmina de irrigação, especialmente na lâmina de 100% da ETc, que apresentou o maior rendimento, próximo de $6,7 \text{ t ha}^{-1}$. Esse comportamento indica que, em condições de água de boa qualidade, a cultura responde positivamente ao aumento da disponibilidade hídrica, favorecendo a assimilação de carbono e o acúmulo de reservas nas raízes tuberosas.

Em contrapartida, sob irrigação com água de maior salinidade ($4,8 \text{ dS m}^{-1}$), a produção de amido manteve-se inferior em todas as lâminas avaliadas, com variações mais discretas entre as lâminas de irrigação. Mesmo na lâmina de 100% da ETc, o rendimento de amido permaneceu em torno de $3,2 \text{ t ha}^{-1}$, valor substancialmente inferior ao observado sob baixa salinidade. Esse comportamento está alinhado com estudos que demonstram que a salinidade reduz o acúmulo de matéria seca nas raízes tuberosas de mandioca por meio de efeitos osmóticos e iônicos que

prejudicam diretamente o equilíbrio fonte-dreno e limitam a assimilação de carbono (CRUZ *et al*, 2017).

Do ponto de vista fisiológico, a interação observada pode ser atribuída ao efeito combinado do estresse osmótico e iônico provocado pela salinidade, que reduz a eficiência fotossintética e o transporte de assimilados para as raízes. Isso é consistente com evidências de que o estresse salino pode reduzir a eficiência fotossintética e a translocação de fotoassimilados para os órgãos de reserva, levando a menor produção de biomassa seca mesmo quando a água é abundante (CRUZ *et al*, 2017). Além disso, o uso de lâminas elevadas com água salina pode intensificar o aporte de sais ao solo, agravando o estresse radicular e limitando os ganhos proporcionados pelo aumento da disponibilidade hídrica.

Agronomicamente, os resultados reforçam que a maximização da produção de amido na cultivar Recife depende não apenas da lâmina de irrigação, mas, sobretudo, da qualidade da água utilizada. Enquanto lâminas elevadas associadas à água de baixa salinidade promovem ganhos expressivos de produtividade, o uso de água com $4,8 \text{ dS m}^{-1}$ reduz significativamente o retorno produtivo do incremento hídrico.

4.1.5 Eficiência do Uso da Água em Função da Lâmina de Irrigação, Salinidade da Água e Tempo de Colheita

A eficiência do uso da água (EUA) é um dos indicadores mais relevantes para a avaliação do desempenho agrícola em regiões semiáridas, onde a disponibilidade hídrica é limitada e a qualidade da água frequentemente comprometida pela salinidade. Esse indicador expressa a capacidade da cultura em converter a água aplicada via irrigação em produção com valor econômico, sendo, portanto, fundamental para a definição de estratégias de manejo que conciliem produtividade e sustentabilidade. A análise da EUA da cultivar Recife evidenciou efeitos significativos da lâmina de irrigação, da salinidade da água e do tempo de colheita, conforme demonstrado pelos valores de p inferiores a 0,01, indicando que esses fatores exercem influência direta e diferenciada sobre a eficiência hídrica da cultura (Figura 11).

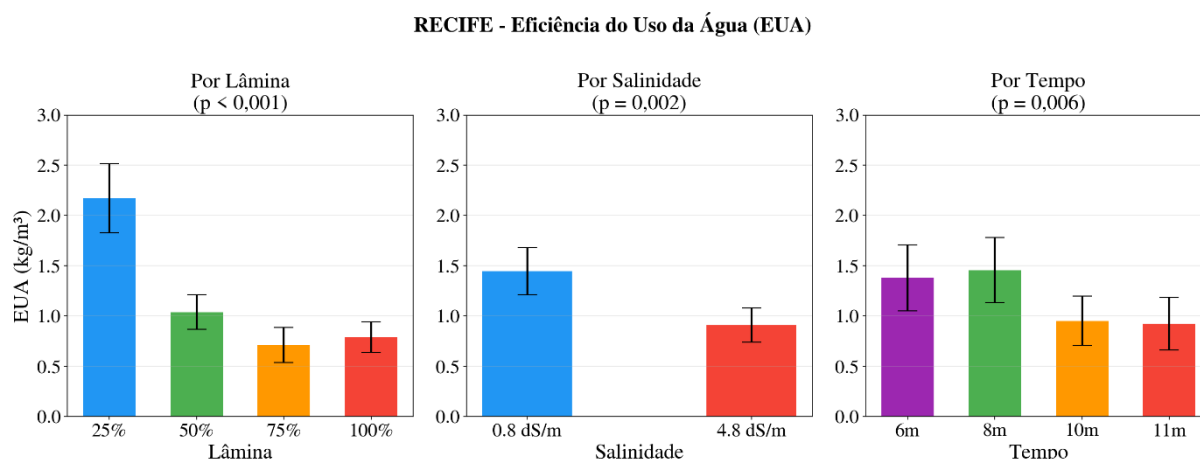


Figura 11. Eficiência do uso da água por lâmina, salinidade e tempo de colheita.

Em relação à lâmina de irrigação, a lâmina de 25% da evapotranspiração da cultura, apresentou a maior eficiência do uso da água, com média de $2,17 \text{ kg m}^{-3}$, correspondendo a um consumo aproximado de 600 m^3 de água por tonelada de amido produzida. Esse resultado indica que, sob condições de restrição hídrica, a variedade Recife apresenta elevada capacidade de converter a água aplicada em produto agrícola, refletindo maior eficiência fisiológica no uso dos recursos hídricos disponíveis. Resultados semelhantes têm sido observados em estudos que mostram que regimes de irrigação deficitária podem melhorar a eficiência hídrica em mandioca ao favorecer o ajuste osmótico e a manutenção de trocas gasosas sob condições de disponibilidade limitada de água, o que pode resultar em maior eficiência de uso da água por unidade de biomassa produzida (MUTANDA *et al*, 2025).

À medida que a lâmina de irrigação foi incrementada, observou-se redução progressiva da eficiência hídrica. A lâmina de 50% da ETc apresentou eficiência intermediária, com valor médio de $1,04 \text{ kg m}^{-3}$, enquanto as lâminas de 75% e 100% da ETc apresentaram os menores valores de EUA, inferiores a $1,0 \text{ kg m}^{-3}$, acompanhados de elevados consumos específicos de água por tonelada de amido. Esses resultados indicam que, embora lâminas mais elevadas favorecem maiores produtividades absolutas de raízes, o aumento no volume de água aplicada via irrigação não é acompanhado por incrementos proporcionais na produção de amido.

Do ponto de vista agrônomo, os resultados evidenciam um claro “trade-off” entre produtividade e eficiência do uso da água mostrando a necessidade de um equilíbrio entre benefícios e custos. Enquanto a lâmina de 100% da ETc maximiza a produção de raízes, a lâmina de 25% da ETc é aproximadamente três vezes mais eficiente no uso da água, produzindo maior quantidade de amido por unidade de volume aplicada. Esse comportamento é

particularmente relevante em regiões semiáridas, onde a disponibilidade hídrica é limitada e a eficiência no uso da água constitui um dos principais critérios para a sustentabilidade dos sistemas produtivos.

Adicionalmente, a redução da eficiência hídrica em lâminas elevadas pode estar associada a maiores perdas por percolação, evaporação e, em condições de uso de água salina, ao aumento do aporte de sais ao solo, fatores que contribuem para reduzir a eficiência global do sistema. Assim, a interpretação dos dados reforça que a escolha da lâmina de irrigação deve considerar não apenas a maximização da produtividade, mas também a racionalização do uso da água, especialmente em cenários de escassez hídrica ou de uso de águas de qualidade limitada.

Quanto à salinidade da água de irrigação, observa-se que a utilização de água com baixa condutividade elétrica ($0,8 \text{ dS m}^{-1}$) proporcionou valores significativamente superior de eficiência do uso da água, com média aproximada de $1,45 \text{ kg m}^{-3}$, em comparação à água com maior salinidade ($4,8 \text{ dS m}^{-1}$), que apresentou eficiência média inferior a $1,0 \text{ kg m}^{-3}$. Esse resultado evidencia que a qualidade da água exerce papel determinante na capacidade da cultivar Recife em converter o volume de água aplicado em produção de amido, refletindo diferenças marcantes na eficiência fisiológica da cultura sob distintos níveis de estresse salino, uma vez que a salinidade pode reduzir a assimilação de carbono, a condutância estomática e a eficiência no uso da água nas plantas (Cruz *et al*, 2017).

Do ponto de vista agrônomo, os resultados demonstram que o uso de água com salinidade de $4,8 \text{ dS m}^{-1}$ impõe uma limitação estrutural à eficiência hídrica da cultivar Recife, independentemente da lâmina aplicada. Enquanto a água de boa qualidade permite maior retorno produtivo por unidade de água consumida, a água salina reduz significativamente esse retorno, tornando o sistema menos eficiente e potencialmente menos sustentável. Esse efeito é particularmente relevante em regiões semiáridas, onde o uso de águas salobras ou de água produzida tratada pode representar a principal alternativa para irrigação agrícola.

Em relação ao tempo de colheita, quando realizada aos oito meses após o plantio apresentou a maior eficiência do uso da água, com valor médio de $1,54 \text{ kg m}^{-3}$, superando os demais tempos avaliados. Esse resultado indica que, nesse estágio do ciclo, a variedade Recife apresenta elevada eficiência fisiológica, possivelmente associada a uma fase de intenso acúmulo de matéria seca nas raízes em relação ao consumo hídrico acumulado. O intervalo de

confiança observado para o T8 reforça a consistência desse desempenho, apesar da variabilidade inerente às condições experimentais. Esse comportamento está em consonância com resultados reportados em estudos de manejo hídrico da cultura, nos quais se observa que, em determinados estágios fenológicos, ocorre um equilíbrio mais eficiente entre assimilação de carbono e perdas por transpiração, resultando em maior eficiência no uso da água (MUTANDA *et al*, 2025).

A colheita aos seis meses apresentou eficiência intermediária, com valor médio de $1,24 \text{ kg m}^{-3}$, indicando que, embora a cultura ainda se encontre em desenvolvimento, já apresenta capacidade razoável de conversão da água aplicada em produção. Em contrapartida, os tempos de colheita mais tardios, aos dez e onze meses, apresentaram os menores valores de eficiência hídrica, com médias inferiores a $1,0 \text{ kg m}^{-3}$. Esses resultados sugerem que, a partir de determinado ponto do ciclo, o incremento no consumo de água não é acompanhado por aumentos proporcionais na produção de amido, resultando em redução da eficiência global do uso da água.

Do ponto de vista agrônômico, a superioridade da eficiência hídrica observada aos oito meses, aproximadamente 62% maior que aquela registrada aos dez meses, evidencia a existência de um período ótimo de colheita quando o objetivo é maximizar a eficiência no uso da água. Esse comportamento reforça o “trade-off” entre produção máxima e eficiência hídrica, uma vez que colheitas mais tardias, embora possam resultar em maiores produtividades absolutas de raízes, implicam menor retorno produtivo por unidade de água aplicada.

4.1.6 Produção potencial de etanol da cultivar Recife em função da lâmina de irrigação e da salinidade da água

A produção de etanol a partir da mandioca tem se consolidado como uma alternativa estratégica para diversificação da matriz energética, especialmente em regiões semiáridas, onde a limitação hídrica e a disponibilidade de águas de boa qualidade constituem entraves ao desenvolvimento agrícola. Nesse contexto, o uso de água produzida tratada, frequentemente associada à atividade petrolífera e caracterizada por teores elevados de sais, emerge como uma fonte hídrica alternativa com potencial de uso agrícola, desde que manejada de forma criteriosa.

A avaliação da produção potencial de etanol a partir da macaxeira constitui um importante indicativo do desempenho agroenergético da cultura, uma vez que integra os efeitos dos fatores agrônômicos sobre o acúmulo de amido, principal substrato para a produção de

bioetanol. Nesse contexto, a análise conjunta da lâmina de irrigação e da salinidade da água permite compreender como a disponibilidade hídrica e a qualidade da água influenciam não apenas a produtividade agrícola, mas também o potencial energético do sistema produtivo, aspecto particularmente relevante em regiões semiáridas, onde o uso de águas salinas é recorrente. Estudos demonstram que a salinidade da água de irrigação reduz tanto a produtividade quanto a eficiência de uso da água de culturas diversas, causando acumulação de sais no solo e limitando a eficiência do uso da água para produção de biomassa e metabólitos relacionados ao rendimento de produtos energéticos (CHENG *et al.*, 2021).

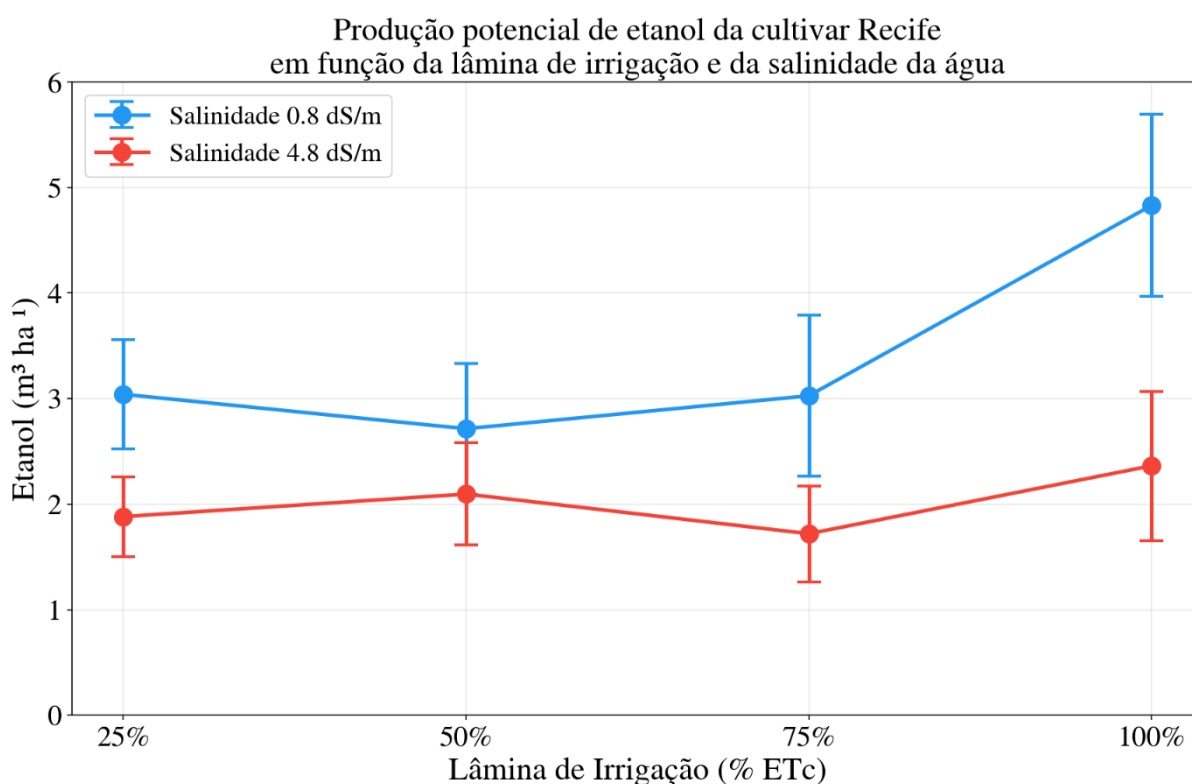


Figura 12. Produção do potencial de etanol da macaxeira Recife em função da Lâmina de irrigação (% da ETC) para água doce e água produzida sintética.

A comparação entre a produção potencial de etanol da cultivar Recife e os dados médios da cana-de-açúcar no Nordeste evidencia diferenças importantes relacionadas ao potencial produtivo por área, à eficiência do uso da água e à adaptabilidade dos sistemas agrícolas às condições do semiárido. Enquanto a cana-de-açúcar constitui a principal matéria-prima para a produção de etanol no Brasil, apresentando rendimentos médios estimados entre aproximadamente 4.000 e 8.000 L ha⁻¹, onde segundo CONAB (2025) a produção média no nordeste na safra 24/25 ficou em 5.100 L ha⁻¹, a macaxeira cultivar Recife apresentou produção potencial de etanol variando entre cerca de 1.700 e 4.800 L ha⁻¹, a depender da lâmina de

irrigação e da salinidade da água utilizada na irrigação, valores estes que se alinham com estimativas de rendimento de etanol de mandioca em sistemas experimentais, com estimativas de cerca de 4.100 L ha^{-1} em estudos que relacionam produtividade de raízes com rendimento alcoólico (SUN *et al.*, 2025).

Sob condições de baixa salinidade ($0,8 \text{ dS m}^{-1}$) e lâmina de irrigação equivalente a 100% da evapotranspiração da cultura, a mandioca alcançou valores próximos a $4.700 - 4.800 \text{ L ha}^{-1}$ de etanol, aproximando-se do limite inferior observado em sistemas canavieiros do Nordeste. Esse resultado indica que, em ambientes onde a qualidade da água é adequada, a mandioca apresenta potencial competitivo como matéria-prima bioenergética, especialmente considerando seu ciclo mais curto, maior flexibilidade de colheita e menor exigência tecnológica em comparação à cana-de-açúcar.

Entretanto, quando se avaliam cenários típicos do semiárido, caracterizados pelo uso de águas salinas, como a água produzida tratada com salinidade em torno de $4,8 \text{ dS m}^{-1}$, observa-se redução expressiva da produção potencial de etanol da mandioca, com valores situando-se entre aproximadamente 1.700 e 2.300 L ha^{-1} . Nessas condições, mesmo o aumento da lâmina de irrigação não foi suficiente para promover incrementos proporcionais na produção energética, evidenciando que os efeitos osmóticos e iônicos da salinidade limitam o acúmulo de amido e, conseqüentemente, o rendimento alcoólico. Em comparação, à cana-de-açúcar, embora também sensível à salinidade, apresenta maior estabilidade produtiva em sistemas irrigados, especialmente em áreas tradicionais de cultivo do Nordeste.

Do ponto de vista da sustentabilidade hídrica, a macaxeira apresenta uma vantagem estratégica relevante. Apesar de apresentar menor produção absoluta de etanol por hectare em relação à cana, a cultura demonstrou elevada eficiência do uso da água em lâminas reduzidas, o que é particularmente importante em regiões onde a disponibilidade hídrica é limitada. Assim, a mandioca pode ser considerada uma alternativa complementar à cana-de-açúcar em sistemas bioenergéticos descentralizados, sobretudo em áreas onde a cana não é viável técnica ou economicamente, ou onde o uso de águas de qualidade inferior é a principal fonte de irrigação.

Esses resultados sugerem que, embora a cana-de-açúcar apresente potencial absoluto de produção de etanol superior devido à sua elevada produtividade de biomassa, a mandioca pode alcançar valores de produção energética comparáveis quando gerida com água de boa qualidade e lâminas adequadas, especialmente em sistemas irrigados do semiárido, o que torna a cultura

competitiva como matéria-prima alternativa em contextos de uso de água não convencional. Além disso, a mandioca possui vantagens agrônômicas como ciclo mais curto, maior tolerância a solos de baixa fertilidade e potencial de cultivo durante todo o ano, características que favorecem sua inserção em arranjos bioenergéticos complementares à cana-de-açúcar (LINO *et al.*, 2025).

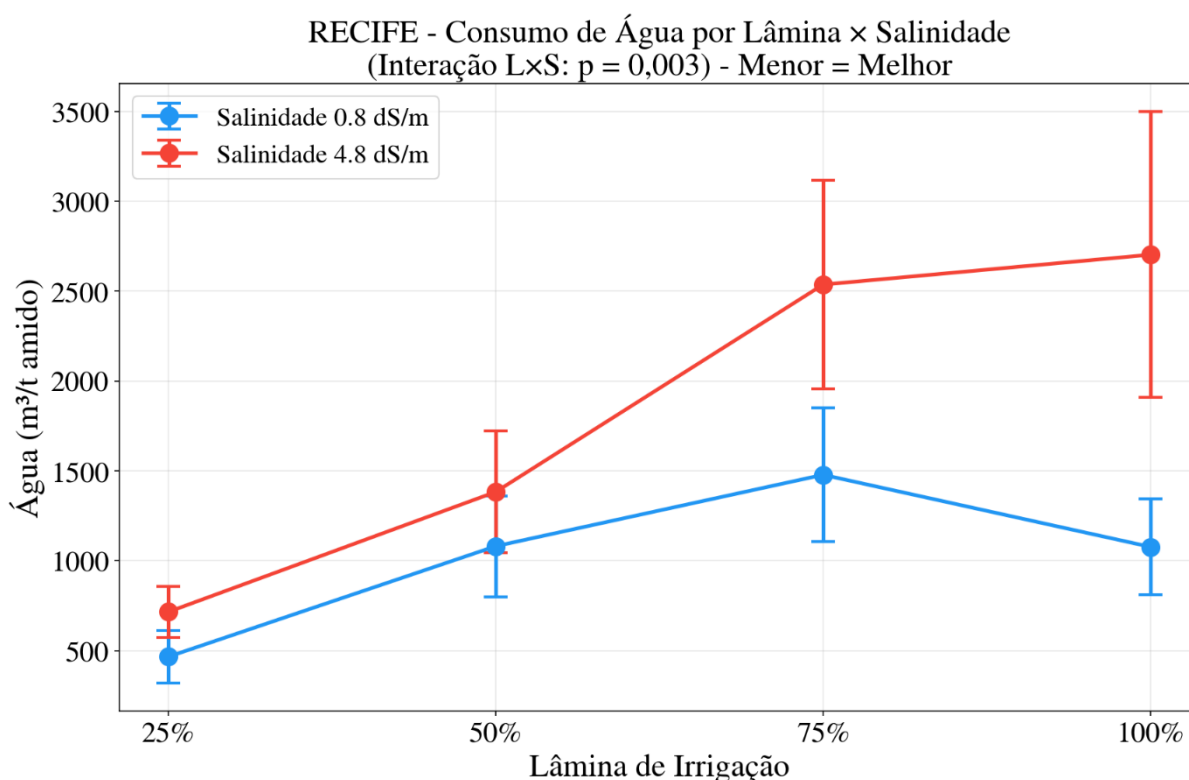


Figura 13. Consumo de água de irrigação por tonelada de amido produzida em função da lâmina de irrigação aplicada (% da ETc) quando se utiliza água doce e produzida sintética na cultivar Recife.

Os resultados indicam que, em todas as lâminas avaliadas, o consumo de água por tonelada de amido foi menor quando se utilizou água de baixa salinidade ($0,8 \text{ dS m}^{-1}$), Figura 13, com valores variando aproximadamente de $2.800 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ de amido na lâmina de 100% da ETc com CE ($4,8 \text{ dS m}^{-1}$), para cerca de $1.200 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ na lâmina de 100% ETc com CE ($0,8 \text{ dS m}^{-1}$). Esses valores são comparáveis, e em alguns casos inferiores, como os observados por SANTIAGO *et al* (2017), para a cana-de-açúcar quando se considera a água necessária para produção de matéria-prima destinada ao etanol, ($159,52$ a 209 L kg^{-1} de colmos), sobretudo em regiões semiáridas onde a eficiência da cana tende a ser reduzida pelo estresse hídrico e térmico. Tal comportamento evidencia que a macaxeira, mesmo com menor produtividade absoluta de biomassa, apresenta elevada eficiência relativa no uso da água para

fins energéticos. A literatura agrônômica mostra que a mandioca possui mecanismos fisiológicos que favorecem a utilização eficiente de água, mantendo trocas gasosas e produtividade mesmo sob regimes hídricos limitados, o que contribui para sua adaptação a condições de estresse, inclusive em ambientes semiáridos (MIRANDA *et al.*, 2025)

Sob salinidade elevada ($4,8 \text{ dS m}^{-1}$), observou-se aumento consistente do consumo específico de água, com valores variando de aproximadamente $3.300 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ de amido na lâmina de 25% a cerca de $1.800 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ na lâmina de 100%. Ainda que esses valores representem uma redução em relação à água de boa qualidade, eles permanecem competitivos quando comparados aos sistemas de produção de cana irrigada em ambientes semiáridos, nos quais a combinação de alta demanda hídrica e sensibilidade ao estresse salino frequentemente limita o desempenho agrônômico. Assim, mesmo sob uso de água salina, a mandioca mantém níveis de eficiência hídrica que a qualificam como cultura promissora para regiões onde a cana-de-açúcar apresenta restrições técnicas ou ambientais. Meta-análises indicam que a irrigação com água salina reduz a produtividade e a produtividade hídrica de diversas culturas, mas que práticas de manejo apropriadas podem moderar estes efeitos, o que sustenta a observação de que a mandioca continua a demonstrar níveis de eficiência que a qualificam como cultura promissora sob salinidade moderada (CHENG *et al.*, 2021)

A interação significativa entre lâmina de irrigação e salinidade ($p = 0,003$) indica que os ganhos de eficiência associados ao aumento da lâmina são dependentes da qualidade da água, comportamento que também é observado na cana-de-açúcar, porém de forma mais acentuada na cana. Enquanto na cana o aumento da lâmina frequentemente resulta em acréscimos marginais de produtividade acompanhados de elevado custo hídrico, na macaxeira observa-se redução consistente do consumo de água por unidade de amido à medida que a lâmina aumenta, mesmo sob salinidade elevada. Esse resultado corrobora com MIRANDA *et al* (2025) sugerindo maior plasticidade fisiológica da mandioca em ajustar sua produção de reservas frente a variações na disponibilidade hídrica.

Do ponto de vista agrônômico e energético, a comparação com a cana-de-açúcar reforça o potencial da mandioca como cultura estratégica para produção de etanol no semiárido, especialmente quando se considera o uso de fontes hídricas alternativas, como a água produzida tratada. Embora a cana permaneça como referência em sistemas de alta disponibilidade hídrica, os resultados indicam que a mandioca apresenta maior eficiência relativa no uso da água e maior

tolerância operacional a condições de salinidade, características essenciais para a sustentabilidade de sistemas bioenergéticos em regiões de escassez hídrica.

A mandioca deve ser compreendida não como substituta direta da cana-de-açúcar na produção de etanol no Nordeste brasileiro, mas como uma cultura estratégica complementar, com elevado potencial para diversificar a base produtiva e reduzir a pressão sobre recursos hídricos de melhor qualidade. Com os resultados, há indicação de que, mesmo sob condições de restrição hídrica e uso de águas de salinidade elevada, como a água produzida de petróleo tratada, a mandioca apresenta desempenho agrônômico e eficiência hídrica compatíveis com sistemas bioenergéticos sustentáveis. Assim, sua inserção em arranjos produtivos integrados amplia as possibilidades de aproveitamento de recursos hídricos não convencionais, contribuindo para a resiliência dos sistemas agrícolas no semiárido e para a sustentabilidade ambiental e energética da região.

4.1.7 Produção potencial de biochar e sequestro de carbono da cultivar Recife em função do tempo

O aumento da biomassa aérea da cultivar Recife observado até a colheita aos 8 meses, seguido de relativa estabilização aos 10 e 11 meses, indica que o pico de acúmulo de matéria seca do colmo ocorre em fases intermediárias do ciclo (Figura 14). Esse comportamento está associado à dinâmica fisiológica da mandioca, na qual a parte aérea apresenta crescimento vigoroso inicial para posterior redirecionamento de fotoassimilados às raízes de reserva. Resultados semelhantes são reportados na literatura, que destacam a biomassa aérea da mandioca como importante reservatório temporário de carbono e fonte relevante de resíduos agrícolas com potencial de aproveitamento energético (OTEKUNRIN *et al.*, 2024).

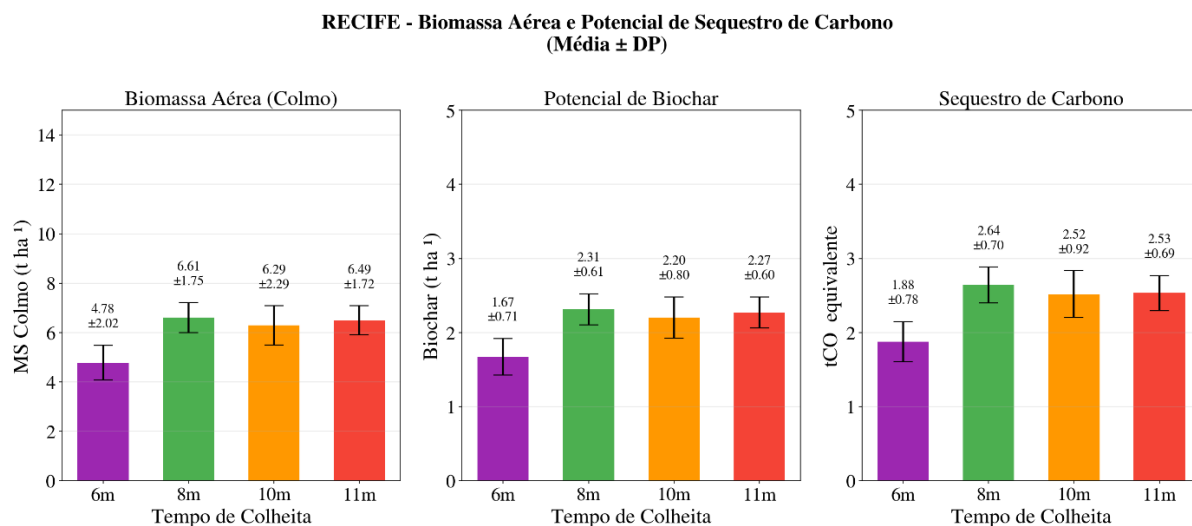


Figura 14. Produção de biomassa seca e potencial de sequestro de carbono da macaxeira Recife colhida em diferentes épocas e irrigada com diferentes lâminas de irrigação utilizando água doce e água produzida sintética.

O potencial de produção de biochar, que acompanhou diretamente a variação da biomassa aérea, atingiu valores máximos aos 8 meses e manteve-se relativamente estáveis nas colheitas subsequentes. Esse padrão reforça a viabilidade do aproveitamento do colmo da mandioca como matéria-prima para biochar, conforme demonstrado por estudos recentes que avaliaram resíduos da cultura como fonte eficiente para processos de pirólise, resultando em materiais com elevada estabilidade química e potencial agronômico (GOMEZ *et al.*, 2024). Além disso, pesquisas indicam que o biochar oriundo da parte aérea da mandioca apresenta características favoráveis à melhoria das propriedades físicas do solo, como retenção de água e aumento da capacidade de troca catiônica, ampliando seus benefícios ambientais (SILVA *et al.*, 2026).

Considerando que o comportamento do potencial de sequestro de carbono reflete diretamente o acúmulo e a estabilidade do carbono presente na biomassa convertida em biochar, com valores máximos observados aos 8 meses de colheita, o resultado indica que colheitas intermediárias podem otimizar a eficiência do sistema solo-planta no armazenamento de carbono, especialmente quando associadas à essa conversão da biomassa residual em biochar. Revisões recentes destacam que o biochar derivado de biomassa agrícola atua como um reservatório de carbono de longa duração, podendo permanecer estável no solo por décadas ou séculos, contribuindo de forma efetiva para a mitigação das emissões de CO₂ (Bera., 2024).

Em conjunto, os resultados evidenciam que a biomassa aérea da cultivar Recife não deve ser tratada apenas como resíduo agrícola, mas como componente estratégico em sistemas produtivos integrados, capazes de associar produção agrícola, geração de bioenergia e sequestro de carbono. A consonância entre os dados experimentais e a literatura recente reforça o papel da mandioca como cultura multifuncional, especialmente em regiões semiáridas, onde o aproveitamento eficiente de resíduos vegetais e a mitigação de impactos ambientais são aspectos centrais para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

4.1.8 Manejo Integrado e Potencial Bioenergético da cultivar Recife

A pesquisa evidenciou que a produtividade e a eficiência da mandioca cultivar Recife são coordenadas por uma complexa interação entre o suprimento hídrico, a salinidade da água e o tempo de colheita. Com base nos resultados apresentados, conclui-se que:

A Supremacia da Lâmina sobre a Qualidade: A lâmina de irrigação é o fator determinante para a produtividade de raízes e amido. No entanto, o potencial genético da cultivar só é plenamente expresso (atingindo níveis competitivos com a cana-de-açúcar) sob baixa salinidade. O uso de águas salinas ($4,8 \text{ dS m}^{-1}$) impõe um "teto" fisiológico que limita a conversão de água em biomassa, independentemente do volume aplicado.

O "Trade-off" da Eficiência Hídrica: Existe uma dicotomia clara entre produção máxima e eficiência máxima. Enquanto a lâmina de 100% da ET_c maximiza a colheita de raízes frescas, a lâmina de 25% é três vezes mais eficiente na conversão de água por quilo de amido. Isso posiciona a irrigação deficitária como uma estratégia vital para a sustentabilidade em cenários de escassez hídrica severa.

O Momento Crítico da Colheita: O período de 8 meses após o plantio consolida-se como o ponto de máxima eficiência fisiológica e hídrica. Colheitas tardias (10-11 meses), embora possam aumentar a massa bruta em condições ideais, elevam o consumo específico de água e reduzem a eficiência global, especialmente sob estresse salino cumulativo.

Viabilidade Agroenergética e Ambiental: A cultivar Recife demonstra viabilidade para a produção de bioetanol, alcançando rendimentos de até 4.800 L ha^{-1} em condições ótimas, o que a equipara à média de 5100 L ha^{-1} da cana-de-açúcar no Nordeste (SINDIPE, 2025). Além disso, o aproveitamento da biomassa aérea para a produção de biochar aos 8 meses fecha o ciclo

de sustentabilidade, transformando resíduos em um mecanismo de sequestro de carbono e condicionamento de solo.

Em suma, a cultivar Recife apresenta-se como uma alternativa robusta e superior à cana-de-açúcar para o semiárido brasileiro em termos de eficiência relativa. Sua capacidade de produzir com águas não convencionais (como a água produzida de petróleo) e sua flexibilidade de colheita permitem uma integração estratégica em sistemas de bioeconomia circular, mitigando riscos climáticos e promovendo a segurança energética e hídrica regional.

4.2 Respostas da cultivar de macaxeira Venâncio a qualidade da água e lâminas de irrigação.

A análise de variância (ANOVA), apresentada na Tabela 6, permitiu identificar os efeitos dos fatores lâmina de irrigação (L), salinidade da água (S) e tempo de colheita (T), bem como de suas interações, sobre as variáveis agronômicas e de eficiência hídrica avaliadas na cultivar Venâncio, que no caso do uso específico de irrigação para produção de amido, a interação tripla foi significativa. Os resultados evidenciam que esses fatores atuaram de forma diferenciada sobre as variáveis analisadas, indicando respostas específicas da cultura aos distintos manejos de irrigação, qualidade da água e tempo de colheita.

Tabela 6. P-valores para as variáveis analisadas no modelo para cultivar Venancio.

Variável	Bloco	L	S	T	L×S	L×T	S×T	CV (%)
RAIZ	0,040*	0,019*	0,766 ns	0,824ns	0,377 ns	0,427 ns	0,760 ns	42,58
Raiz_MS (t ha⁻¹)	0,032*	0,010**	0,446 ns	0,799 ns	0,060 ns	0,212 ns	0,749 ns	24,04
MSRaiz (%)	0,553ns	0,023*	0,001***	0,867 ns	0,016*	0,302 ns	0,076 ns	15,69
Amido (t ha⁻¹)	0,015*	0,129 ns	0,661 ns	0,785 ns	0,321 ns	0,635 ns	0,891 ns	44,87
Água, m³/t	0,371 ns	0,024*	0,914 ns	0,960 ns	0,082 ns	0,058 ns	0,630 ns	56,61
EUA Amido	0,040*	0,583 ns	0,456 ns	0,144 ns	0,744 ns	0,857 ns	0,465 ns	72,2
MS parte aérea (%)	0,037*	0,022*	0,667 ns	0,417 ns	0,844 ns	0,006**	0,414 ns	64,95
MF parte aérea (t ha⁻¹)	0,279 ns	0,778 ns	0,501 ns	0,001***	0,816 ns	0,598 ns	0,831 ns	24,74

MS parte aérea (t ha⁻¹)	0,064 ns	0,141 ns	0,899 ns	0,777 ns	0,949 ns	0,001**	0,706 ns	11,13
Biochar	0,064 ns	0,141 ns	0,899 ns	0,777 ns	0,949 ns	0,001**	0,706 ns	28,27
tCO₂/eq	0,069 ns	0,148 ns	0,900 ns	0,768 ns	0,951 ns	0,001**	0,666 ns	28,27

p < 0,001 Altamente significativo (***) Evidência MUITO FORTE de efeito real

p < 0,01 Muito significativo (**) Evidência FORTE de efeito real

p < 0,05 Significativo (*) Evidência MODERADA de efeito real

p ≥ 0,05 Não significativo (ns) SEM evidência suficiente de efeito real.

A lâmina de irrigação apresentou efeito significativo sobre a produtividade de raízes frescas ($p = 0,019$), a matéria seca da raiz ($p = 0,010$), o consumo específico de água por tonelada de amido ($p = 0,024$) e a produção de biomassa ($p = 0,022$), confirmando que o manejo hídrico constitui um dos principais determinantes do desempenho produtivo e da eficiência do uso da água na cultura da mandioca. Esse resultado reforça a importância da definição adequada da lâmina de irrigação, uma vez que tanto o déficit quanto o excesso hídrico podem comprometer a eficiência fisiológica da cultura.

Por outro lado, a salinidade da água de irrigação não apresentou efeito significativo sobre a produtividade de raízes ($p = 0,766$) nem sobre a produção de amido ($p = 0,661$), indicando que a utilização da água com salinidade de 4,8 dS m⁻¹ (S2), considerada neste estudo como água produzida de petróleo tratada, não comprometeu o rendimento produtivo da cultivar Venâncio. Esse resultado é particularmente relevante, pois demonstra que, quando adequadamente tratada e dentro dos limites estabelecidos pela legislação ambiental vigente, a água produzida pode ser utilizada de forma segura na irrigação agrícola, sem prejuízos à produção.

Entretanto, a salinidade exerceu influência significativa sobre o percentual de matéria seca das raízes ($p = 0,001$), além de apresentar interação significativa com a lâmina de irrigação ($L \times S$; $p = 0,016$). Esse comportamento indica que os efeitos da água produzida sobre a qualidade das raízes não são isolados, mas dependem diretamente do regime hídrico adotado. A interação $L \times S$ evidencia que o impacto da salinidade moderada pode ser potencializado ou atenuado conforme o volume de água aplicado, resultado que é coerente com a resposta fisiológica da mandioca a estresses combinados de água e salinidade.

O tempo de colheita apresentou efeito altamente significativo sobre o percentual de matéria seca da biomassa aérea ($p < 0,001$), indicando que a maturação da parte aérea é

fortemente dependente do estágio fenológico da cultura, para a cultivar Venâncio. Esse resultado sugere que colheitas mais tardias favorecem o acúmulo de compostos estruturais e a lignificação dos tecidos, sem necessariamente resultar em incrementos adicionais na produtividade de raízes ou amido.

As variáveis relacionadas à produção de biomassa, biochar e CO₂ equivalente foram significativamente influenciadas pela interação entre lâmina de irrigação e tempo de colheita ($L \times T$; $p = 0,006$ para biomassa e $p = 0,001$ para biochar e tCO₂ eq). A ausência de efeito isolado da salinidade sobre essas variáveis indica que o potencial de produção de biomassa aérea e de sequestro de carbono está associado predominantemente ao manejo hídrico e ao momento da colheita, e não à qualidade salina da água, desde que esta se mantenha em níveis moderados, como no caso da água produzida tratada similar a utilizada neste estudo.

De forma integrada, os resultados da Tabela 6 demonstram que a cultivar Venâncio apresenta tolerância ao uso de água produzida de petróleo tratada na irrigação, especialmente no que se refere à produtividade e à eficiência hídrica. As respostas observadas indicam que estratégias baseadas no manejo racional da irrigação e na definição adequada do tempo de colheita são mais determinantes para o desempenho do sistema do que a salinidade moderada da água, reforçando o potencial do uso agrícola da água produzida de petróleo em sistemas sustentáveis de produção de mandioca para indústria bioenergetica.

4.2.1. Produtividade de raízes da mandioca Venâncio

4.2.1.1 Produtividade de raízes em função das lâminas de irrigação

A produtividade média de raízes, no gráfico de produção de raízes por lâmina, (Figura 15), evidencia o efeito significativo da lâmina de irrigação ($p = 0,019$). As maiores produtividades foram observadas sob as lâminas de 75% e 100% da ETc, que não diferiram estatisticamente entre si, mas superaram as lâminas de 25% e 50%. Tal comportamento está em consonância com evidências de que níveis adequados de irrigação podem melhorar significativamente o rendimento de raízes de mandioca, promovendo maior acúmulo de biomassa radicular quando comparados a regimes hídricos restritivos ou chuva-somente em regiões tropicais ou semiáridas, como reportado em estudos que avaliam respostas fisiológicas e produtivas da mandioca em diferentes regimes de água (SILVA *et al.*, 2022).

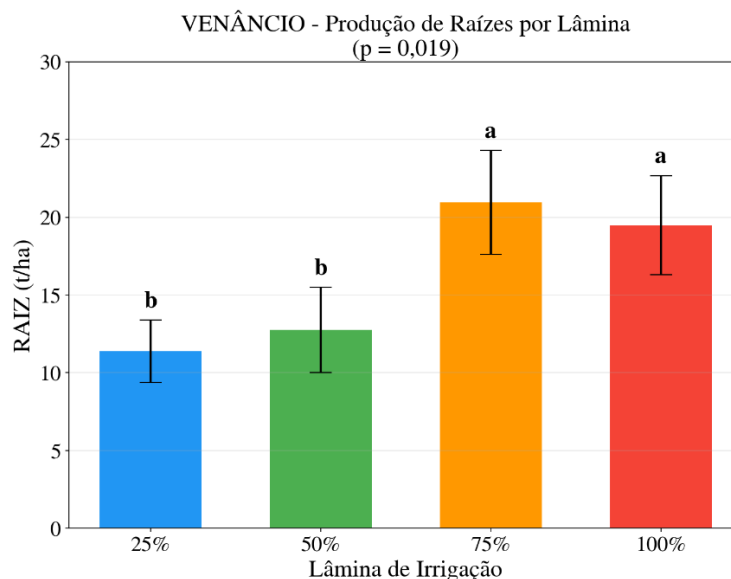


Figura 15. Rendimento de raiz de mandioca fresca, média do tempo (4 tempos de colheita e de dois tipos de água de irrigação) em função da lâmina de irrigação aplicada.

Os resultados observados sugerem que a lâmina correspondente a 75% da ETc representa um ponto de equilíbrio entre oferta hídrica e produtividade, possibilitando economia de água sem prejuízo significativo de rendimento. Do ponto de vista do uso de água produzida de petróleo tratada, essa estratégia é especialmente relevante, pois permite maximizar a eficiência do uso de recursos hídricos alternativos sem comprometer a produtividade de raízes, algo que tem sido destacado em trabalhos que discutem a otimização da irrigação em culturas radiculares sob restrições de disponibilidade hídrica e estresse ambiental (MUTANDA *et al.*, 2025).

É importante ressaltar que, não foi detectado efeito negativo da salinidade sobre a produtividade de raízes, o que indica que a água produzida tratada, após o devido manejo e tratamento, pode atender aos critérios de uso agrícola sem prejuízos significativos ao rendimento a cultivar Venancio. Esse achado é consistente com achados experimentais que mostram que a mandioca pode manter produtividade expressiva mesmo sob condições moderadas de salinidade, desde que manejada de forma adequada, embora em níveis muito elevados de salinidade haja impactos negativos sobre crescimento e acúmulo de reservas (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

O desempenho superior da lâmina 75% da ETc, em relação à lâmina 100% da ETc, indica que a aplicação de volumes excessivos de água não resulta necessariamente em aumento

da produtividade, podendo, ao contrário, exercer efeitos negativos sobre o desenvolvimento radicular e o acúmulo de reservas nas raízes tuberosas. Esse comportamento sugere que o excesso de água pode comprometer aeração do solo, favorecer perdas de nutrientes por lixiviação e reduzir a eficiência fisiológica da planta, refletindo-se em menor produtividade.

Esses fatores estão associados, principalmente, à redução da aeração do solo e à ocorrência de condições de hipóxia radicular, que comprometem a respiração das raízes e a absorção de nutrientes. Além disso, lâminas excessivas favorecem a lixiviação de nutrientes essenciais e o desbalanço iônico na rizosfera, reduzindo a eficiência fisiológica da planta e o direcionamento de fotoassimilados para as raízes tuberosas. Tais condições podem limitar o crescimento radicular e o acúmulo de reservas, mesmo sob regimes hídricos aparentemente favoráveis (MUTANDA *et al.*, 2025; SILVA *et al.*, 2022).

A tendência de diminuição de produtividade observada sob a lâmina máxima (100% da ETc) reforça a hipótese de que a mandioca apresenta melhor desempenho sob condições de irrigação moderada, nas quais o suprimento hídrico atende às demandas da cultura sem causar estresse por excesso de umidade. Esse resultado é particularmente relevante em sistemas irrigados que utilizam fontes hídricas não convencionais, como a água produzida de petróleo tratada, pois demonstra que a adoção de lâminas intermediárias pode otimizar simultaneamente a produtividade e o uso do recurso hídrico.

Além disso, as estratégias de manejo baseadas exclusivamente na reposição total da ETc podem não ser as mais eficientes para a cultura da mandioca. A superioridade da lâmina de 75% da ETc indica a existência de um ponto ótimo de irrigação, no qual ocorre o equilíbrio entre disponibilidade hídrica, condições físicas do solo e eficiência fisiológica da planta.

4.2.2 Teor de matéria seca da raiz e efeito da água produzida sintética

Os valores médios de percentual de matéria seca da raiz, apresentados (Figura 16), indicam que a irrigação com água de maior salinidade (S2 – 4,8 dS m⁻¹) resultou, de modo geral, em maiores teores de matéria seca quando comparada à água de baixa salinidade. Esse comportamento é visualmente confirmado no Gráfico de %MS da raiz por lâmina × salinidade, no qual se observa que, em praticamente todas as lâminas, a água produzida promoveu incremento no teor de matéria seca das raízes.

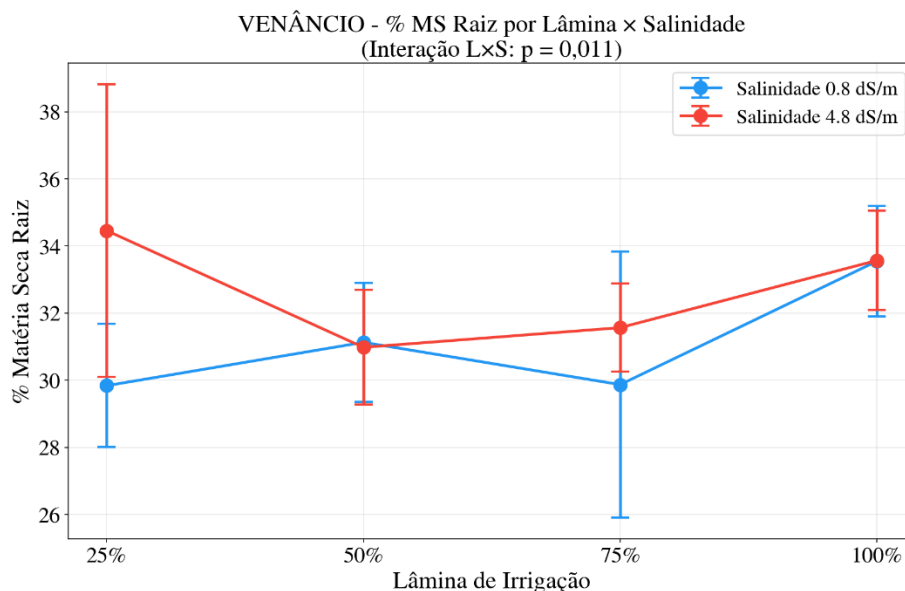


Figura 16. Teor de matéria seca nas raízes da cultivar Venâncio em função da lâmina de irrigação aplicada para dois tipos de água de irrigação.

Esse aumento pode ser interpretado como uma resposta fisiológica da cultura ao estresse salino de forma moderada, que tende a reduzir o acúmulo de água nos tecidos e favorecer maior concentração de sólidos (CRUZ *et al.*, 2017). Do ponto de vista industrial, esse resultado é altamente relevante, pois maiores teores de matéria seca estão diretamente associados ao maior rendimento de amido, principal produto de interesse econômico da mandioca.

Destaca-se ainda que, mesmo sob a menor lâmina (25% da ETc), a água produzida (S2) proporcionou valores de %MS superiores aos observados com água de baixa salinidade, sugerindo que o uso dessa água não compromete a qualidade das raízes, desde que associada a um manejo hídrico adequado. Esse comportamento é coerente com evidências de que, em sistemas irrigados de mandioca, ajustes fisiológicos como a regulação estomática e a maior proporção de solutos podem auxiliar a manutenção da integridade metabólica sob estresse salino moderado, sem comprometer aspectos qualitativos importantes para fins industriais (CRUZ *et al.*, 2017).

4.2.3 Produção de biomassa e matéria seca da parte aérea e eficiência agrônômica para produção de amido

A eficiência do uso da água (EUA) é um indicador essencial em sistemas agrícolas irrigados, pois expressa a relação entre a produção obtida e o volume de água aplicado, permitindo avaliar o quão eficientemente o recurso hídrico é convertido em produto agrícola, sendo particularmente determinante em regiões semiáridas e quando se empregam fontes hídricas não convencionais, como a água produzida de petróleo tratada (Tabela 7).

Tabela 7. Eficiência do uso da água (EUA) e consumo específico de água para produção de amido da cultivar Venancio.

Lâmina	EUA, kg/m ³	Água (m ³ /t amido)		
		Média estimada	IC95% Inf	IC95% sup
L1 (25%)	1,73	869,77	632,48	1107,06
L2 (50%)	1,06	1738,30	1280,46	2196,13
L3 (75%)	0,98	1492,45	1020,95	1963,96
L4 (100%)	0,82	1790,25	1307,25	2273,24

IC95%inf – intervalo de confiança inferior, IC95%sup – intervalo de confiança superior

Os resultados apresentados na Tabela 8 evidencia-se que a eficiência do uso da água (EUA) da cultivar Venancio foi fortemente influenciada pela lâmina de irrigação, destacando-se a lâmina L1 (25% da ETc) como a mais eficiente entre os tratamentos avaliados. Sob essa condição, a cultura produziu 1,73 kg de amido por metro cúbico de água aplicada, valor que corresponde a mais que o dobro da eficiência observada na lâmina L4 (100% da ETc).

A superioridade da lâmina L1 em termos de eficiência hídrica decorre do fato de que a expressiva redução no volume de água aplicada não resultou em queda proporcional na produção de amido. Esse comportamento indica que, mesmo sob irrigação deficitária, a mandioca foi capaz de manter níveis relativamente elevados de produção, refletindo sua reconhecida tolerância a condições de restrição hídrica. Assim, pequenas reduções na produtividade absoluta são compensadas por uma economia substancial de água, resultando em maior eficiência global do sistema. Em particular, pesquisas apontam que o manejo hídrico deficitário pode otimizar o balanço entre crescimento vegetativo e uso de água, favorecendo tanto a eficiência quanto a sustentabilidade do sistema produtivo, especialmente em ambientes com restrição hídrica (MUTANDA *et al.*, 2025).

Em contraste, a lâmina L4, apesar de fornecer maior disponibilidade hídrica, apresentou os menores valores de eficiência do uso da água. Isso sugere que a irrigação plena não se traduziu em incrementos produtivos proporcionais ao volume de água aplicado, evidenciando um uso menos eficiente do recurso hídrico. Esse resultado ressalta a importância de considerar a eficiência do uso da água, além dos rendimentos absolutos, na definição das estratégias de irrigação em culturas adaptadas a ambientes com limitação hídrica.

Do ponto de vista agrônomo e ambiental, os dados da Tabela 8 indicam que estratégias de irrigação deficitária controlada para a cultivar Venancio podem ser altamente vantajosas, especialmente em sistemas que utilizam fontes hídricas não convencionais, como a água

produzida de petróleo tratada. A maximização da eficiência do uso da água sob lâminas reduzidas contribui para a racionalização do consumo hídrico, tornando o sistema mais resiliente em cenários de escassez de água.

Portanto, os resultados obtidos demonstram que a escolha da lâmina de irrigação deve considerar não apenas a produtividade absoluta, mas também a eficiência do uso da água. A lâmina de 25% da ETc destaca-se como a mais eficiente, evidenciando que o manejo hídrico racional é uma estratégia fundamental para a sustentabilidade da produção de mandioca irrigada, particularmente quando se busca integrar o uso de águas salinas como a água produzida aos sistemas agrícolas bioenergéticos.

No que se refere ao tempo de colheita, é um fator determinante no desempenho agrônomo da mandioca, pois influencia diretamente o acúmulo de biomassa, a alocação de reservas nas raízes tuberosas e a eficiência do uso dos recursos hídricos. A definição adequada do momento de colheita permite otimizar a relação entre produtividade e consumo de água, além de refletir o equilíbrio entre o desenvolvimento da parte aérea e das raízes.

Os resultados apresentados na Tabela 8 reforçam que o tempo de colheita exerceu influência determinante sobre o desempenho produtivo e a eficiência do uso da água pela cv. Venâncio. Destaca-se que a colheita aos oito meses após o plantio (T8) proporcionou a maior produtividade de raízes frescas (20,52 t ha⁻¹) e de amido (5,84 t ha⁻¹), além de apresentar a melhor eficiência hídrica, expressa pelo menor consumo específico de água por tonelada de amido produzida (901,90 m³ t⁻¹). Isso indica que, nesse estágio, a planta alcança um equilíbrio fisiológico entre desenvolvimento vegetativo, acúmulo de reservas radiculares e exploração hídrica, comportamento também documentado em pesquisas sobre irrigação e produtividade da mandioca, nas quais condições moderadas de água tendem a otimizar a relação entre fotossíntese, transpiração e destinação de carboidratos para as raízes (MUTANDA *et al*, 2025)

Tabela 8. Rendimento de raízes e de amido, teor de matéria seca na parte aérea e uso específico de água de irrigação por produção de amido, em função do tempo de colheita da mandioca.

Tempo	RAIZ (t ha ⁻¹)	Amido (t ha ⁻¹)	Biomassa %MS	Água m ³ /t amido
T8 (8 meses)	20,52	5,84	30,57	901,90
T10 (10 meses)	18,84	4,45	26,00	1381,70
T11 (11 meses)	14,70	3,62	32,83	1426,64
T6 (6 meses)	10,54	2,39	22,70	2180,53

A superioridade do tempo de colheita T8 sugere que a cultura atinge elevada eficiência fisiológica, com maior direcionamento dos fotoassimilados para as raízes tuberosas, sem incremento proporcional da demanda hídrica. Esse comportamento é particularmente relevante em sistemas irrigados, pois demonstra que a definição adequada do momento de colheita pode resultar em ganhos simultâneos de produtividade e eficiência do uso da água, independentemente do volume total aplicado ao longo do ciclo.

Em contraste, as colheitas tardias (10 e 11 meses) apresentaram os maiores valores de percentual de matéria seca da biomassa aérea, indicando maior grau de maturação da parte aérea. Esse resultado sugere que, a partir desse período, ocorre maior lignificação e acúmulo de compostos estruturais no colmo, o que pode ser vantajoso para finalidades como produção de biomassa ou aproveitamento energético.

Portanto, com os dados da Tabela 8 indica-se que a colheita aos oito meses representa a estratégia mais eficiente quando o objetivo é maximizar a produção de raízes e amido com menor consumo específico de água. Por outro lado, colheitas mais tardias favorecem a maturação da parte aérea, o que pode ser considerado em sistemas com objetivos alternativos, como produção de biomassa, reforçando a importância de alinhar o tempo de colheita às metas produtivas e ambientais do sistema agrícola.

Esses efeitos são claramente observados nos Gráficos de produção de biomassa por lâmina $\times$ tempo (Figura 17). O gráfico evidencia a interação significativa entre esses fatores ($L \times T$; $p = 0,002$), indicando que a resposta da biomassa aérea da cultivar Venâncio depende simultaneamente do regime hídrico adotado e do estágio de desenvolvimento da cultura. Esse comportamento sugere que a dinâmica de acúmulo de biomassa não é linear ao longo do ciclo, sendo fortemente influenciada pelo manejo da irrigação.

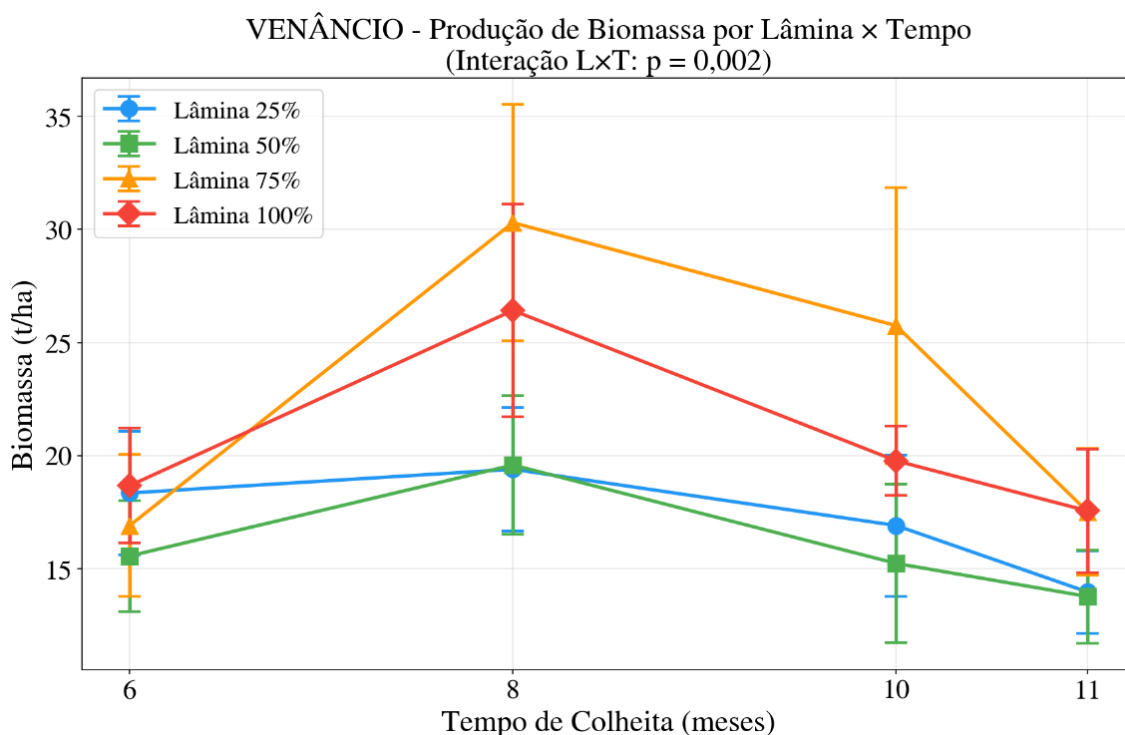


Figura 17. Produtividade média de biomassa da cultivar Venancio por lâmina x tempo de colheita.

Observa-se ainda que, independentemente da lâmina aplicada, a maior produção de biomassa ocorreu aos oito meses após o plantio, destacando-se especialmente a lâmina de 75% da ETc, que apresentou os maiores valores absolutos. Esse resultado sugere que, nesse período, a cultura atinge um ponto de máximo vigor vegetativo, com elevada eficiência na conversão de recursos em biomassa aérea. Esse comportamento está em consonância com relatos experimentais em mandioca, nos quais níveis moderados de irrigação sustentam vigor na biomassa e produtividade, enquanto regimes extremos (deficiente ou excessivo) comprometem esses processos fisiológicos (MUTANDA *et al.*, 2025).

Após os oito meses, observa-se redução gradual da produção de biomassa, particularmente aos dez e onze meses, independentemente da lâmina. Esse comportamento indica a transição fisiológica da cultura, com redução do crescimento vegetativo e maior direcionamento dos fotoassimilados para processos de maturação, especialmente da parte aérea. Tal tendência é coerente com o aumento do percentual de matéria seca do colmo observado em colheitas mais tardias, indicando maior lignificação e senescência dos tecidos. Esse padrão é consistente com o comportamento fenológico da mandioca, em que fases tardias são associadas ao esgotamento das capacidades de expansão foliar e incremento de tecidos de sustentação, como observado em estudos fisiológicos da cultura (MUTANDA *et al.*, 2025).

As lâminas reduzidas (25% e 50% da ETc) apresentaram menores valores de biomassa ao longo do ciclo, embora tenham mantido comportamento semelhante quanto ao padrão temporal, com pico aos oito meses, evidenciando que, embora a mandioca apresente tolerância ao déficit hídrico, o crescimento da biomassa aérea é sensível à limitação de água, especialmente em estádios de maior demanda fisiológica. Entretanto, com a reposição da menor lâmina de irrigação, o rendimento obtido aos 6 meses não difere do obtido aos 8 meses.

A combinação entre lâminas intermediárias de irrigação e colheita aos oito meses maximiza a produção de biomassa aérea da cv. Venâncio. Esse achado possui implicações diretas para sistemas produtivos que visam o aproveitamento da biomassa para fins energéticos ou ambientais, como a produção de biochar, além de reforçar a importância do manejo conjunto da irrigação e do tempo de colheita para otimizar o desempenho agrônomo da cultura.

4.2.4 Eficiência do uso da água e consumo hídrico

Os dados de consumo de água por tonelada de amido produzido, apresentados na Tabela 9 e sintetizados no mapa de calor do consumo de água (Gráfico de eficiência hídrica, Figura 18), revelam interação significativa entre lâmina, salinidade e tempo de colheita ($L \times S \times T$; $p = 0,027$). Os tratamentos com menor consumo específico de água por tonelada de amido produzido estiveram predominantemente associados às lâminas reduzidas de irrigação (25%, 50% ou 75% da ETc), confirmando a superioridade dessas estratégias em termos de eficiência hídrica. Essa tendência de maior eficiência sob regimes de irrigação deficitária já foi observada em diversas culturas tolerantes à seca, nas quais a redução do volume de água aplicada é compensada por respostas fisiológicas que mantêm a produção sem perdas proporcionais no uso da água (CAVALCANTE *et al.*, 2022).

Tabela 9. Melhores valores de eficiência do uso de água por tonelada de amido da cultivar Venancio.

L	S	T	m ³ /t amido	EP	IC95%inf	IC95%sup
25%	0,8 dS/m ⁻¹	8 meses	460,48	90,56	283,0	638,0
25%	4,8 dS/m ⁻¹	8 meses	571,46	258,2	65,4	1077,5
50%	4,8 dS/m ⁻¹	8 meses	592,89	172,1	255,7	930,1
75%	0,8 dS/m ⁻¹	8 meses	660,04	146,4	373,1	947,0
25%	0,8 dS/m ⁻¹	6 meses	710,17	211,5	295,7	1124,6

EP –Erro padrão, IC95%inf – intervalo de confiança inferior, IC95%sup – intervalo de confiança superior

De modo consistente, os menores consumos hídricos ocorreram quando as lâminas reduzidas foram combinadas com a água de maior salinidade ($4,8 \text{ dS m}^{-1}$) e com a colheita realizada aos oito meses após o plantio. Essa combinação evidencia que o uso da água produzida, quando associado a um manejo hídrico racional e à definição adequada do tempo de colheita, não apenas mantém a produção de amido, como também maximiza a eficiência do uso da água.

O desempenho superior dos tratamentos envolvendo a água produzida utilizada pode ser atribuído, em parte, ao menor volume total de água aplicado ao longo do ciclo, sem redução proporcional na produção de amido, reforçando a capacidade da cultivar Venâncio de manter desempenho produtivo sob condições de irrigação deficitária e salinidade moderada. Estudos sobre crescimento, produtividade e respostas fisiológicas da mandioca sob diferentes níveis de irrigação concluem que a cultura apresenta adaptações que permitem eficiência hídrica elevada mesmo quando a água aplicada é restrita, aspecto que contribui para sua adaptação em sistemas irrigados do semiárido brasileiro (SILVA *et al.*, 2022).

Do ponto de vista prático, considerando os dados da Tabela 9, indica-se que a adoção de lâminas reduzidas, aliada ao uso de água produzida de petróleo tratada ou a menor lâmina com água de baixa salinidade, e a colheita aos oito meses, configura-se como a estratégia mais eficiente para minimizar o consumo hídrico por unidade de produto. Tal abordagem é especialmente relevante em regiões com restrição de recursos hídricos, pois contribui para a sustentabilidade do sistema de produção, ao mesmo tempo em que promove o reuso seguro de efluentes industriais na agricultura.

A visualização integrada por meio do mapa de cores sintetiza os efeitos combinados da lâmina de irrigação, da qualidade da água e do tempo de colheita. As tonalidades mais verdes, indicativas de menor demanda hídrica, concentram-se predominantemente nos tratamentos submetidos às lâminas reduzidas (25 % e 50 % da ETc), especialmente quando associadas à água de maior salinidade (S2 – $4,8 \text{ dS m}^{-1}$) ou a Lâmina de 25% com água doce, e à colheita aos oito meses. Esse padrão visual reforça os resultados observados nas análises quantitativas, evidenciando que a eficiência hídrica máxima não é alcançada por irrigação plena, mas sim por meio de manejo hídrico deficitário controlado aliado ao uso de água produzida de petróleo, um comportamento coerente com achados em contextos de manejo de água alternativa em sistemas semiáridos. (CAVALCANTE *et al.*, 2022).

Com os resultados, evidencia-se que a água produzida de petróleo, quando utilizada de forma planejada, pode contribuir significativamente para o aumento da eficiência do uso da água na agricultura. Em um contexto de escassez hídrica e crescente demanda por soluções sustentáveis, o reuso desse tipo de água representa uma alternativa viável, alinhada aos princípios da economia circular e da gestão integrada dos recursos hídricos.

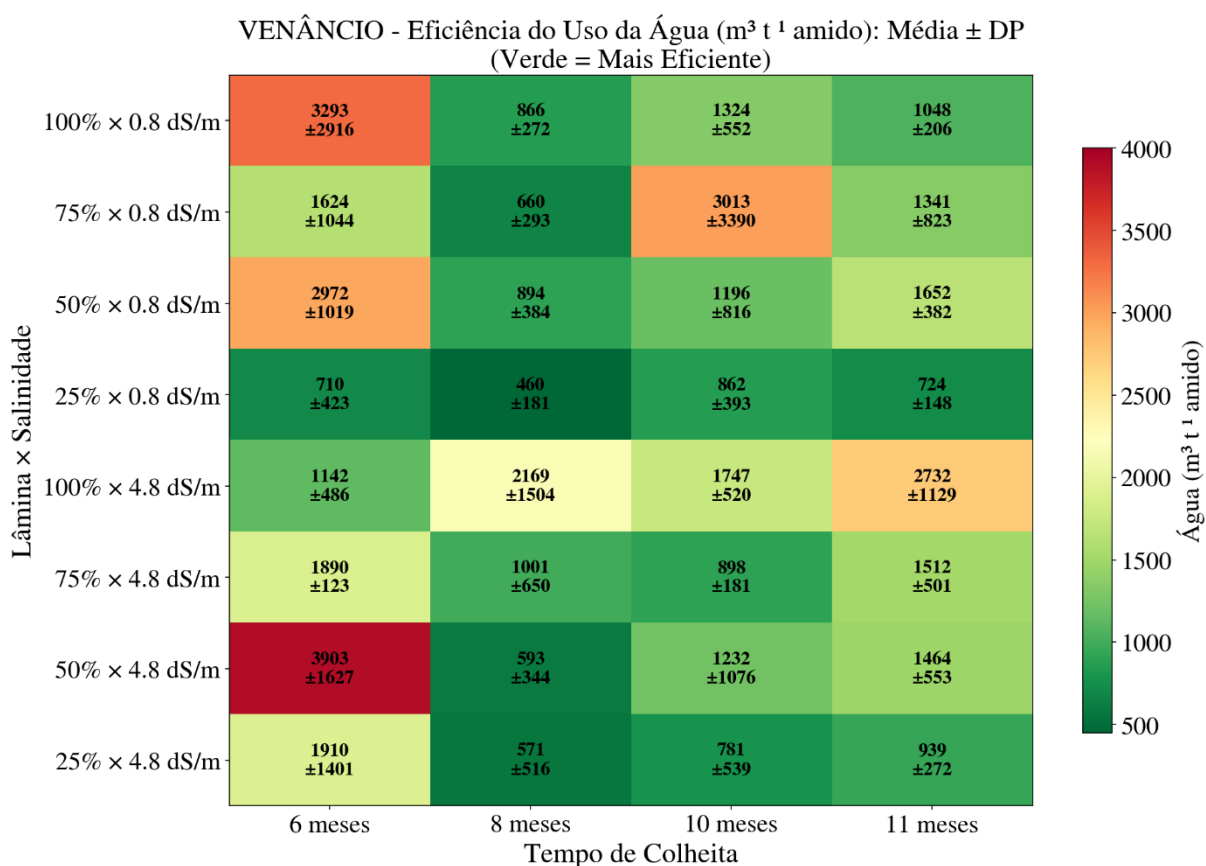


Figura 18. Medias de eficiência do uso da água cultivar Venâncio.

Em contrapartida, os tratamentos caracterizados por lâminas elevadas (75% e 100% da ETc) e colheitas mais tardias tendem a apresentar tonalidades mais amareladas e avermelhadas, indicando maior consumo hídrico por unidade de produto. Esse comportamento evidencia que o aumento da lâmina não se traduz em ganhos proporcionais de produtividade de amido, resultando em menor eficiência do uso da água, especialmente quando associado ao prolongamento do ciclo, reforçando a importância de estratégias de irrigação que considerem tanto a quantidade quanto a qualidade da água (CAVALCANTE *et al.*, 2022).

A presença consistente da água produzida (S2) entre os tratamentos mais eficientes sugere que, após os tratamentos adequados e dentro dos limites estabelecidos pela legislação

ambiental vigente, essa fonte hídrica pode ser incorporada de forma segura e eficiente aos sistemas agrícolas industriais. O mapa de cores demonstra, de maneira clara e intuitiva, que a qualidade da água, quando associada a estratégias adequadas de manejo da irrigação e do tempo de colheita, não constitui fator limitante para a eficiência produtiva da mandioca (CAVALCANTE *et al.*, 2022).

Portanto, o mapa de cores consolida visualmente a principal conclusão do estudo: a otimização da eficiência hídrica na cultura da mandioca é alcançada por meio do manejo integrado da lâmina de irrigação, da qualidade da água e do tempo de colheita, com destaque para o uso de água produzida de petróleo sob lâminas reduzidas e colheita aos oito meses, configurando-se como uma alternativa agronomicamente eficiente e ambientalmente sustentável.

4.2.5 O potencial de produção de biochar e sequestro de CO₂ sob uso de água produzida

A produção de biomassa aérea da mandioca e matéria seca da biomassa, apresentam relevância estratégica quando analisada sob a perspectiva de sustentabilidade e mitigação de emissões de gases de efeito estufa, especialmente pelo seu potencial de conversão em biochar. Os resultados obtidos neste estudo indicam que o uso da água produzida de petróleo sintética com salinidade de 4,8 dS m⁻¹ (S2), não comprometeu a produção de biomassa aérea da cultivar Venâncio (Figura 19), permitindo sua utilização como matéria-prima para a geração de biochar e consequente sequestro de carbono (Figura 20).

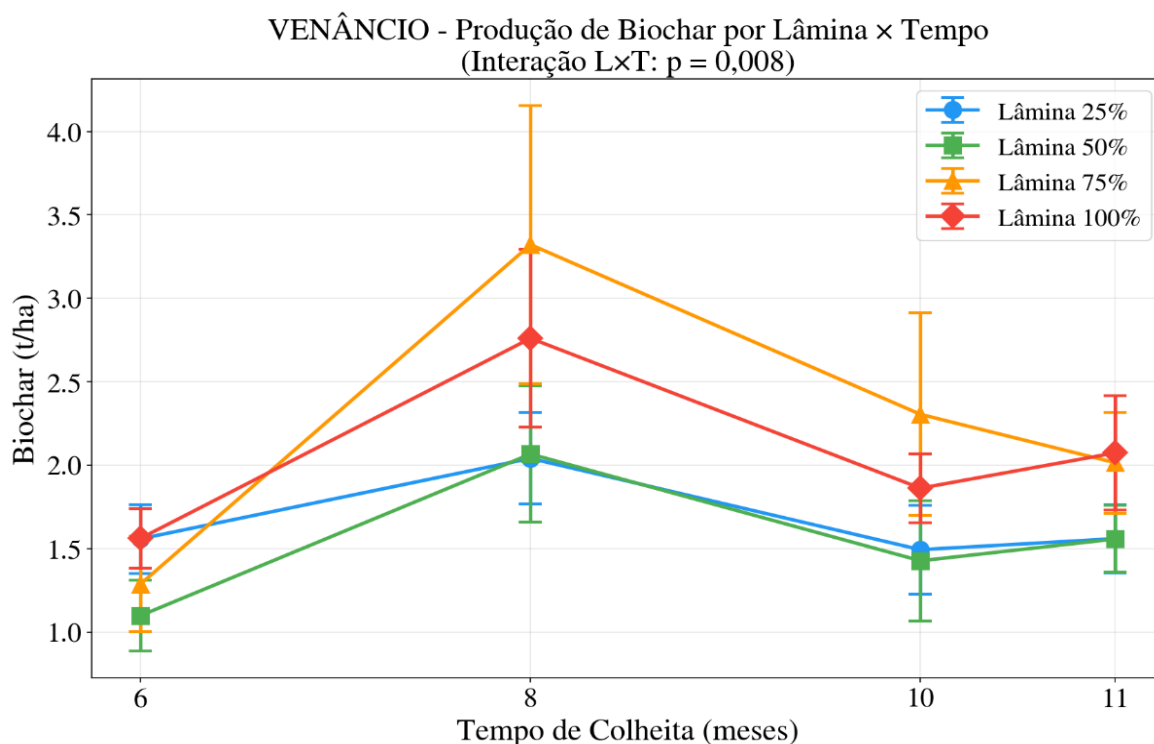


Figura 19. Produção média de biochar cultivar Venâncio por lâmina x tempo de colheita.

Os maiores valores de produção de biochar e CO₂ equivalente foram observados aos oito meses após o plantio, particularmente sob lâmina de irrigação de 75% da ETc. Esse comportamento sugere que esse período corresponde a uma fase de maior eficiência na alocação de carbono para a parte aérea, resultando em maior acúmulo de biomassa passível de aproveitamento energético e ambiental. A manutenção desse padrão sob irrigação com água produzida de petróleo sintética (S2) evidencia que o estresse salino moderado não limitou os processos fisiológicos responsáveis pelo crescimento vegetativo e pela fixação de carbono atmosférico.

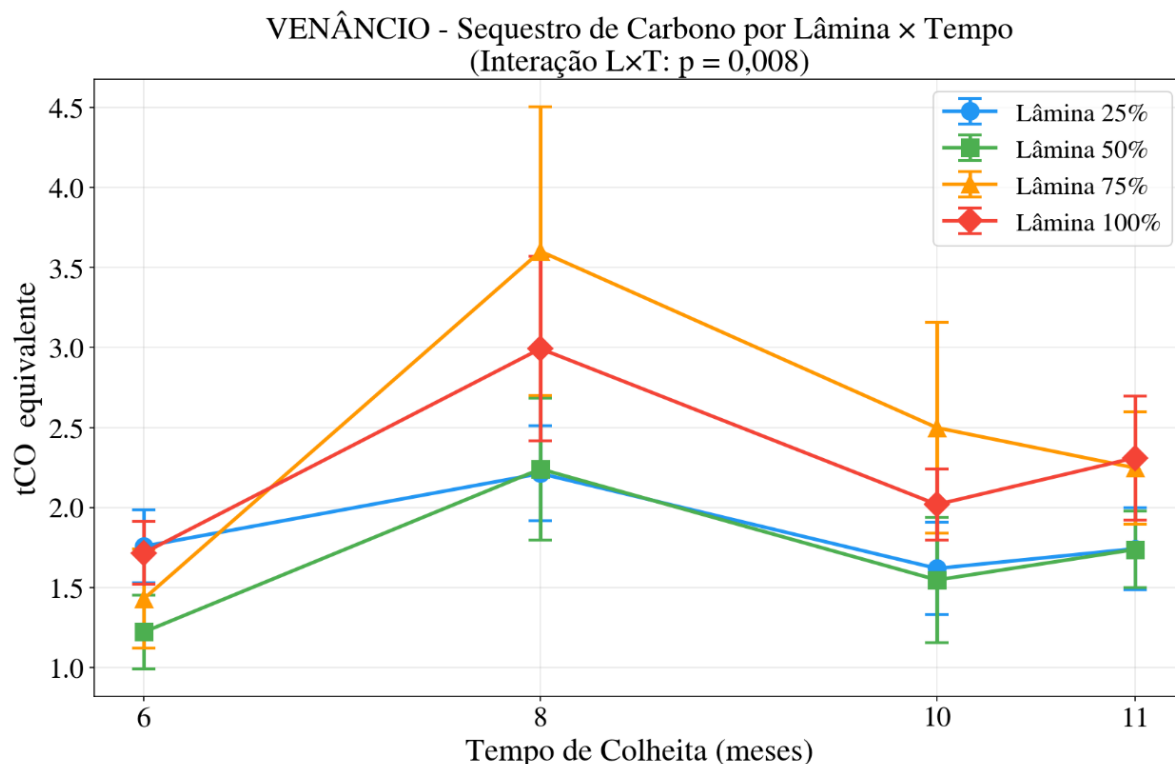


Figura 20. Estimativa de sequestro de carbono por lâmina x tempo na cultivar Venâncio.

A conversão da biomassa aérea em biochar representa uma estratégia eficaz para o sequestro de carbono de longo prazo, uma vez que o carbono estabilizado nesse material apresenta alta resistência à decomposição microbiana, permanecendo no solo por décadas ou séculos, o que pode aumentar simultaneamente o estoque de carbono orgânico do solo (BISWAL *et al* 2025). Estudos demonstram que biochar produzido a partir de resíduos agrícolas possui propriedades físico-químicas que favorecem a retenção de carbono por longos períodos, resultando em potencial de sequestro de carbono significativamente maior do que a matéria orgânica deixada para decomposição natural (VENKATESH *et al.*, 2022). Portanto, os valores estimados de biochar e de CO₂ equivalente obtidos neste estudo indicam que o sistema produtivo avaliado possui potencial para atuar como sumidouro de carbono, contribuindo para a mitigação das emissões associadas às atividades agrícolas e industriais.

O uso agrícola da água produzida de petróleo assume papel ainda mais relevante, pois associa o reaproveitamento de um efluente industrial ao fornecimento de matéria-prima para biochar, integrando a produção agrícola a estratégias de mitigação climática. Em muitos estudos, a adição de biochar ao solo tem sido apontada como um meio de aumentar o estoque de carbono orgânico, reduzir emissões de gases como óxidos de nitrogênio e, em alguns casos, melhorar a eficiência de uso da água e a retenção hídrica do solo (ZANG *et al.*, 2023).

Além do sequestro de carbono, o biochar obtido a partir da biomassa da mandioca pode ser reincorporado ao solo agrícola, promovendo melhorias nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, tais como aumento da retenção de água, da capacidade de troca catiônica e da disponibilidade de nutrientes (HAMISSOU *et al.*, 2023). Desse modo, estabelece-se um ciclo virtuoso em que a água produzida tratada viabiliza a produção de biomassa, a biomassa gera biochar, e o biochar contribui para a sustentabilidade do sistema produtivo, potencializando a resiliência da cultura em ambientes com restrição hídrica.

4.2.6 Produção potencial de etanol da cultivar Venâncio em comparação à cana-de-açúcar no Nordeste brasileiro

A produção potencial de etanol da cultivar Venâncio, apresentada no gráfico de cores correspondente (Figura 21), demonstra que o desempenho energético da cultura resulta do manejo integrado dos fatores (L x S x T). Os valores estimados de produção variaram de 0,50 a 5,86 m³ ha⁻¹, com os maiores rendimentos concentrados, de forma consistente, na colheita aos oito meses após o plantio, confirmando esse período como o ponto ótimo de acúmulo de amido e conversão energética, em consonância com os resultados agrônômicos previamente discutidos.

Os maiores valores de produção de etanol foram observados sob água de baixa salinidade (0,8 dS m⁻¹) e lâmina de 100% da ETc aos oito meses (5,86 m³ ha⁻¹), bem como sob água salina (4,8 dS m⁻¹) associada à lâmina intermediária de 75% da ETc, que resultou em 5,24 m³ ha⁻¹ no mesmo período (Figura21). Esses resultados indicam que, mesmo sob uso de água produzida tratada, a cultivar Venâncio é capaz de atingir patamares expressivos de produção de etanol, desde que associada a estratégias adequadas de manejo hídrico e definição do momento de colheita.

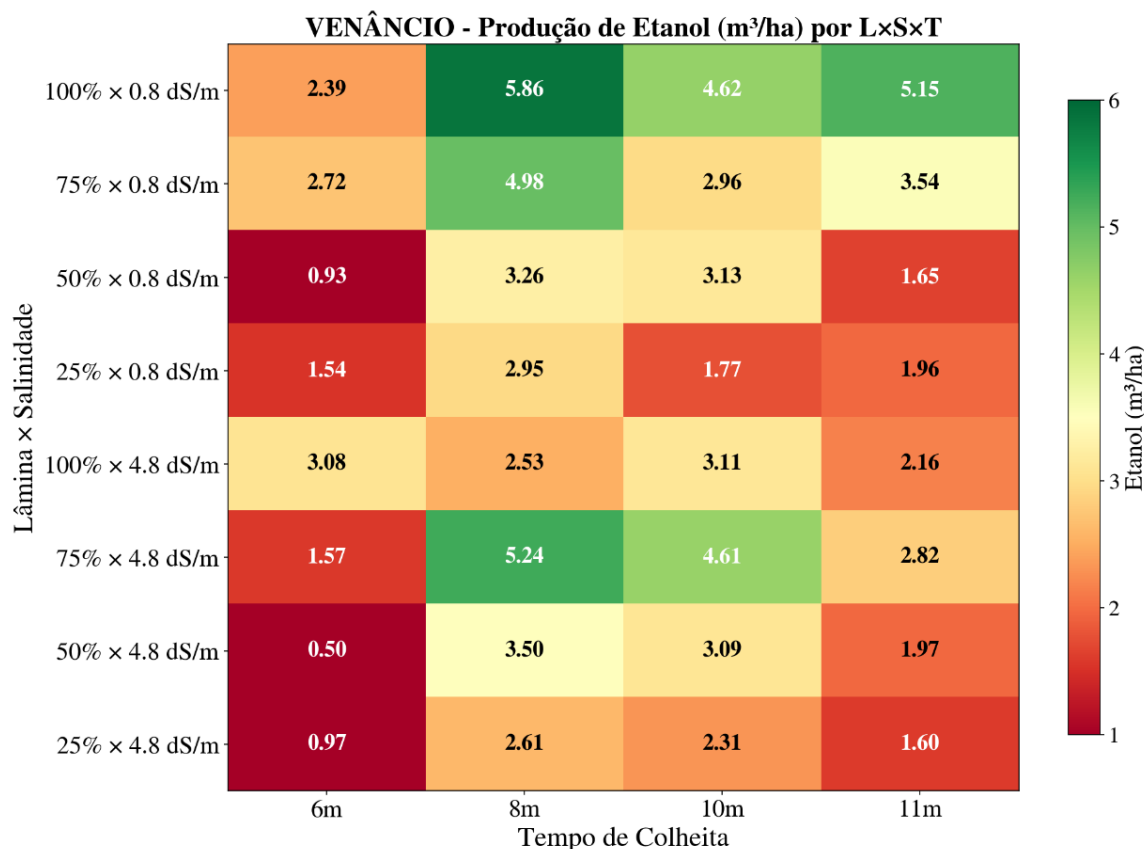


Figura 21. Estimativa de produção de etanol a partir da produção de amido na cultivar Venâncio.

Em média, sistemas de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar no Nordeste podem situar-se na faixa de 5 a 7 m³ ha⁻¹ sob condições de elevada disponibilidade hídrica e manejo intensivo (incluindo irrigação e processamento industrial otimizado). Esses números são compatíveis com dados de produtividade industrial regionais que reportam crescimento da produção de etanol hidratado em usinas nordestinas, ainda que em contextos climáticos e operacionais específicos (SINDIPE, 2025).

Nesse contexto, observa-se que os melhores tratamentos da cultivar Venâncio alcançam produções de etanol comparáveis às médias regionais da cana-de-açúcar, especialmente quando considerada a colheita aos oito meses, com a vantagem adicional de menor ciclo produtivo e maior flexibilidade de manejo. Ademais, diferentemente da cana-de-açúcar, a mandioca apresenta maior tolerância ao uso de águas de qualidade inferior, como a água produzida de petróleo, o que amplia seu potencial de inserção em sistemas produtivos do Semiárido, onde a disponibilidade de água doce é limitada.

Sob a perspectiva do manejo hídrico, com os resultados, indica-se que a irrigação plena não é condição indispensável para maximizar a produção de etanol da cultivar Venâncio, especialmente sob condições de salinidade elevada. As lâminas intermediárias mostraram-se mais eficientes em determinados cenários, sugerindo que o manejo deficitário controlado pode reduzir o aporte total de sais ao solo e melhorar a eficiência do uso da água, comportamento que contrasta com respostas típicas observadas na cana-de-açúcar, cuja produtividade e rendimento industrial tendem a ser fortemente penalizados sob déficit hídrico e salinidade moderada a alta (EMBRAPA, 2025).

Do ponto de vista estratégico, esses dados reforçam que a macaxeira, representada pela cultivar Venâncio, não deve ser interpretada como substituta direta da cana-de-açúcar na matriz energética do Nordeste brasileiro, mas sim como uma cultura complementar. Sua relevância reside na capacidade de produzir etanol em níveis competitivos quando consideradas as restrições hídricas regionais, o uso de fontes de água não convencionais e a necessidade de diversificação dos sistemas produtivos energéticos.

Assim, a cultivar Venâncio apresenta elevado potencial para integrar sistemas descentralizados de produção de etanol no Semiárido brasileiro, especialmente em áreas onde a cana-de-açúcar enfrenta limitações técnicas, econômicas ou ambientais. A combinação entre colheita aos oito meses, lâminas intermediárias de irrigação e uso de água produzida de petróleo configura-se como uma estratégia agronomicamente viável, ambientalmente sustentável e energeticamente eficiente, alinhada às demandas contemporâneas de racionalização do uso da água e diversificação da matriz agroenergética regional.

4.2.7 Resiliência e viabilidade da cultivar Venâncio para uso agrícola

Diferente de outras variedades, a cultivar Venâncio demonstra uma adaptação superior ao uso de águas não convencionais, como a água produzida de petróleo. Os resultados permitem as seguintes conclusões:

Alta Tolerância à Salinidade: A salinidade de $4,8 \text{ dS m}^{-1}$ não comprometeu a produtividade de raízes nem de amido, indicando que a Venâncio possui mecanismos de ajuste osmótico eficientes. Pelo contrário, o estresse salino moderado atuou como um estimulante para o incremento do teor de matéria seca nas raízes, um atributo altamente desejável para a indústria de amido e bioetanol.

Otimização Hídrica e o Ponto Ótimo (75% da ETc): A cultivar não exige irrigação plena para expressar seu potencial. A lâmina de 75% da ETc superou a de 100%, sugerindo que o excesso de água pode ser prejudicial (causando anoxia radicular ou lixiviação). Esse "ponto de equilíbrio" permite uma economia direta de 25% de água sem perdas produtivas, otimizando o uso da água produzida de petróleo.

Máxima Eficiência em Ciclos Curtos (8 meses): A colheita aos oito meses consolidou-se como a "janela de ouro", proporcionando o melhor balanço entre produtividade (20,52 t ha⁻¹ de raízes) e eficiência hídrica. Após esse período, a planta tende a redirecionar energia para a lignificação da parte aérea (biomassa e biochar), resultando em queda na eficiência de produção de amido.

Competitividade Bioenergética: Com uma produção potencial de etanol de até 5,86 m³ ha⁻¹, a cultivar Venâncio equipara-se à produtividade da cana-de-açúcar no Nordeste, com as vantagens de um ciclo mais curto e maior tolerância a solos e águas salinas. Isso a posiciona como uma cultura estratégica complementar, capaz de descentralizar a produção de bioenergia em áreas onde a cana-de-açúcar é inviável.

Sustentabilidade e Biochar: A interação entre manejo hídrico e tempo de colheita permite que a cultivar atue como um eficiente dreno de carbono. A produção de biomassa para biochar e o consequente sequestro de CO₂ equivalente alcançam seu ápice aos 8 meses sob lâmina intermediária, validando o sistema como um modelo de bioeconomia circular *carbon-negative*.

4.3 Comparação entre as cultivares Venâncio e Recife

Os resultados obtidos evidenciam diferenças marcantes entre as cultivares criolas Recife e Venâncio quanto à resposta ao manejo da irrigação, à salinidade da água e ao tempo de colheita, permitindo inferências consistentes sobre sua adaptação agrônômica, eficiência hídrica, qualidade industrial e potencial agroenergético em condições semiáridas. A análise integrada dos fatores revelou que a escolha da cultivar exerce papel determinante no sucesso produtivo e na sustentabilidade do sistema, especialmente quando se considera o uso de águas não convencionais, como a água produzida de petróleo tratada.

A cultivar Recife apresentou elevada sensibilidade às interações entre lâmina de irrigação, salinidade e tempo de colheita (Figura 6), caracterizando um comportamento

fisiológico altamente dependente de condições específicas de manejo. A significância da interação tripla para produtividade de raízes indica que seu desempenho ótimo somente é alcançado quando há adequado ajuste simultâneo desses fatores, o que confere maior risco agrônomo em ambientes com variabilidade hídrica ou qualidade de água limitada. Além disso, sob condições de salinidade elevada, a cultivar Recife apresentou redução expressiva na produtividade de matéria seca (Figura 8) e amido (Figura 9), sugerindo maior custo metabólico associado à manutenção do equilíbrio osmótico, com desvio de fotoassimilados da formação de reservas para processos de sobrevivência celular. Seu ciclo produtivo mostrou-se mais tardio, com maior acúmulo de reservas apenas em colheitas mais avançadas, o que implica maior demanda hídrica ao longo do ciclo.

Em contraste, a cultivar Venâncio demonstrou maior estabilidade fisiológica e agrônoma, com respostas mais simples às interações entre os fatores avaliados, indicando maior homeostase interna frente às variações de manejo. Essa cultivar destacou-se pela eficiência no ajuste osmótico, mantendo ou até elevando o teor de matéria seca das raízes sob salinidade moderada (Tabela 9), sem comprometer significativamente a produtividade. Tal comportamento resultou em raízes com maior concentração de amido, agregando valor industrial ao produto. A Venâncio também apresentou ciclo mais precoce, com ponto ótimo de colheita aos oito meses, quando se observaram os maiores valores de eficiência do uso da água e acúmulo de reservas, tornando-a especialmente adequada a sistemas produtivos que priorizam economia hídrica e ciclos curtos.

No que se refere à eficiência do uso da água, ambas as cultivares apresentaram redução da EUA sob lâminas plenas de irrigação, evidenciando o fenômeno de “luxo hídrico”. Contudo, a cultivar Venâncio mostrou-se mais eficiente sob manejo deficitário controlado, especialmente na lâmina correspondente a 75% da ET_c , conciliando produtividade elevada com menor consumo específico de água por unidade de amido produzido. Esse desempenho reforça sua aptidão para regiões semiáridas, onde a disponibilidade hídrica é limitada e o uso racional da água constitui fator crítico de sustentabilidade.

Adicionalmente, a cultivar Venâncio apresentou desempenho superior nos indicadores de bioenergia e serviços ambientais, mantendo elevados rendimentos potenciais de bioetanol e maior produção de biomassa aérea destinada à geração de biochar e ao sequestro de carbono, mesmo sob uso de água salina. Esses resultados ampliam sua relevância estratégica para

sistemas integrados de produção agrícola, bioenergia e mitigação de emissões, especialmente em cenários de reuso de efluentes industriais.

Em síntese, a cultivar Recife pode ser caracterizada como um genótipo de alta produtividade potencial, porém dependente de manejo preciso e disponibilidade de água de boa qualidade, sendo mais indicada para sistemas intensivos e ambientes com menor restrição hídrica. Por sua vez, a cultivar Venâncio configura-se como um genótipo de maior segurança produtiva, com elevada eficiência hídrica, tolerância relativa à salinidade e expressivo potencial agroenergético, destacando-se como alternativa estratégica para a convivência com o semiárido e para a viabilização do uso agrícola de águas residuárias. Esses achados reforçam a importância da integração entre escolha varietal e manejo hídrico como base para a sustentabilidade agronômica, econômica e ambiental da cultura da mandioca em regiões de escassez hídrica.

5. CONCLUSÕES

O reúso de água produzida de petróleo na irrigação da mandioca é uma estratégia tecnicamente viável, ambientalmente sustentável e economicamente promissora, onde o sucesso da produção de amido e bioetanol não depende apenas do aporte hídrico, mas da sinergia entre o genótipo e o manejo do estresse salino.

As cultivares de mandioca criolas Recife e Venâncio apresentam potencial para bioeconomia circular no Semiárido brasileiro, utilizando água produzida do petróleo.

A cultivar Recife caracteriza-se como um genótipo de alta responsividade, cuja performance máxima (superior a 30 t ha⁻¹) é condicionada à baixa salinidade e lâminas de irrigação plenas (100% da ETc). Sua sensibilidade ao estresse salino (4,8 dS m⁻¹) resulta em perdas drásticas de produtividade e eficiência hídrica, tornando-a dependente de recursos hídricos de alta qualidade.

A cultivar Venâncio consolida-se como um genótipo de resiliência superior, demonstrando estabilidade produtiva sob salinidade elevada com potencial de produção de 5,4 m³ de etanol aos 8 meses de cultivo com lamina reduzida e água de 4,8 dSm⁻¹. Nela, o estresse moderado atuou como um indutor qualitativo, elevando o teor de matéria seca das raízes e mantendo o potencial bioenergético competitivo com a cana-de-açúcar regional, mesmo sob irrigação com água produzida de petróleo.

O aproveitamento desse efluente permite a manutenção de sistemas produtivos durante todo o ano, independentemente da sazonalidade das chuvas, reduzindo a pressão sobre os aquíferos de água doce da região. viabilizando a produção de bioetanol em níveis competitivos com a cana-de-açúcar (superando 5,0 m³ ha⁻¹), transformando um passivo ambiental da extração petrolífera em um ativo da matriz energética renovável, promovendo a descarbonização do setor através da produção de biomassa e sequestro de carbono via biochar.

O potencial da água produzida é maximizado com a escolha do genótipo correto. Nesse estudo a cultivar Venâncio revelou-se como a parceira ideal para este recurso, mantendo produtividades de raízes e amido estáveis e aumentando o teor de matéria seca sob irrigação salina, enquanto a cultivar Recife mostrou que águas de qualidade inferior devem ser manejadas com lâminas reduzidas para evitar a degradação do rendimento.

O uso da água produzida de petróleo ‘associado com estratégias de irrigação deficitária (75% da ETc), reduz o aporte acumulado de sais no solo e maximiza a Eficiência do Uso da Água (EUA), indicando que volumes menores de água produzida podem gerar retornos produtivos superiores à irrigação plena em contextos de estresse.

A irrigação da mandioca com água produzida de petróleo, especificamente para a cultivar Venâncio colhida aos 8 meses, configura-se como um modelo de bioeconomia de alto impacto. Esta prática não apenas pode resolver um gargalo ambiental da indústria petrolífera, como também inserir o semiárido Nordestino Brasileiro em uma nova fronteira de produção bioenergética resiliente, eficiente e de baixa emissão de carbono.

6. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS.

Painéis dinâmicos de produção de petróleo e gás natural. Disponível em:

<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/paineis-dinamicos-de-producao-de-petroleo-e-gas-natural>. Acesso em: 6 jan. 2025.

ALVES, A. A. C.; SILVA, A. F.; QUEIROZ, D. C.; DITA, M. A. Avaliação de variedades de mandioca para tolerância à seca, em condições semi-áridas do Brasil. In: **12º Congresso Brasileiro de Mandioca – Mandioca: bioenergia, alimento e renda**, Paranavaí, 2007.

Anais... Paranavaí: Sociedade Brasileira de Mandioca (SBM), 2007. Disponível em:

<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/153895>

ANA – Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**. Brasília: ANA, 2020. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/Acervo/Detalhe/87742

BERA, B. Biochar derivado de biomassa e seu papel no sequestro de carbono e na melhoria da saúde do solo. **Plant Science Review**, v. 5, n. 1, p. 1-7, 2024. DOI: <https://doi.org/10.51470/PSR.2024.05.01.01>

BISWAL, B. K., BALASUBRAMANIAN, R. Use of biomass-derived biochar as a sustainable material for carbon sequestration in soil: recent advancements and future perspectives. **Mater. Sustain.** V 3, ed 26 (2025). <https://doi.org/10.1038/s44296-025-00066-8>

CAMILI, E. A., & CABELLO, C. (2012). Produção de etanol a partir de polpa de mandioca. **Energia na agricultura**, 27(2), 01–19.

<https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2012v27n2p01-19>

CARVALHO, I. T. de; Carvalho, H. W. L de; Oliveira, I. R de; Rangel, M. A. S; Santos, V. da S. **Productivity and drought tolerance of cassava cultivars in the Coastal Tablelands of Northeastern Brazil**. *Ciência Rural*, v. 46, n. 12, p. 2026–2032, 2016. DOI: 10.1590/0103-8478cr20151035. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/cr/a/7T4ZrXBtvZJn6xbnVSHS6Pt/?format=html&lang=en>

CAVALCANTI, J. **Mandioca no semi-árido**. Petrolina, PE: Embrapa Semi-Árido, Comunicado Técnico CPATSA nº 27, maio 2000. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/134153/1/Mandioca-no-Semi-Arido-Instrucoes-Tecnicas-27.pdf>.

CAVALCANTE, E. S.; LACERDA, C. F.; MESQUITA, R. O.; MELO, A. S.; FERREIRA, J. F. S.; TEIXEIRA, A. S.; LIMA, S. C. R. V.; SALES, J. R. S.; SILVA, J. S.; GHEYI, H. R. Supplemental Irrigation with Brackish Water Improves Carbon Assimilation and Water Use Efficiency in Maize under Tropical Dryland Conditions. **Agriculture**. 2022, v 12 ed 4, 544; <https://doi.org/10.3390/agriculture12040544>

CHENG, M; WANG, H; FAN, J; WANG, X; SUN, X; YANG, LI; ZHANG, S; XIANG, Y; ZHANG, S; YOUZHEN, X; FUCANG, Z. Crop yield and water productivity under salty water irrigation: A global meta-analysis. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 255, 107004, out. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107004>.

CHENG,M; WANG, H; FAN, J; WANG,X; SUN, X; YANG, L; ZHANG, S; XIANG, Y; ZHANG, F. Crop yield and water productivity under salty water irrigation: A global meta-analysis. **Agricultural Water Management**. v 256, 1 October 2021, 107105. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107105>

characterizations of biochar prepared for agricultural purposes. **Scientific African**. v 20, July 2023, e01737. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01737>

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Produção de cana-de-açúcar na safra 2025/26 é atualizada para 668,8 milhões de toneladas**. Brasília: Conab, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/producao-de-cana-de-acucar-na-safra-2025-26-e-atualizada-para-668-8-milhoes-de-toneladas>. Acesso em: 21 jan. 2026.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes**. Diário Oficial da União, Brasília, 2011. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=114770>

CRUZ, J. L; COELHO, M. A; COELHO, E. F; SANTOS, A. A. Salinity reduces carbon assimilation and the harvest index of cassava plants (*Manihot esculenta* Crantz). **Acta Sci., Agron**. 39 (4) Oct-Dec 2017. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v39i4.32952>

CRUZ J. L;. COELHO, E. F; FILHO, M. A. C; SANTOS, A. A. Salinity reduces nutrients absorption and efficiency of their utilization in cassava plants. **SOIL SCIENCE • Cienc. Rural** 48 (11), 2018. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20180351>

CRUZ, N. L. R., MORAIS, L. P. L., SILVA, D. V., MEDEIROS, J. F. D., CARMO, F. R. D., SOUTO, A. G. D. L., ANTUNES, L. F. D. S., SILVA, E. F. D., CARVALHO, S. C. F. D., OLIVEIRA, P. V. C. D., MELO, S. B. D., MUNIZ, G. L., REGES, L. B. L., & BATISTA, R. O. Innovative Use of Ultra-Low-Frequency Dynamic Electronic Impulses for Sustainable Performance of Drippers Applying Produced Water. **AgriEngineering**, 2025 , 7 (11), 371; <https://doi.org/10.3390/agriengineering7110371>

CUI, T., ZHANG, Y. Research on the impact of circular economy on total factor carbon productivity in China. **Environ Sci Pollut Res** 29, 78780–78794 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21314-7>

DRECHSEL, P.; MARJANI ZADEH, S.; PEDRERO, F. (Eds). **Water quality in agriculture: Risks and risk mitigation**. Rome: FAO & IWMI, 2023. 192p. <https://doi.org/10.4060/cc7340en>

ELIAS, M.; MUHLEN, G. S.; McKEY, D.; ROA, A. C.; TOHME, J. Genetic diversity of traditional South American landraces of cassava (*Manihot esculenta* Crantz): an analysis using microsatellites. **Economic Botany**, v. 58, n. 1, p. 102–115, 2004. DOI: 10.1007/s12231-004-0146-5. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/4256811>

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Cana-de-açúcar. Brasília, DF, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana-de-acucar>. Acesso em: 21 jan. 2026.

ENESI, R. O., HAUSER, S., PYPERS, P., KREYE, C., TARIKU, M., & SIX, J. Understanding changes in cassava root dry matter yield by different planting dates, crop ages at harvest, fertilizer application and varieties. **European Journal of Agronomy**, (2022) 133, 126448. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126448>

GÓMEZ, A. L. A; CARMONA, C. D. D; SÁNCHEZ, R. Y. F; LADINO, C. J. R; TORO, S. J. C. Biochar production from cassava waste biomass: A techno-economic development approach in the Colombian context. **Bioresource Technology Reports**, v. 26, p. 101872, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101872>

HAMISSOU, I. G. M.; APPIAH, K. E. K.; SYLVIE, K. A. T.; OUSMAILA, S. M.; CASIMIR, B. Y.; BENJAMIN, Y. K. Valorization of cassava peelings into biochar: Physical and chemical characterizations of biochar prepared for agricultural purposes. **Scientific African**, v 20, July 2023, e01737. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01737>

IGUNNU, E, T. ; CHEN, G, Z. .International Journal of Low-**Carbon Technologies**, v 9, Issue 3, September 2014, Pages 157–177, <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts049>

LINO, F. A. M; ISMAIL, K. A. R; BIZZO, W. A; DA SILVA, L. A. N; VEIGA, J. P. S. Sustainable Alternatives for Energy Generation and Food Production in Brazil. **Adv Environ Eng Res** 2025; 6(2): 017; doi:10.21926/aeer.2502017.

MARTINEZ, D. G. Potencial do resíduo do processamento da mandioca para produção de etanol de segunda geração. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, [S. l.], v. 6, n. 2, 2017. DOI: 10.5380/rber.v6i2.45811. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/45811>. MENEGUCCI, N. C.; LEONEL, M.; FERNANDES, A. M.; NUNES, J. G. DA S.; NUNES, J. G. DA S. Biomass yield and chemical composition of the cassava plant over two vegetative growth cycles. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 46, n. 1, p. e63719, 12 dez. 2023. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v46i1.63719>

MUTANDA, M; AMELEWORK, A. B; NDOU, N; FIGLAN, S. Drought Stress in Cassava (*Manihot esculenta*): Management Strategies and Breeding Technologies. **International Journal of Plant Biology**. 2025, 16 (4), 112; <https://doi.org/10.3390/ijpb16040112>

OLIVEIRA, L. M; AMARAL, C. L. F.; VIANA, A. E.S; CARDOSO, A. D; GUEDES, M. O; PESSOA, M. C. B; PRATES, C. J. N. Variedades de mandioca sob concentrações de salinidade na água de irrigação, em cultivo protegido. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 41, n. 2, p. 522-528. 2018. <https://doi.org/10.19084/RCA17124>. Acesso em: 20 jan. 2026.

OTEKUNRIN, O. A. Cassava (*Manihot esculenta* Crantz): a global scientific footprint production, trade, and bibliometric insights. **Discov Agric**, v. 2, p. 94 (2024). <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00121-3>

PALACIOS, C. A & OLALLA, A. R. The Sustainability of Waste Management Models in Circular Economies. **Sustainability** 2021, 13(13), 7105; <https://doi.org/10.3390/su13137105>

PANNAKKONG, W.; PARTHANADEE, P.; BUDDHAKULSOMSIRI, J. Impacts of Harvesting Age and Pricing Schemes on Economic Sustainability of Cassava Farmers in Thailand under Market Uncertainty. **Sustainability**, v.14 ed.13, 22 abr 2022, <https://doi.org/10.3390/su14137768>

PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G.; PAREDES, P.; LÓPEZ-URREA, R.; RAES, D.; SMITH, M.; KILIC, A.; SALMAN, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. 2. ed., rev. Rome: FAO, 2025. 440 p. FAO Irrigation and Drainage Paper, 56 Rev.1. <https://doi.org/10.4060/cd6621en>.

QUEIROZ, G. C. M; MEDEIROS, J. F; SILVA, R. R; MORAIS, F. M. S; SOUSA, L. V; SOUZA, M. V. P; SANTOS, E. N; FERREIRA, F. N; SILVA, J. M. C; CLEMENTE, M. I. B; GRANJEIRO, J. C. C; SALES, M. N. A; CONSTANTE, D. C; NOBRE, R. G; SÁ, F. V. S. Crescimento, acúmulo de solutos e distribuição de íons em sorgo sacarino sob estresse salino e hídrico em uma área semiárida **potiguar brasileira**. *Agricultura*, 2023, 13 (4), 803; <https://doi.org/10.3390/agriculture13040803>

RAI, G. K; MISHRA, S; CHOUHAN, R ; MUSHTAQ, M; CHOWDHARY, A. A ; RAI, P. K; KUMAR, R. R ; KUMAR, P; PEREZ-ALFOCEA, F. Estresse salino em plantas, sua detecção e mitigação por meio do WRKY. *Frontiers in Plant Science*, v14, Oct 2023. 1238507. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1238507>

RHOADES, J.D; KANDIAH, A; MASHALI, A. M. (1992) The use saline waters for crop production - Irrigation and Drainage Paper 48. FAO.133p.

SANTIAGO, A. D., CHICO, D., ANDRADE JÚNIOR, A. S., & GARRIDO, A. Pegada hídrica da cana-de-açúcar e etanol produzidos no estado de Alagoas, Brasil. *Agrometeoros*. (2018).v 25. DOI: <https://doi.org/10.31062/agrom.v25i1.26281>

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; ARAUJO FILHO, J.C.; OLIVEIRA, J.B.; CUNHA, T.J.F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 6. ed. Brasília: Embrapa, 2025. 393p. Disponível em: Acesso em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1176834/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>. Acesso em: 17 fev. 2026.

SILVA, I. B. Potencialidades energéticas proveniente dos resíduos da mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). 2019. 65 f. **Dissertação** (Mestrado em Energias Renováveis) – Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis, Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/18956>

SILVA, R. B; TEODORO, I; SOUZA, J. L; MAGALHÃES, MORAIS I. D; TEODORO, M A F; I. P. O; SILVA, J. C; LOPES, J. H; SANTOS, J. T; ALMEIDA, B. V. L. R; RAMOS, P. F. S; GOIS, P. V. S; CORDEIRO, L. R; JÚNIOR, J. C. S; MARTINS, G. M. C; SANTOS, W M. Growth, productivity and viability of irrigation in cassava crop in the Alagoas Coastal Plateaus. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.52:4, e20210145, 2022. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210145>

SILVA, R. M. D.; FERNANDES, A. M.; LEONEL, M.; PELVINO, R. A.; FIGUEIREDO, R. T. D.; RANGEL, M. A. S.; RINGENBERG, R.; OLIVEIRA, L. A. D; SANTOS, V. S.; VIEIRA, E. A. Medição de matéria seca e amido em genótipos modernos de mandioca durante longos ciclos de colheita. *Horticulturae*, v. 9, 22 jun. 2023. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9070733>

SILVA, R. B.; TEODORO, I. .; SOUZA, J. L. DE .; FERREIRA JÚNIOR, R. A. .; SANTOS, M. A. DOS .; MAGALHÃES, I. D. .; LYRA, G. B. .; MORAIS, M. A. F. DE .; TEODORO, I. P. DE O. .; SANTOS NETO, A. L. DOS. Physiological and growth analysis and productivity of cassava under irrigation levels . **Research Article - Science of Plants and Derived Products**, Lages, v. 21, n. 1, p. 16–26, 2022. DOI: 10.5965/223811712112022016.

SILVA, W. R; SANTOS, R. M; WISNIEWSKI JR, A. Cassava's harvest residue biochar from rotary kiln pyrolysis: Effects on sandy loam soil properties and maize growth, **Biomass and Bioenergy**, v. 205, p.108464, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108464>.

SINDIPE. Maior produtividade da cana aumenta oferta de açúcar e etanol no Nordeste. 23 abr. 2025. Disponível em: <https://sindipec.org.br/2025/04/23/maior-produtividade-da-cana-aumenta-oferta-de-acucar-e-etanol-no-nordeste/>. Acesso em: 21 jan. 2026.

SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS (SPE). **Challenges in reusing produced water**. Disponível em: <https://www.spe.org/en/industry/challenges-in-reusing-produced-water/>. Acesso em: 9 jan. 2025.

SUN, A.P; LEONEL, M; FERNANDES, A.M; GUEDES, P.T.P; CÂNDIDO, CÂNDIDO, H.T; OLIVEIRA, L. A. DE; VIEIRA, E.A. **Selection of sugary cassava genotypes for ethanol production**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, DF, v. 60, e04030, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2025.v60.04030>. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/30486>. Acesso em: 21 jan. 2026.

VEIL, J. A.; PUDER, M. G.; ELCOCK, D. A white paper describing produced water from production of crude oil, natural gas, and coal bed methane. Argonne: **Argonne National Laboratory**, 2004. Disponível em : <https://publications.anl.gov/anlpubs/2004/02/49109.pdf>

VENKATESH, G.; GOPINATH, K. A.; REDDY, K. S.; REDDY, B. S.; PRABHAKAR, M.; SRINIVASARAO, C.; KUMARI, V. V.; SINGH, V. K. Characterization of Biochar Derived from Crop Residues for Soil Amendment, Carbon Sequestration and Energy Use. **Sustainability**, v 14,ed 4. 2022, 2295;<https://doi.org/10.3390/su14042295>

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p.

YANG, Y. M; CHEN, L; WANG, J ; MSIGWA, B ; OSMAN, A. I; FAWZY, S; ROONEY, D. W. E YAP, P. S. Circular economy strategies for combating climate change and other environmental issues. **Environ Chem Lett** **21**, 55–80 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01499-6>

ZHANG, J ; LI, C. Biochar for Sustainable Farming and Recultivation. *Agronomy*, v. 13, n. 9, 2421, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13092421>.