

MARCELO JOSÉ DA SILVA

**ESTOQUES DE ÁGUA, CARBONO E NUTRIENTES NA INTERFACE SOLO-
PLANTA, E INDICADORES AMBIENTAIS EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO
RESILIENTES DE PALMA E OUTRAS PLANTAS FORRAGEIRAS**

RECIFE – PE

MAIO DE 2024

MARCELO JOSÉ DA SILVA

**ESTOQUES DE ÁGUA, CARBONO E NUTRIENTES NA INTERFACE SOLO-
PLANTA, E INDICADORES AMBIENTAIS EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO
RESILIENTES DE PALMA E OUTRAS PLANTAS FORRAGEIRAS**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola (Área de Concentração: Engenharia de Água e Solo).

Orientador: Prof. Dr. Thieres George Freire da Silva

Co-orientadores: Prof. Dra. Luciana Sandra Bastos de Souza, Dr. Gherman Garcia Leal de Araújo e Dr. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro

RECIFE – PE

MAIO DE 2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Ana Catarina Macêdo – CRB-4 1781

S586e Silva, Marcelo José da.
Estoque de água, carbono e nutrientes na interface solo-planta, e indicadores ambientais em sistemas de produção resilientes de palma e outras plantas forrageiras / Marcelo José da Silva. – Recife, 2024.
94 f.; il.

Orientador(a): Thieres George Freire da Silva.
Co-orientador(a): Luciana Sandra Bastos de Souza.
Co-orientador(a): Gherman Garcia Leal de Araújo.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, BR-PE, 2024.

Inclui referências e anexo(s).

1. Forragem - Produção . 2. Carbono. 3. Mudanças climáticas. 4. Sustentabilidade e meio ambiente I. Silva, Thieres George Freire da, orient. II. Souza, Luciana Sandra Bastos de, coorient. III. Araújo, Gherman Garcia Leal de, coorient. IV. Título

CDD 630

MARCELO JOSÉ DA SILVA

Engenheiro Agrônomo e Mestre em Engenharia Agrícola

**ESTOQUES DE ÁGUA, CARBONO E NUTRIENTES NA INTERFACE SOLO-
PLANTA, E INDICADORES AMBIENTAIS EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO
RESILIENTES DE PALMA E OUTRAS PLANTAS FORRAGEIRAS**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola (Área de Concentração: Engenharia de Água e Solo).

Banca Examinadora

Prof. Dr. Thieres George Freire da Silva – UFRPE/UAST

Prof. Dr. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro - UFRPE

Prof. Dr. Antônio José Steidle Neto - UFSJ

Prof. Dr. Ênio Farias de Franca e Silva – UFRPE

Dr. José Edson Florentino de Moraes - UFRPE

Aos meus pais, José Marcelino da Silva e Maria Madalena Pereira da Silva, pelo amor, cuidado e carinho durante toda a vida. Peço que Deus retribua com Sua infinita misericórdia, todo o esforço e dedicação que ambos tiveram para que seus filhos viessem a estudar para ter um futuro digno. Vocês são minha fortaleza e fonte de inspiração. Amo muito vocês.

DEDICO

Às minhas irmãs, Marcela Pereira, Márcia Regina, Marly Pereira e Maria Natália, pelo apoio e carinho. Sempre se fizeram presente nessa jornada. Vocês são especiais.

À minha esposa, Marisa Adriana, por todo amor e carinho. Por se fazer presente me apoiando e incentivando em cada escolha. Você nunca deixou de acreditar em meu potencial.

Aos meus sobrinhos, Pedro Rafael e Laura Silva, a quem tenho um amor incondicional.

Aos meus avós, Estelita Benvinda e Antônio Delfonço, bem como a minha Madrinha, Aurizete, e segundos pais, Raminho e Tota, a quem tenho um carinho enorme.

A todos os demais familiares e amigos, pelo apoio, incentivo, dificuldades e alegrias vivenciadas.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente ao meu bom Deus, pelo dom da vida, por toda a proteção, por me dar forças e por me fazer acreditar que tudo é possível para aquele que tem fé. Nessa jornada, o Senhor me ensinou que o trabalho dignifica e a resiliência é a chave para o sucesso.

Ao professor, Thieres George Freire da Silva, meu orientador desde o início desta trajetória acadêmica. Obrigado pelo exemplo de profissionalismo, por todos seus ensinamentos, paciência e oportunidades, além de muitas vezes deixar sua posição de professor e se mostrar ser humano amigo e conselheiro. Meu muito obrigado e que Deus lhe retribua tudo em dobro.

Sou grato, aos meus “mestres”, professores, em especial, a Luciana Sandra, Magna Soelma, Mario Miranda, Gherman Leal, Silvia Turco e aos membros desta banca. Por todos os ensinamentos passados, pelas conversas e exemplos de profissionalismo. Considero-os referência.

Aos doutores, José Edson, George do Nascimento, Alexandre Maniçoba e Raliuson Inácio, que inúmeras vezes já externei a minha admiração pelos exemplos de ser humanos que são. Por não medirem esforços e estarem sempre dispostos a compartilhar seus ensinamentos.

Agradeço infinitamente a Dona Graça, Sr. George, Joabe Almeida, Vanessa Santos e Herica Fernanda, pessoas especiais que considero da família. Obrigado por todo apoio e carinho que recebi desde sempre.

Aos meus cunhados, Leonado Francelino, Odair José, Marciel Gonçalves e Mailza Gonçalves, bem como a meu amigo Rivaldo Souza. Pela admiração e incentivo, por me fazerem acreditar que é possível conquistar nossos objetivos.

Aos amigos que conquistei durante minha trajetória acadêmica. Em especial, Fabiana Torres, Marcelino Raweny, Laamon Simões, Jadna Mylena, Raliuson Inácio, João Pedro, Cleber Pereira, Daniele Eugênio, Jandis Araújo, Luiz Fernando, Kaique Salvador, dentre

outros (são inúmeros, porém todos importantes). Obrigado pela irmandade durante todo esse tempo. Vocês foram fundamentais nessa trajetória.

Aos amigos e companheiros que fiz durante o doutorado. Em especial a Giselle, Luanderson, Brenna, Raissa e Jesiele, pelas noites de estudos e conversas, vocês são especiais.

Ao Grupo de Agrometeorologia do Semiárido (GAS), por toda a amizade, trabalho, diversão e vitória, desde o início dessa caminhada. Representando todos os integrantes (graduandos, pós-graduandos e pós-doutores), agradeço ao professor Thieres George e aos doutores, José Edson e Carlos André, por tudo. Considero o grupo como uma família.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco, em especial ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de cursar um ensino superior de qualidade. Em especial, aos professores do programa, pelos ensinamentos passados. Eu acredito que a educação abre oportunidades e é a base para uma sociedade mais justa.

Aos professores, Abelardo Montenegro, Antônio Neto, Enio Farias e ao doutor José Edson, por aceitarem o convite para avaliarem este trabalho e contribuírem da melhor forma para a excelência desse documento.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (processos: 475279/2010 -7, 476372 / 2012-7, 305286 / 2015-3, 309421 / 2018-7 e 152251 / 2018-9), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES (Código Financeiro 001), a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (processos: APQ-0215-5.01 / 10 e FACEPE - APQ-1159-1.07 / 14).

E a todas as pessoas que não foram citadas, pelo curto espaço, mas que participaram de forma direta ou indireta de minha evolução pessoal, acadêmica e profissional.

Meu muito obrigado!!!

“Seja forte e corajoso”

Josué 1:9

BIOGRAFIA

MARCELO JOSÉ DA SILVA – Natural de Patos – PB, filho de Maria Madalena Pereira da Silva e José Marcelino da Silva, nasceu em 09 de janeiro de 1994. Em Brejinho – PE, pequena cidade do Alto Pajeú, frequentou o ensino básico público nas Escolas Municipal São Sebastião (EMSS – Fundamental) e José Severino de Araújo (EJSA – Médio), tendo concluído no ano de 2010. Em dezembro de 2012, iniciou sua trajetória acadêmica, onde ingressou no curso de Bacharelado em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), na Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UAST), em Serra Talhada – PE. Em outubro de 2013, iniciou sua participação como integrante do Grupo de Agrometeorologia no Semiárido (GAS), sob coordenação do professor Dr. Thieres George Freire da Silva, onde desempenhou atividades de pesquisa e extensão voltadas a utilização de práticas resilientes que minimizam os efeitos do clima no aporte forrageiro da região. Entre janeiro de 2015 e junho de 2017 (dois anos e meio), atuou como bolsista de iniciação científica, sendo neste último ano, quando recebeu o título de Engenheiro Agrônomo. Ainda em agosto de 2017, iniciou a Pós-Graduação no curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, pela Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), no município de Juazeiro – BA. Durante o mestrado, fez parte do grupo de Agrometeorologia da Embrapa Semiárido (AGROMET), coordenado pela professora Dra. Magna Soelma Beserra de Moura, onde participou de atividades relacionadas ao efeito do clima sobre a vegetação da Caatinga e do manejo hídrico da fruticultura na região do Vale do São Francisco. Durante o mesmo período desenvolveu atividades como convidado junto ao Laboratório de Meteorologia da UNIVASF (LABMET), coordenado pelo professor Dr. Mario de Miranda Villas Boas Ramos Leitão. Em julho de 2019, defendeu sua dissertação intitulada *“Evapotranspiração e coeficiente da cultura da mangueira ‘Kent’ cultivada no Submédio do Vale do São Francisco”*, quando recebeu o grau de Mestre. Em março de 2020, novamente sob orientação do professor Dr. Thieres George Freire da Silva, retorna a Universidade Federal Rural de Pernambuco, em Recife – PE, para iniciar o curso de doutorado em Engenharia Agrícola. Em maio de 2024, defendeu sua tese *“Estoques de água, carbono e nutrientes na interface solo-planta de sistemas produção com palma e outras plantas forrageiras irrigadas em ambiente semiárido”*.

Silva, Marcelo José da. **Estoques de água, carbono e nutrientes na interface solo-planta, e indicadores ambientais em sistemas de produção resilientes de palma e outras plantas forrageiras**. 2024. 94f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.

RESUMO GERAL

As mudanças climáticas e a crescente exploração de áreas de cultivo têm gerado perdas consideráveis nos estoques de água, carbono e nutrientes dos solos, comprometendo a sustentabilidade da produção de forragem. Logo, a combinação de práticas resilientes pode resultar em sistemas capazes de mitigar os efeitos negativos do clima sobre a produção de alimentos. Dessa forma, objetivou-se investigar a dinâmica da produtividade e dos estoques de água, carbono e nutrientes no solo e na planta de sistemas de produção com plantas forrageiras resilientes as condições semiáridas. O estudo foi desenvolvido no “Centro de Referência Internacional de Estudos em Agrometeorologia de Palma e outras Plantas Forrageiras”, localizado na Universidade Federal Rural de Pernambuco - Unidade Acadêmica de Serra Talhada, no município de Serra Talhada-PE, Brasil. Para tanto, avaliou-se duas áreas experimentais com dados coletados entre janeiro de 2017 e junho de 2022. O Experimento 1 consistiu de 12 sistemas de cultivo provenientes da combinação entre três clones de palma forrageira (IPA, MIU e OEM) e quatro níveis de reposição hídrica (0%; 40%; 80% e 120% da E_{Tc} - evapotranspiração da cultura); Já o Experimento 2 compreendeu 7 sistemas de cultivos com diferentes espécies: feijão-guandú exclusivo (S1); Milheto exclusivo (S2); Sorgo exclusivo (S3); Palma exclusiva (S4); Palma+Girassol+feijãoGuandu (S5); Palma+Sorgo+Milheto (S6) e Palma+Sorgo (S7). Em ambos os experimentos foram avaliadas as seguintes variáveis: produtividade de matéria fresca (MF) e seca (MS) e os estoques de água ($\text{Água}_{\text{solo}0-70\text{cm}}$; $\text{Água}_{\text{planta}}$), carbono (CO_{solo} ; $\text{CO}_{\text{planta}}$) e nutrientes no solo, entre as camadas 0-20 e 20-40 cm (P_{solo} ; K_{solo} ; Ca_{solo} ; Mg_{solo} ; Na_{solo}), e na planta (N_{planta} , P_{planta} , K_{planta} , $\text{Ca}_{\text{planta}}$, $\text{Mg}_{\text{planta}}$; e $\text{Na}_{\text{planta}}$). Os dados foram submetidos a análise descritiva, teste de normalidade, homoscedasticidade, análise de variância e teste de comparação de médias (Fisher, $p < 0,05$). Grupos de variáveis correlacionadas foram determinados conforme análise de componentes principais. Por fim, os sistemas foram ranqueados conforme as melhores médias. Os resultados indicaram que, devido as características intrínsecas das espécies, sistemas com o clone OEM ($p < 0,05$) se destacaram quando considerada as variáveis da interface planta. Os níveis de reposição hídrica não afetaram MF e MS ($p > 0,05$), uma vez que os índices de precipitação pluvial se encontraram acima da média regional beneficiando o rendimento da cultura. Porém, para $\text{CO}_{\text{planta}}$, considerando o melhor sistema entre os clones, OEM-0% E_{Tc} é capaz de estocar aproximadamente 133% (5,313 Mg ha^{-1}) e 315 % (7,057 Mg ha^{-1}) a mais que MIU-40% E_{Tc} e IPA-120% E_{Tc} , respectivamente. A prática da irrigação potencializou o acúmulo de Mg e Na. Entretanto, dentre os elementos, Ca e K são extraídos em maior proporção. Baixos níveis de reposição hídrica impulsionaram o CO_{solo} , P_{solo} e K_{solo} , por outro lado níveis maiores contribuíram com Ca_{solo} , Mg_{solo} , Na_{solo} e soma de bases ($\text{S.B.}_{\text{solo}}$) são influenciados positivamente. Os sistemas OEM-120% E_{Tc} ; OEM-40% E_{Tc} ; OEM-80% E_{Tc} e OEM-0% E_{Tc} , nessa ordem, apresentaram as maiores médias dentre . Para o experimento 2 - Os resultados mostraram que os sistemas consorciados (S5, S6 e S7) apresentaram as melhores médias para todas as variáveis da interface planta ($p < 0,05$). Quanto as variáveis de estoque no solo, apenas P_{0-20} , K_{0-20} , K_{20-40} , Na_{20-40} e CO_{20-40} , apresentaram diferença significativa ($p < 0,05$). A palma forrageira exclusiva apresentou as maiores médias para CO_{20-40} (14,5 Mg ha^{-1}).

Os sistemas que proporcionam maior equilíbrio entre as variáveis produtivas e os estoques obedecem a seguinte ordem $S7 > S5 > S6 > S4 > S3 > S2 > S1$.

Palavras-chave: Sistemas resilientes; Carbono orgânico; Mudanças climáticas; Sustentabilidade agrícola; Produção de forragem.

Silva, Marcelo José da. **Stock of water, carbon and nutrients in the soil-plant interface of production systems with palm and other irrigated forage plants in a semi-arid environment.** 2024. 81f. Thesis (Doctorate in Agricultural Engineering) – Federal Rural University of Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brazil.

Abstract

Climate change and the increasing exploitation of cultivated areas have generated considerable losses in soil water, carbon, and nutrient stocks, compromising the sustainability of forage production. Therefore, the combination of resilient practices can result in a sustainable system capable of mitigating the negative effects of climate on food production. Thus, the objective was to investigate the dynamics of water, carbon, and nutrient stocks at the soil-plant interface of palm production systems and other forage plants resilient to semi-arid conditions. The study was developed at the “International Reference Center for Studies in Agrometeorology of Palma and other Forage Plants”, located at the Federal Rural University of Pernambuco - Academic Unit of Serra Talhada, in the municipality of Serra Talhada-PE, Brazil. To this end, two experimental areas developed between January 2017 and June 2022 were evaluated. Experiment 1 consisted of 12 cultivation systems resulting from the combination of three forage cactus clones (IPA, MIU and OEM) and four levels of water replacement (0%; 40%; 80%, and 120% of ET_c - crop evapotranspiration); Experiment 2 comprised 7 cultivation systems with different species: exclusive pigeon pea (S1) exclusive pigeon pea (S1); Exclusive millet (S2); Exclusive sorghum (S3); Exclusive palm (S4); Palma+Girassol+Guandu (S5); Palm+Sorghum+Millet (S6) and Palm+Sorghum (S7). In both experiments, the following were considered: the productivity of fresh (MF) and dry matter (MS) and the stocks of water, carbon and nutrients in the soil, between layers 0-20 and 20-40 (Water_{soil}; CO; P; K; Ca; Mg; and Na), and in the plant (Water_{pl}; CO_{pl}; N_{pl}; P_{pl}; K_{pl}; Ca_{pl}, and Na_{pl}). The data were subjected to descriptive analysis, normality test, homoscedasticity, analysis of variance and mean comparison test (Fisher, $p < 0.05$). To determine the groups of correlated variables, principal component analysis was used and, finally, the ranking of the systems considering the best averages. The results indicated that, due to the intrinsic characteristics of the species, systems with the OEM clone ($p < 0.05$) stood out when considering the plant interface variables. The level of water replacement did not affect MF and MS. However, taking into account the best system of each clone for CO, OEM-0% is capable of storing approximately 133% (5.313 Mg ha^{-1}) and 315% (7.057 Mg ha^{-1}) more than MIU-40% and IPA-120%, respectively. The practice of irrigation increased the accumulation of Mg and Na. However, among the elements, Ca and K are extracted in greater proportions. Low levels of water replacement boosted CO, P and K in the soils, on the other hand higher levels contributed Ca, Mg, Na, and S.B.; OEM-120%, OEM-40%, OEM-80%, and OEM-0% are the most recommended, in that order, due to the balance between the variables. For experiment 2 - The results showed that the intercropped systems (S5, S6 and S7) presented the best averages for all plant interface

variables ($p < 0.05$). As for the soil stock variables, only \bar{P}_{0-20} , \bar{K}_{0-20} , \bar{K}_{20-40} , \bar{Na}_{20-40} , and \bar{CO}_{20-40} showed a significant difference ($p < 0.05$). The exclusive forage cactus presented the highest averages for \bar{CO}_{20-40} (14.5 Mg ha^{-1}). The systems that provide greater balance between production variables and stocks obey the following order $S7 > S5 > S6 > S4 > S3 > S2 > S1$.

Keywords: Resilient systems; Organic carbon; Climate changes; Agricultural sustainability; Forage production

Sumário

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL, OBJETIVOS, HIPÓTESES E REVISÃO DE LITERATURA	20
1. INTRODUÇÃO GERAL	20
2. OBJETIVOS.....	23
2.1 Objetivo geral	23
2.2 Objetivos específicos.....	23
3. HIPÓTESES	23
4. REVISÃO DA LITERATURA.....	23
4.1. Impactos das mudanças climáticas e da conversão da vegetação no Semiárido brasileiro.....	23
4.2 Sustentabilidade em sistemas de cultivo agrícola.....	25
4.3 Potencial produtivo e sustentável das práticas de cultivo em sistemas de palma forrageira	28
4.4 Benefícios socioambientais do cultivo de palma forrageira como alternativa para recuperação de áreas degradadas	31
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
CAPÍTULO 2 – Níveis de reposição hídrica afetam os estoques de água, carbono e nutrientes em sistemas de palma forrageira cultivada em ambiente semiárido?.....	40
1. INTRODUÇÃO.....	42
2. MATERIAL E MÉTODOS	44
2.1 Localização da área de estudo	44
2.2 Caracterização dos sistemas de cultivo	45
2.3 Manejo da área experimental.....	45
2.4 Produtividades de matéria fresca e seca	46
2.5 Estoque de água, carbono e nutrientes na planta.....	47
2.6 Estoque de água, carbono e nutrientes no solo.....	47
2.7 Procedimentos estatísticos	49
3. RESULTADOS.....	49
3.1 Caracterização microclimática e manejo hídrico.....	49
3.2 Produtividades e estoques de água, carbono e nutrientes na planta	50
3.2.1 Produtividades de matéria fresca e seca	50
3.2.2 Estoques de água, carbono e nutrientes na planta	52
3.2 Estoques de água, carbono e nutrientes no solo	54

3.3 Correlação entre o manejo de irrigação, as características físico-hídricas do solo e os estoques de água, carbono e nutrientes dos sistemas de cultivo com palma forrageira	56
4. DISCUSSÃO	58
4.1 Produtividade e estoques de água, carbono e nutrientes na planta	58
4.2 Estoques de água, carbono e nutrientes no solo	59
4.3 Correlação entre o manejo de irrigação, as características físico-hídricas do solo e os estoques de água, carbono e nutrientes e ranqueamento dos sistemas.....	60
5. CONCLUSÃO.....	61
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
7. MATERIAL SUPLEMENTAR	66
CAPÍTULO 3 - A COMBINAÇÃO DE PRÁTICAS RESILIENTES MAXIMIZA A PRODUTIVIDADE E OS ESTOQUES DE ÁGUA, CARBONO E NUTRIENTES DE SISTEMAS COM ESPÉCIES FORRAGEIRAS CULTIVADAS EM AMBIENTE SEMIÁRIDO	
1. INTRODUÇÃO.....	70
2. MATERIAL E MÉTODOS	72
2.1 Localização da área de estudo	72
2.2 Caracterização dos sistemas de cultivo	74
2.3 Descrições gerais de manejo.....	75
2.4 Produtividade de matéria fresca e seca.....	76
2.5 Estoque de água, carbono e nutrientes na planta	77
2.6 Estoque de água, carbono e nutrientes no solo	77
2.7 Análise estatística	78
3. RESULTADOS.....	79
3.1 Produtividade e estoques de água, carbono e nutrientes na planta.....	80
3.2 Estoques de água, carbono e nutrientes no solo	83
3.3 Correlação entre o manejo de irrigação, as características físico-hídricas do solo e os estoques de água, carbono e nutrientes dos sistemas de cultivo com espécies forrageiras.....	84
4. DISCUSSÃO	85
4.1 Produtividade e estoques de água, carbono e nutrientes de sistemas produtivos com espécies forrageiras.....	85
4.2 Estoques de água, carbono e nutrientes na interface solo de sistemas produtivos de espécies forrageira.	87

4.3 Correlação entre o manejo de irrigação, as características físico-hídricas do solo e os estoques de água, carbono e nutrientes e ranqueamento dos sistemas.....	88
5. CONCLUSÃO.....	88
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
CAPÍTULO 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	93

----- **CAPÍTULO 1** -----
INTRODUÇÃO GERAL, OBJETIVOS, HIPÓTESES E REVISÃO DE LITERATURA

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL, OBJETIVOS, HIPÓTESES E REVISÃO DE LITERATURA

1. INTRODUÇÃO GERAL

O efeito das mudanças climáticas e a crescente demanda por alimento têm despertado preocupações quanto à sustentabilidade dos recursos naturais e dos cultivos agrícolas (SAATH; FACHINELLO, 2015; SALVADOR et al., 2021). Além do mais, projeções sobre o clima indicam a elevação da temperatura do ar (1,2 a 4,5 °C), a modificações nos regimes de precipitação pluvial e o aumento da taxa de emissão dos gases de efeito estufa (SILVA et al., 2017; IPCC, 2022) impactando negativamente os atributos dos solos (i.e., qualidade física, hídrica, química e biológica), na composição do ar atmosférico (DONG et al., 2020) e no potencial de produção das espécies agrícolas (SALVADOR et al., 2021).

Somado a isso, estima-se que, até 2050, a população mundial será superior a 9,5 bilhões de pessoas, com perspectiva de atingir a marca de 11 bilhões ainda este século (ONU, 2019). Essa realidade tem impulsionado a busca por alternativas (e.g., exploração de novas áreas, cultivo de espécies resilientes e sistemas de produção sustentáveis) capazes de suprir a demanda de alimentos gerada pela população.

No Brasil, por exemplo, o setor agropecuário apresentou uma expansão territorial aproximada de 44,3% nos últimos 45 anos, passando de quase 182 milhões de hectares em 1985 para 263 milhões hectares em 2020 (MAPBIOMAS, 2021). Porém, embora a exploração de novas áreas aumente a produção de alimentos, essa prática não garante a longevidade dos cultivos e tende a afetar a sustentabilidade do ecossistema, deixando clara a importância da adoção de modelos de produção mais eficientes (SAATH; FACHINELLO, 2015).

Além disso, a exploração contínua de novas áreas, somada a ausência de técnicas de conservação, promovem a redução do conteúdo de matéria orgânica, da fertilidade e, conseqüentemente, do estoque de carbono orgânico do solo (COS), sendo esses, os principais responsáveis pelo aumento no sequestro do carbono atmosférico e pela redução da emissão de gases de efeito estufa (DAVIDSON E JANSSENS, 2006; YANARDAĞ et al., 2015). Ainda, mudanças bruscas na cobertura vegetal proporcionam uma maior exposição dos solos à radiação solar, que, por consequência, altera sua temperatura, o

armazenamento e as taxas de infiltração de água no solo, tornando-os mais susceptíveis aos riscos de erosão (AGUIAR NETTO et al., 2007; HUNKE et al., 2015).

Em regiões semiáridas, a combinação entre esses fatores (i.e., desmatamento e mudanças climáticas) tem acelerado os processos de degradação e afetado negativamente a sustentabilidade dos solos (SILVA et al., 2017; SILVA et al., 2021b). No caso do semiárido brasileiro, estima-se que cerca de 46% da vegetação (i.e., Caatinga) já foi convertida em outro tipo de uso da terra, potencializando a emissão de carbono em até 15% (MEDEIROS et al., 2017). Além do mais, o clima local apresenta temperaturas elevadas, umidade relativa do ar baixa, períodos de seca severos e precipitação concentrada em apenas quatro meses no ano, o que proporciona um balanço hídrico negativo e um alto índice de aridez (RIBEIRO et al., 2016; SALVADOR et al., 2021).

Essas condições, na maioria das vezes, expressam a fragilidade da região quanto ao potencial produtivo do setor agropecuário, uma vez que o clima local promove a sazonalidade da produção de forragem em sistemas de sequeiro causando desequilíbrio entre a oferta e a demanda de alimento para o animal (PINHEIRO et al., 2021). Jardim et al. (2021a) destacam que a limitação da disponibilidade de água para irrigação afeta o crescimento, desenvolvimento e a produção de biomassa das culturas, sendo necessário recorrer a espécies tolerantes ao estresse hídrico para contornar essa situação. Além disso, Lewandowski et al. (2021) e Althoff et al. (2016) também mencionam a vulnerabilidade de ecossistemas semiáridos às mudanças climáticas, tendo em vista que as espécies já se encontram em situações de estresse térmico e hídrico, e que as projeções indicam condições ainda mais graves quando somadas ao desmatamento, podendo resultar no aumento das taxas de degradação e desertificação dessas paisagens.

Dentre os efeitos do desmatamento em ambientes semiáridos foi observado que a alteração da vegetação natural interfere nas variáveis microclimáticas (i.e., maiores temperaturas e déficit de pressão de vapor), na composição química (i.e., diminuição nos teores de N, P, K, Mg, Fe, Zn) e no estoque de carbono orgânico do solo (i.e., redução de até 50%, correspondente a 65 Mg ha⁻¹) quando comparado a floresta (GAVA et al., 2021, MENEZES et al., 2021; SILVA et al., 2021).

Assim sendo, para converter esse cenário, a agricultura de conservação (AC) acaba se tornando uma opção viável e com a possibilidade de excelentes resultados na região. A AC é um modelo de agricultura que busca a sustentabilidade do cultivo por meio da combinação de práticas agrônômicas (i.e., uso de cobertura morta, utilização de

espécies resilientes, e etc.), que tenham potencial de conservação e produção (ANGHINONI et al., 2021).

Benefícios da AC (i.e diversidade de cultivos, produtividade e sustentabilidade) são amplamente citados na literatura (KASSAM; FRIEDRICH; DERPSCH, 2018; ANGHINONI et al., 2021; FAO, 2021, RODENBURG et al., 2020 ZULU; DJENONTIN; GRABOWSKI, 2021), porém, em regiões semiáridas pesquisas sobre esse tema acontecem de forma isolada.

A utilização de espécies adaptadas, como é o caso da palma forrageira (*Opuntia* spp. e *Nopalea* spp.) torna-se uma alternativa para essas regiões, tendo em vista que seu metabolismo fisiológico MAC (Metabolismo Ácido das Crassuláceas) proporciona boa adaptação, alta eficiência no uso da água e elevado potencial produtivo (JARDIM et al., 2019; JARDIM et al., 2020; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021a), além de promover a recuperação de áreas degradadas (KRÜMPEL et al., 2020).

A realização de práticas da AC na cultura da palma forrageira mostra resultados positivos quanto a sua produtividade (DINIZ et al., 2017; ALVES et al., 2018; LIMA et al., 2018; JARDIM et al., 2020; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021a; PINHEIRO et al., 2021; SALVADOR et al., 2021). No entanto, poucos são os casos envolvendo as características dos solos. Bautista-Cruz et al. (2018) e Queiroz et al. (2020), por exemplo, estudaram a conversão da floresta em sistemas de cultivados de palma forrageira, e verificaram que a palma forrageira manteve seus níveis de COS próximos aos valores observados na floresta original e mitigou os efeitos do desmatamento quanto ao estoque de água do solo.

Dessa forma, nota-se a ausência de informações detalhadas sobre os benefícios da adoção de práticas agronômicas (i.e irrigação e consórcios) sobre os estoques de água carbono e nutrientes de sistemas de cultivos com espécies forrageiras adaptadas a região semiárida. Além disso, em sua maioria, os estudos presentes na literatura abordam apenas o componente solo, ignorando o potencial de estocagem das espécies vegetais. Assim, este estudo vai a busca de dados mais precisos quanto aos benefícios da adoção de práticas agronômicas na sustentabilidade da produção de forragem em ambiente semiárido.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Quantificar e avaliar os estoques de água, carbono e nutrientes em sistemas produtivos com espécies forrageiras irrigadas em ambiente semiárido. Além disso, o estudo visa propor alternativas de cultivos que tenham como objetivo o desenvolvimento sustentável da agropecuária e a mitigação do efeito do clima.

2.2 Objetivos específicos

- Quantificar e comparar os estoques de água, carbono e nutrientes no solo e na planta de sistemas de cultivos com palma forrageira submetida a diferentes níveis de reposição hídrica no semiárido brasileiro;
- Quantificar e comparar os estoques de água, carbono e nutrientes no solo e na planta de sistemas de cultivos com espécies forrageiras consorciadas no semiárido;
- Estabelecer relações entre os estoques, o manejo e as características físico-hídrica do solo, para melhor entender a dinâmica e o potencial efeito dessas variáveis.

3. HIPÓTESES

- A dinâmica dos estoques de água, carbono e nutrientes em sistemas com palma forrageira são afetados pelo manejo da reposição hídrica;
- A combinação de práticas agronômicas resilientes afetam e elevam os estoques de água, carbono e nutrientes de sistemas de cultivo com a presença espécies forrageiras;
- As propriedades físicas do solo, bem como as estratégias de manejo se relacionam com o estoque de água, de carbono e de nutrientes em sistemas resilientes.

4. REVISÃO DA LITERATURA

4.1. Impactos das mudanças climáticas e da conversão da vegetação no Semiárido brasileiro.

A Caatinga, Bioma típico do semiárido brasileiro, é conhecida como uma das maiores formações de floresta tropical seca do mundo. Rica em biodiversidade, sua extensão territorial é de aproximadamente 844.453 km², o que corresponde a 11% do território nacional (RIBEIRO et al., 2016).

Nas últimas décadas, devido ao crescimento populacional e a ação direta das mudanças climáticas, esse ecossistema tem sofrido um impacto negativo marcante (e. g. exploração de novas áreas, aumento da temperatura do ar, redução na precipitação pluviométrica e aumento das áreas em processo de desertificação) (BURNEY et al., 2014; SILVA, et al., 2021). Dados do MapBiomias (2021) mostram que a Caatinga sofreu uma redução de aproximadamente 5,6 milhões de hectares em sua área florestal entre os anos de 1985 e 2020.

Além dessa crescente perda na cobertura vegetal, o bioma ainda apresenta solos com baixa fertilidade, precipitação variando de 300-800 mm ano⁻¹ e irregular (concentrada entre os meses de janeiro a março), umidade relativa do ar inferior a 50% durante maior parte do ano e temperatura média anual elevada entre 23°C e 27°C (SOHN; SAHA; BAUHUS, 2016). Essas condições de vulnerabilidade afetam o desenvolvimento das espécies, tendo em vista que as plantas já estão submetidas a limites extremos de condições edafoclimáticas (LEWANDROWSKI et al., 2021).

Com tendência a piores cenários, a combinação entre esses dois fatores (clima e mudança no uso da terra) pode contribuir com a degradação dos solos e uma maior emissão de CO₂ para a atmosfera (SOHN; SAHA; BAUHUS, 2016). Essa degradação se deve a redução ou à perda parcial ou total do potencial biológico da terra (WHITFORD; WADE, 2002a) e está associada a processos (i.g. desmatamento, perda da biodiversidade, perda do potencial produtivo, erosão e poluição) que demandam tempo e esforços para serem resolvidos (STANTURF; CALLAHAM, 2021).

Ao estudar os efeitos da mudança do uso do solo em ambiente semiárido, Silva et al. (2021) compararam as propriedades do solo e do microclima de uma floresta de Caatinga com uma área desmatada para fins agrícolas, e verificaram um aumento na porosidade total do solo em áreas desmatadas devido ao manejo utilizado, entretanto, as propriedades químicas (pH, P, K⁺, Mg²⁺, Cu²⁺, Fe, Mn, Zn²⁺ e Ca²⁺) e variáveis microclimáticas (temperatura mínima e déficit de pressão de vapor) apresentaram alterações, indicando que o desmatamento de áreas naturais para realização de atividades agrícolas contribui com os processos de desertificação, que impactam no ciclo hidrológico, nos conteúdos de carbono, matéria orgânica e de nitrogênio do solo.

Mudanças nas características qualitativas do solo também podem influenciar significativamente a produtividade das culturas (SOHN et al., 2016), fazendo que o produtor veja a exploração de uma nova área como alternativa (SAATH; FACHINELLO, 2015). Dessa forma, a fim de contornar esse cenário, faz-se necessário a utilização

imediate de sistemas sustentáveis que visem à eficiência produtiva e diversificada como, por exemplo, a combinação entre práticas de cultivo e espécies resilientes as condições semiáridas.

4.2 Sustentabilidade em sistemas de cultivo agrícola

Em resposta ao efeito das mudanças climáticas e da abundante degradação dos solos, o termo sustentabilidade tem se tornado frequente nas publicações dos últimos 20 anos (PURVIS; MAO; ROBINSON, 2019). No setor agrícola, por exemplo, entende-se sobre agricultura sustentável, como sendo um sistema que visa o equilíbrio entre os fatores ambientais, econômicos e sociais (ANGHINONI et al., 2021). Entretanto, manter esses fatores estáveis e produzir alimento suficiente para toda a população mundial ainda é um desafio (BAPTISTA et al., 2021).

A procura de uma alternativa produtiva e segura, temas como “Agricultura de conservação (AC)” e “intensificação da agricultura sustentável (IAS)” estão sendo amplamente citados (KASSAM; FRIEDRICH; DERPSCH, 2018; ZULU; DJENONTIN; GRABOWSKI, 2021). Esses sistemas partem da aplicação de um conjunto de práticas resilientes (e.g., espécies altamente produtivas, mínimo revolvimento do solo; rotação e diversificação de cultura; uso de cobertura morta) que tem como objetivo aumentar a produtividade dos cultivos, proporcionar um ambiente diversificado e melhorar a qualidade física, química e biológica do solo (ANGHINONI et al., 2021).

A adoção desses modelos de produção não visa somente reduzir os impactos das mudanças climáticas, mas também minimizar as emissões e promover o sequestro de carbono nos solos (FRIEDRICH; DERPSCH; KASSAM, 2012). Segundo a FAO (2021), a AC tem o potencial de reduzir perdas consideráveis em terras agricultáveis, ao passo que consegue regenerar áreas degradadas. Anghinoni et al. (2021) testaram esse modelo de agricultura em um cultivo de soja e verificaram que, quando comparado a sistemas de monocultura ou de baixa diversificação de espécies, a AC elevou a produtividade, o teor de proteína e o conteúdo de flavonoides dos grãos de soja, além de aumentar a qualidade física e biológica do solo. Contribuições positivas na qualidade do solo, no rendimento e no teor de carbono orgânico do solo (COS), também são mencionadas por Rodenburg et al. (2020). De maneira geral, a AC eleva a produtividade, melhora a qualidade do solo, favorece a sustentabilidade nos cultivos e minimiza o efeito da degradação.

O COS é considerado um dos principais indicadores da sustentabilidade, e sua variação expressa a eficiência das práticas de manejo que foram adotadas. Em um sistema, a quantidade de carbono presente nos solos é superior às quantidades encontradas nos vegetais e na atmosfera (SCHARLEMANN et al., 2014; MENEZES et al., 2021). Assim, alterações bruscas no seu uso podem gerar perdas consistentes nos valores de COS, fazendo-o passar da posição de sumidouro (i.e., que promove a captação e armazenamento) para emissor de carbono para a atmosfera. Segundo Jareki; Lal, (2003), a conversão de ecossistemas naturais em sistemas agrícolas pode proporcionar uma redução entre 50 e 100 bilhões de toneladas C do carbono armazenado no solo, situação crítica do ponto de vista sustentável ao longo dos anos. Em áreas de Caatinga, por exemplo, essa redução pode representar até 50% havendo perdas na mesma proporção para matéria orgânica e biomassa vegetal (**Figura 1**).

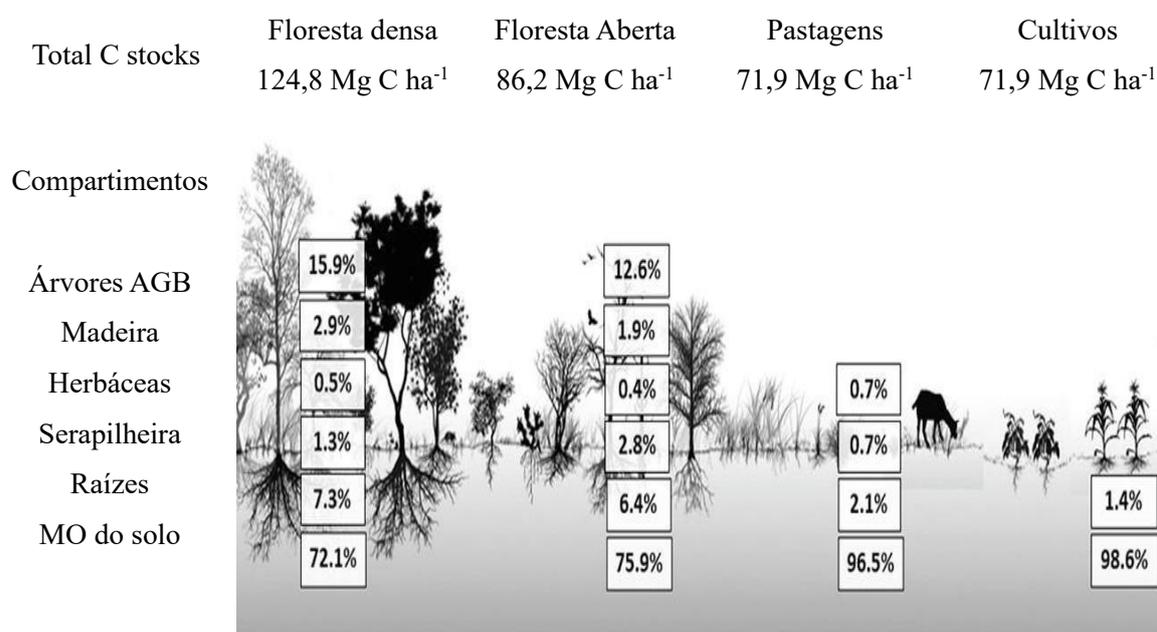


Figura 1. Porcentagem dos estoques totais do ecossistema C em cada compartimento; AGB = biomassa acima do solo; MO = matéria orgânica. Fonte: Menezes et al. (2021)

Para reverter este quadro é necessário que o sistema passe a apresentar valores positivos no balanço de carbono, ou seja, que sua emissão se torne inferior ao armazenamento (LAL, 2021). Práticas que podem diminuir ou aumentar o estoque de carbono no solo estão presentes na **Figura 2**:

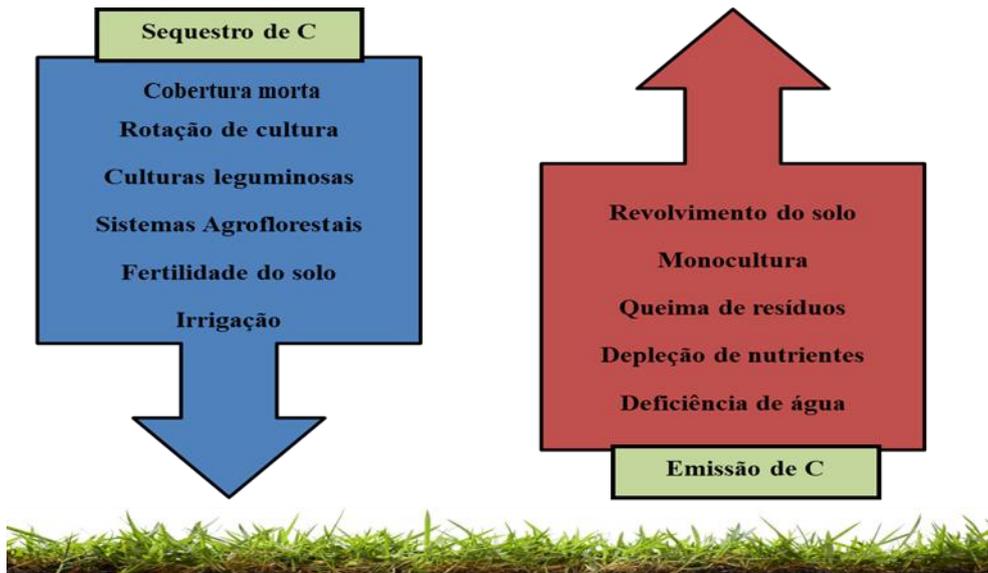


Figura 2. Efeito das práticas de manejo na dinâmica do carbono no solo.
Adaptado de Jarecki e Lal (2003).

Existe uma estreita relação entre a concentração de CO_2 , a disponibilidade de água para a planta, a retenção de nutrientes e a densidade dos solos (LAL, 2021). Logo, esses fatores também podem ser considerados indicadores ambientais, tendo em vista que alterações em suas dinâmicas influenciam nos processos de melhoria das características intrínsecas do solo. Além disso, o desenvolvimento das plantas depende da disponibilidade de água e nutrientes e das características físicas que o solo apresenta.

A composição química do solo, em especial a quantidade de nitrogênio (N) disponível, é um dos fatores que controla os processos de entrada e saída de carbono no sistema, já que o N afeta a taxa de decomposição da fitomassa (principal fonte de C). Associado a isso, a oferta de nitrogênio e fósforo, somada a aplicação de uma lâmina suplementar de irrigação que não proporcione condições de lixiviação, podem gerar maiores rendimentos a cultura, evidenciando a importância nas questões nutricionais e de umidade dos solos (WHITFORD; WADE, 2002b).

Assim, sabendo que a extração de nutrientes por parte da cultura depende diretamente da oferta dos próprios elementos existentes no solo, estudos envolvendo a palma forrageira (cultura altamente eficiente e sustentável que vem sendo utilizada na recuperação de áreas degradadas) buscaram mensurar o potencial de extração de seus clones (SOUZA et al., 2017; FERRAZ et al., 2020; DUBEUX JÚNIOR et al., 2021). Clones como a Orelha de elefante Mexicana e Miúda são capazes de extrair cerca de 65,05 e 46,96 kg ha^{-1} de nitrogênio, 17,13 e 17,16 kg ha^{-1} de fósforo e 421,88 e 351,78 kg

ha⁻¹ de potássio, respectivamente (MOREIRA et al., 2020). Em estudos desenvolvidos por Ferraz et al. (2020) resultados também foram encontrados para o ambos os clones sob diferentes níveis de reposição hídrica, onde constatou-se que lâminas mais abundantes (75%, 100% e 125% da evapotranspiração de referência – ET₀) promovem maiores concentrações de macronutrientes e micronutrientes.

O teor de umidade de um solo é um dos principais componentes da sustentabilidade. Importante na dinâmica da água, do carbono e da energia na interface solo-planta-atmosfera, este fator dita os padrões de desempenho produtivo das plantas, promovendo alterações na ciclagem de nutrientes e na fertilidade dos solos (FERRAZ et al., 2020; QUEIROZ et al., 2020).

Logo, a eficiência de um indicador que depende da sensibilidade ao manejo, da correlação com as funções desempenhadas pelo solo, do esclarecimento dos processos ecossistêmicos e da facilidade de compreensão pelo agricultor, podendo ser agrupados conforme o tempo de resposta às alterações realizadas no sistema (CONCEIÇÃO et al., 2005). Assim, a utilização de indicadores ambientais como forma de monitorar a sustentabilidade de um sistema torna-se uma estratégia viável e prática, uma vez que são poucas as alternativas que auxiliem nesse acompanhamento.

4.3 Potencial produtivo e sustentável das práticas de cultivo em sistemas de palma forrageira

Adaptada a regiões semiáridas, a palma forrageira (*Opuntia* spp. e *Nopalea* spp.) é uma das principais alternativas para produção de forragem em ambientes secos e que apresentam longos períodos de estiagem (REZENDE et al., 2020). Pertencente à família das cactáceas, essa espécie possui metabolismo fotossintético denominado como ácido das crassuláceas (CAM), que lhe permite captar CO₂ atmosférico durante a noite (quando apresenta baixas taxas de transpiração), favorecendo a eficiência no uso da água pela planta (SCALISI et al., 2016; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021; JARDIM et al., 2020; SALVADOR et al., 2021). Além disso, a palma possui características favoráveis à aceitação e ao desempenho animal (e.g. alta digestibilidade, alto teor de carboidratos solúveis e elevado armazenamento de água), o que a torna uma opção estratégica na atividade pecuária de grandes e pequenos produtores (JARDIM et al., 2020; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021b).

Apesar de sua rusticidade e adaptação, a palma forrageira quando bem manejada (i.e, sem restrições nutricionais e em condições hídricas favoráveis) tende a expressar o

seu potencial produtivo (SILVA et al., 2019). Dessa forma, a fim de se conhecer um sistema de produção adequado, viável e que maximize ainda mais sua produtividade, estudos mais aprofundados envolvendo a necessidade hídrica (QUEIROZ et al., 2016; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021a; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021b), cobertura do solo, consórcios (SALVADOR et al., 2021), diferentes densidades (SILVA et al., 2019), variedades e intensidade de corte (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021b), tem se intensificado nos últimos anos.

A capacidade de sobreviver em condições de clima seco fez com que a adoção de práticas de plantio como a irrigação fosse negligenciada. Porém, tem-se notado que, a depender da situação, a reposição hídrica pode influenciar positivamente na produtividade das plantas (QUEIROZ et al., 2016; SILVA et al., 2017) proporcionando um incremento de até 53,54 Mg de matéria fresca ha⁻¹ ano⁻¹ (FERRAZ et al., 2019). Por outro lado, Silva et al. (2017) relatam que em ambientes com precipitação acima de 493 mm ano⁻¹ (distribuída em pelo menos 7 meses de 55 mm mês⁻¹) não há a necessidade de se recorrer a esse manejo. Araújo Júnior et al. (2021a) também analisaram o desempenho produtivo da palma forrageira em Serra Talhada-PE, observaram não haver efeito significativo das lâminas de irrigação (40%, 80% e 120% da evapotranspiração da cultura - ETc), principalmente devido a precipitação média acumulada (647 mm ano⁻¹) no período experimental ficar próxima da normal climatológica da região (642 mm ano⁻¹). Resultados que corroboram com a ausência do efeito de lâminas de irrigação na produtividade, também foram encontrados por Diniz et al., (2017), Flores-Hernández et al., (2004) e Queiroz et al., (2015).

Sendo assim, nota-se que a regularidade dos eventos de precipitação interfere na produtividade e, conseqüentemente, no manejo de irrigação, e, por isso, em regiões semiáridas, a implantação de um cultivo irrigado proporciona segurança para a produção de forragem em épocas de veranicos e de volumes de chuva abaixo da média.

A utilização da cobertura morta é outra prática resiliente que pode auxiliar no mantimento dos níveis de umidade do solo e na disponibilidade de água para a cultura (ALVES et al., 2018). Quando sobre o solo, a cobertura morta se torna uma camada de proteção que evita a incidência direta de radiação na superfície, minimizando as taxas de evaporação, diminuindo a temperatura do solo e, conseqüentemente, conservando a sua umidade (SALVADOR et al., 2021). Além disso, melhorias na atividade microbiana, nas propriedades físico-químicas e na diminuição da perda de solo por erosão hídrica e escoamento superficial, podem ser observadas (ALVES et al., 2018).

Os benefícios agrônômicos e ambientais dos cultivos resilientes de palma forrageira são inúmeros, porém, sua utilização de forma exclusiva ainda limita a produtividade e a lucratividade do setor pecuário, obrigando o produtor a investir em fontes externas de alimento para o rebanho. Composta por 90% de água e apenas 10% de matéria seca, a palma forrageira possui baixos teores de fibras e de proteína bruta, e quando fornecida de forma única, pode provocar diarreia e distúrbios intestinais (CARDOSO et al., 2019). Assim, o consórcio com outras espécies forrageiras adaptadas ao clima local (i.g. gramíneas, leguminosas e oleaginosas) favorece o balanço nutricional exigido pelos animais (SALVADOR et al., 2021).

No caso do consórcio com espécies gramíneas, como o sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), a produção de biomassa total e as eficiências no uso da água e de nutrientes podem ser favorecidas (DINIZ et al., 2017; LIMA et al., 2018; SALVADOR et al., 2021). Segundo Jardim et al., (2020), o sistema palma-sorgo consegue produzir quase 4 vezes mais matéria seca quando comparado a um sistema exclusivo. Esse fato está fortemente ligado a diferença no momento de assimilação de CO₂ das duas espécies, onde espécies de metabolismo CAM realizam essa ação durante a noite, enquanto plantas C₄, captam CO₂ pela manhã. Além disso, sistemas consorciados favorecem a taxa de utilização da terra e a diversificação na oferta de forragem, otimizando a eficiência do sistema e evitando a exploração de novas áreas de cultivo.

Atualmente, devido à resistência a cochonilha do carmim (uma das principais pragas da cultura), às espécies de palma mais utilizadas pertencem aos gêneros *Nopalea* [Ipa Sertânia - IPA (*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck) e Miúda - MIU (*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck)] e *Opuntia* [Orelha de Elefante Mexicana - OEM (*Opuntia stricta* Haw. (Haw.))] (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021a; PINHEIRO et al., 2021). Porém, nos últimos anos, espécies pouco exploradas como 'Orelha de Elefante Africana - OEA (*Opuntia undulata* Griffiths), V19 (*Opuntia larreyi* FAC Weber ex Coult.) e F8 (*Opuntia atropes* Rose), também estão sendo monitoradas (SILVA et al., 2014; JARDIM et al., 2021; SILVA et al., 2021a).

A escolha do genótipo depende da finalidade e da produtividade, uma vez que essa última varia conforme a adoção das práticas adotadas. A densidade de plantio, por exemplo, pode influenciar positivamente a produtividade a palma quando submetida até 80.000 plantas por ha⁻¹ (SILVA et al., 2014), que segundo Pinheiro et al. (2021), quando associada a prática de consórcio, minimiza os efeitos da sazonalidade da produção de forragem, na oferta e suplementação.

Sendo assim, a adoção das práticas de cultivo deve ser realizada de forma criteriosa a ponto de favorecer a sustentabilidade e o potencial de produção das culturas, gerando proteção ambiental e renda para os produtores.

4.4 Benefícios socioambientais do cultivo de palma forrageira como alternativa para recuperação de áreas degradadas

Os impactos gerados pelas mudanças climáticas e pela exploração de áreas de vegetação natural tem acelerado substancialmente a degradação dos solos, limitando os recursos e dificultando o desenvolvimento das culturas. Na região Semiárida, tem-se visto que esse cenário afeta negativamente o conteúdo de água dos solos, agravando ainda mais a situação hídrica da região (QUEIROZ et al., 2020).

Nessas condições, devido a suas características adaptativas e produtivas (mencionadas em 5.3), o cultivo da palma forrageira torna-se uma estratégia sustentável a fim de mitigar tal situação. Segundo Borland et al. (2009), espécies de metabolismo CAM são capazes de tolerar perdas de até 90% no seu conteúdo de água (devido à elasticidade da parede celular e a alta diluição da seiva), controlar a flutuação da água disponível no solo (por meio da fisiologia das raízes) e promover uma maior captação de CO₂ quando comparado a espécies C3 e C4. Somado a isso, essas espécies ainda promovem uma produção de biomassa semelhante à de plantas de metabolismo C3 e C4 quando utilizado apenas 20% de sua necessidade hídrica (FERRAZ et al., 2020).

A eficiência do uso da água (EUA) pode ser expressa pela assimilação de carbono por unidade de água consumida por uma planta e é comumente estimada pela razão entre a produtividade e a evapotranspiração da cultura do sistema (HE et al., 2017). Porém, em áreas degradadas, esse parâmetro está associado às características de resiliência da cultura, uma vez que, o conteúdo de matéria orgânica e a umidade do solo se encontram em baixos níveis (BORLAND et al., 2009).

Dessa forma, altamente eficiente quanto ao uso da água, a palma forrageira tem se tornado objeto de estudo para recuperação de áreas. Queiroz et al. (2020) mostram que a utilização de palma forrageira em solos que foram submetidos ao processo de desmatamento, pode atenuar a variação temporal e a redução da umidade do solo. Enquanto Bautista-Cruz et al. (2018), para condições semelhantes de mudança do uso do solo, verificaram que a palma consegue promover um aumento na biomassa microbiana e, conseqüentemente, no teor de carbono orgânico do solo (SOC). Além de desempenhar um papel social (i.e., alimentação humana), econômico (i.e., alimentação animal,

produção de corante - Carmin) e ambiental (i.e., controle de erosão, extração de nutrientes e reabilitação de terras) (KRÜMPEL et al., 2020), tornando-a uma das melhores alternativas para a região.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR NETTO, A. O. et al. Características químicas e salino-sodicidade dos solos do Perímetro. **Ciência Rural**, v. 37, n. 6, p. 1640–1645, 2007.

ALTHOFF, T. D. et al. Climate change impacts on the sustainability of the firewood harvest and vegetation and soil carbon stocks in a tropical dry forest in Santa Teresinha Municipality , Northeast Brazil q. **Forest Ecology and Management**, v. 360, p. 367–375, 2016.

ALVES, H. K. M. N. et al. The application of agrometeorological techniques contributes to the agricultural resilience of forage cactus: A review. **Amazonian Journal of Plant Research**, v. 2, p. 207-220, 2018.

ANGHINONI, G. et al. Conservation agriculture strengthen sustainability of Brazilian grain production and food security. **Land Use Policy**, v. 108, p. 105591, 2021.

ARAÚJO JÚNIOR, G. DO N. et al. Productivity , bromatological composition and economic benefits of using irrigation in the forage cactus under regulated deficit irrigation in a semiarid environment. **Bragantia**, v. 80, p. e1221, 2021a.

ARAÚJO JÚNIOR, G. N. et al. Phenophases , morphophysiological indices and cutting time in clones of the forage cacti under controlled water regimes in a semiarid environment. **Journal of Arid Environments journal**, v. 190, p. 104510, 2021b.

BAPTISTA, F. et al. Which are the best practices for MSc programmes in sustainable agriculture ? **Journal of Cleaner Production journal**, v. 303, p. 126914, 2021.

BAUTISTA-CRUZ, A. et al. Cultivation of *Opuntia ficus-indica* under different soil management practices: a possible sustainable agricultural system to promote soil carbon sequestration and increase soil microbial biomass and activity. **Land Degradation e Development**, v. 29, p. 38–46, 2018.

BORLAND, A. M. et al. Exploiting the potential of plants with crassulacean acid metabolism for bioenergy production on marginal lands. **Journal of Experimental**

Botany, v. 60, n. 10, p. 2879–2896, 2009.

BURNEY, J. et al. Climate change adaptation strategies for smallholder farmers in the Brazilian Sertão. **Climatic Change**, v. 126, n. 1–2, p. 45–59, 2014.

CARDOSO, D. B. et al. Levels of inclusion of spineless cactus (*Nopalea cochenillifera* Salm Dyck) in the diet of lambs. **Animal Feed Science and Technology**, v. 247, p. 23–31, 2019.

CONCEIÇÃO, P. C. et al. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 5, p. 777–788, 2005.

DAVIDSON, E. A.; JANSSENS, I. A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. **Nature**, v. 440, p. 165–173, 2006.

DINIZ, W. J. S. et al. Forage cactus-sorghum intercropping at different irrigation water depths in the Brazilian Semiarid Region. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 9, p. 724–733, 2017.

DONG, S. et al. Enhancing sustainability of grassland ecosystems through ecological restoration and grazing management in an era of climate change on Qinghai- Tibetan Plateau. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 287, p. 106684, 2020.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa informação Tecnológica, 2009. 627p

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Climate Change: Investing in climate solutions for sustainable agri-food systems**, 2021. Disponível em: <<https://www.fao.org/climate-change/news/detail/en/c/1443984/>>. Acesso em: 21 out. 2021.

FERRAZ, R. L. S. et al. Estimation of productivity gain by irrigated and fertilized forage palm plants (*Opuntia ficus- indica* (L .) Mill . and *Nopalea cochenillifera* (L .) Salm-Dyck): systematic review and meta-analysis. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 11, p. 1873–1882, 2019.

FERRAZ, R. L. S. et al. Variations in soil water replacement levels promote changes in forage cactus mineral composition and biomass productivity. **Ambiente e água**, v. 15, n. 5, p. e2537, 2020.

- FLORES-HERNÁNDEZ, A. et al. Yield and physiological traits of prickly pear cactus ‘ nopal ’ (*Opuntia* spp.) cultivars under drip irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 70, p. 97–107, 2004.
- FRIEDRICH, T.; DERPSCH, R.; KASSAM, A. Overview of the Global Spread of Conservation Agriculture. **Field Actions Science Reports**, v. Special, n. 6, p. 0–7, 2012.
- GAVA, C. A. T. et al. Land- use change alters the stocks of carbon, nitrogen, and phosphorus in a Haplic Cambisol in the Brazilian semi-arid region. **Soil use and management**, v. 38, p. 1–11, 2021.
- HE, B. et al. A new indicator of ecosystem water use efficiency based on surface soil moisture retrieved from remote sensing. **Ecological Indicators**, v. 75, p. 10–16, 2017.
- HUNKE, P. et al. Soil changes under different land-uses in the Cerrado of Mato. **Geoderma Regional**, v. 4, p. 31–43, 2015.
- IPCC, 2022: **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- JARDIM, A. M. R. F. et al. Dinâmica da água no solo com cultivo de palma forrageira sob quatro sistemas de plantio. **Agrometeoros**, v. 27, n. 2, p. 357–365, 2019.
- JARDIM, A. M. R. F. et al. Interaction of agroecosystem intercropped with forage cactus-sorghum in the semi-arid environment: a review. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 5, n. 1, p. 069–087, 2020.
- JARDIM, A. M. R. F. et al. Intercropping forage cactus and sorghum in a semi-arid environment improves biological efficiency and competitive ability through interspecific complementarity. **Journal of Arid Environments**, v. 188, p. 104464, 2021a.
- JARDIM, A. M. R. F. et al. Genotypic differences relative photochemical activity , inorganic and organic solutes and yield performance in clones of the forage cactus under semi-arid environment. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 162, p. 421–430, 2021b.
- JARECKI, M. K.; LAL, R. Crop Management for Soil Carbon Sequestration. **Critical**

Reviews in Plant Sciences, v. 22, n. 5, p. 37–41, 2003.

KASSAM, A.; FRIEDRICH, T.; DERPSCH, R. Global spread of Conservation Agriculture. **International Journal of Environmental Studies**, v. 76, n. 1, p. 1–23, 2018.

KRÜMPEL, J. et al. Suitability of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. and *Euphorbia tirucalli* L. as energy crops for anaerobic digestion. **Journal of Arid Environments**, v. 174, p. 104047, 2020.

LAL, R. Soil management for carbon sequestration. **South African Journal of Plant and Soil**, v. 38, n. 3, p. 231–237, 2021.

LEWANDROWSKI, W. et al. Global change impacts on arid zone ecosystems : Seedling establishment processes are threatened by temperature and water stress. **Ecology and Evolution**, v. 11, p. 8071–8084, 2021.

LIMA, L. R. et al. Growth , water use and efficiency of forage cactus sorghum intercropping under different water depths. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 113–118, 2018.

MAPBIOMAS. **Infográfico Caatinga**. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/> Acesso em: 18 out 2021.

MEDEIROS, E. V. et al. Absolute and specific enzymatic activities of sandy entisol from tropical dry forest , monoculture and intercropping areas. **Soil & Tillage Research**, v. 145, p. 208–215, 2015.

MEDEIROS, E. V. et al. Soil organic carbon , microbial biomass and enzyme activities responses to natural regeneration in a tropical dry region in Northeast Brazil. **Catena**, v. 151, p. 137–146, 2017.

MENEZES, R. S. C. et al. Soil and vegetation carbon stocks after land-use changes in a seasonally dry tropical forest ^ mulo Sim o. **Geoderma**, v. 390, p. 114943, 2021.

ONU, United nations, **department of economic and social affairs, World Population Prospects 2019**, Volume I: Comprehensive Tables, 2019.

PINHEIRO, A. G. et al. Lacunas de produtividades e estratégias de cultivo na melhoria da produção de forragem para a região semiárida brasileira - Revisão. **Revista Brasileira**

de Geografia Física, v. 14, n. 04, p. 2403–2426, 2021.

PURVIS, B.; MAO, Y.; ROBINSON, D. Three pillars of sustainability : in search of conceptual origins. **Sustainability Science**, v. 14, n. 3, p. 681–695, 2019.

QUEIROZ, M. G. et al. Características morfofisiológicas e produtividade da palma forrageira em diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 10, p. 931–938, 2015.

QUEIROZ, M. G. et al. Spatial and temporal dynamics of soil moisture for surfaces with a change in land use in the semi-arid region of Brazil. **Catena**, v. 188, p. 104457, 2020.

QUEIROZ, M. G. et al. relações hídrico-econômicas da palma forrageira cultivada em ambiente semiárido. **Irriga**, v. Edição esp, p. 141–154, 2016.

REZENDE, F. M. et al. Nutritional effects of using cactus cladodes (*Opuntia stricta* Haw Haw) to replace sorghum silage in sheep diet. **Tropical Animal Health and Production**, v. 52, p. 1875–1880, 2020.

RIBEIRO, K. et al. Land cover changes and greenhouse gas emissions in two different soil covers in the Brazilian Caatinga. **Science of the Total Environment**, v. 571, p. 1048–1057, 2016.

RODENBURG, J. et al. Adoption by adaptation : moving from Conservation Agriculture to conservation practices. **International Journal of Agricultural Sustainability**, v. 19, p. 437–455, 2020.

SAATH, K. C. O.; FACHINELLO, A. L. Crescimento da Demanda Mundial de Alimentos e Restrições do Fator Terra no Brasil 1. **Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural**, v. 56, n. 02, p. 195–212, 2015.

SALVADOR, K. R. S. et al. Intensificação de sistemas de produção de palma forrageira por meio de consorciação rotativa com gramíneas, leguminosas e oleaginosas: uma revisão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 04, p. 2322–2343, 2021.

SCALISI, A. et al. Cladode growth dynamics in *Opuntia ficus-indica* under drought. **Environmental and Experimental Botany**, v. 122, p. 158–167, 2016.

SCHARLEMANN, J. P. W. et al. Global soil carbon : understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. **Carbon Management**, v. 5, n. 1, p. 81–91, 2014.

SILVA, A. S. et al. Características agronômicas de variedades de *Opuntia cochenillifera* e *Nopalea cochenillifera* sob diferentes densidades de plantio. **Colloquium Agrariae**, v. 15, n. 6, p. 88–96, 2019.

SILVA, J. O. N. et al. Cultivo de genótipos de palma forrageira sob agricultura bioessalina como alternativa para incremento do aporte forrageiro do semiárido brasileiro : Uma revisão Cultivation of forage cactus genotypes under biosalin agriculture as an alternative to increase. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 5, p. 1–14, 2021a.

SILVA, P. F. et al. Seasonal patterns of carbon dioxide , water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 147, p. 71–82, 2017a.

SILVA, T. G. F. et al. Agrometeorological research on forage cactus and its advances in Brazil. **Amazonian Journal of Plant Research**, v. 2, p. 45–68, 2017b.

SILVA, T. G. F. et al. Área do cladódio de clones de palma forrageira : modelagem , análise e aplicabilidade Material e Métodos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 9, n. 4, p. 633–641, 2014.

SILVA, T. G. F. et al. Soil properties and microclimate of two predominant landscapes in the Brazilian semiarid region: Comparison between a seasonally dry tropical forest and a deforested area. **Soil and Tillage Research**, v. 207, p. 1–10, 2021b.

SOHN, J. A.; SAHA, S.; BAUHUS, J. Forest Ecology and Management Potential of forest thinning to mitigate drought stress : A meta-analysis. **Forest Ecology and Management**, v. 380, p. 261–273, 2016.

STANTURF, J. A.; CALLAHAM, M. A. **Soils and Landscape Restoration**. [s.l.] Academic Press, 2021.

WHITFORD, W.; WADE, E. L. Desertification. In: WHITFORD, W.; WADE, E. L. (Eds.). **Ecology of Desert Systems**. [s.l.] Academic Press, p. 275–304, 2002a.

WHITFORD, W.; WADE, E. L. Decomposition and Nutrient Cycling. In: WHITFORD, W.; WADE, E. L. (Eds.). **Ecology of Desert Systems**. [s.l.] Academic Press, p. 235–274, 2002b.

YANARDAĞ, İ. H. et al. Evaluation of carbon and nitrogen dynamics in different soil types amended with pig slurry , pig manure and its biochar by chemical and

thermogravimetric analysis. **Biol Fertil Soils**, v. 51, p. 183–196, 2015.

ZULU, L. C.; DJENONTIN, I. N. S.; GRABOWSKI, P. From diagnosis to action : Understanding youth strengths and hurdles and using decision-making tools to foster youth-inclusive sustainable agriculture intensification. **Journal of Rural Studies**, v. 82, p. 196–209, 2021.

----- CAPÍTULO 2 -----

**NÍVEIS DE REPOSIÇÃO HÍDRICA AFETAM OS ESTOQUES DE ÁGUA,
CARBONO E NUTRIENTES EM SISTEMAS DE PALMA FORRAGEIRA
CULTIVADA EM AMBIENTE SEMIÁRIDO?**

CAPÍTULO 2 – Níveis de reposição hídrica afetam os estoques de água, carbono e nutrientes em sistemas de palma forrageira cultivada em ambiente semiárido?

Resumo

O equilíbrio entre produtividade e sustentabilidade é um dos principais desafios encontrados pelo setor agropecuário. Nesse contexto, visando a ausência de informações sobre essa temática, este estudo objetivou analisar os reais efeitos da reposição hídrica na produtividade, nos estoques de água, carbono e nutrientes em sistemas de clones de palma forrageira cultivada em ambiente semiárido. O estudo foi desenvolvido na UFRPE-UAST em Serra Talhada-PE, Brasil. Foram avaliados três ciclos produtivos de palma forrageira desenvolvidos entre janeiro/2017 e janeiro/2022. Doze sistemas de cultivo constituídos pela combinação entre três clones de palma forrageira (Ipa Sertânia–IPA; Miúda–MIU; e Orelha de Elefante Mexicana–OEM) e quatro níveis de reposição hídrica baseados na evapotranspiração da cultura (0%-ETc; 40%-ETc; 80%-ETc; e 120%-ETc) foram utilizados. Avaliou-se: as produtividades de matéria fresca (MF) e seca (MS) e os estoques de água ($\text{Água}_{\text{Planta}}$; $\text{Água}_{\text{Solo}_{0-70\text{cm}}}$), carbono ($\text{CO}_{\text{Planta}}$; $\text{CO}_{\text{Solo}_{0-20/20-40\text{cm}}}$) e nutrientes na planta (N_{Planta} , P_{Planta} , K_{Planta} , $\text{Ca}_{\text{Planta}}$, $\text{Mg}_{\text{Planta}}$; e $\text{Na}_{\text{Planta}}$) e no solo ($\text{P}_{\text{Solo}_{0-20/20-40\text{cm}}}$, $\text{K}_{\text{Solo}_{0-20/20-40\text{cm}}}$, $\text{Ca}_{\text{Solo}_{0-20/20-40\text{cm}}}$, $\text{Mg}_{\text{Solo}_{0-20/20-40\text{cm}}}$; e $\text{Na}_{\text{Solo}_{0-20/20-40\text{cm}}}$). Os dados foram submetidos a análise descritiva, teste de normalidade, homoscedasticidade, análise de variância e teste de comparação de médias (Fisher, $p < 0,05$). Realizou-se ainda a análise de componentes principais para determinação dos grupos de variáveis correlacionadas e o ranking dos sistemas conforme médias superiores. Os resultados indicaram que, devido suas características intrínsecas, sistemas com o clone OEM ($p < 0,05$) se destacaram em todas as variáveis da interface planta. Já o nível de reposição hídrica não afetou a MF e MS ($p > 0,05$) dentro dos clones. Porém, considerando o melhor sistema de cada clone para $\text{CO}_{\text{Planta}}$, OEM-0% é capaz de estocar aproximadamente 133% (5,3 Mg ha^{-1}) e 315% (7,1 Mg ha^{-1}) a mais que MIU-40% e IPA-120%, respectivamente. O N_{Planta} , foi superior nos menores níveis de reposição hídrica (131,6 kg ha^{-1} – OEM-0% e 109,1 kg ha^{-1} – OEM-40%). Devido a composição química da água utilizada, a prática da irrigação potencializou o acúmulo de $\text{Mg}_{\text{Planta}}$ e $\text{Na}_{\text{Planta}}$. Além disso, verificou-se que independente do clone, $\text{Ca}_{\text{Planta}}$ e K_{Planta} são extraídos em maior proporção. Quanto ao solo, devido aos níveis de chuva, notou-se uma variabilidade acentuada entre os sistemas. A $\text{Água}_{\text{Solo}_{0-70\text{cm}}}$ é superior em OEM-120%ETc (93,1 mm) e OEM-0%ETc (87,0 mm), porém não diferem de IPA-0% (79,7 mm) e MIU-0% (78,3 mm). Baixos níveis de reposição hídrica impulsionaram o CO_{Solo} , P_{Solo} e K_{Solo} , por outro lado níveis maiores contribuíram com Ca_{Solo} , Mg_{Solo} e Na_{Solo} . Quatro PCs explicaram 76% da variação dos dados. CP1 (30,40%) e PC2 (27,82%) relacionaram as variáveis da planta com a $\text{Água}_{\text{Solo}_{0-70\text{cm}}}$, $\text{Na}_{\text{Solo}_{0-20\text{cm}}}$ e $\text{K}_{\text{Solo}_{0-20/20-40\text{cm}}}$ e os níveis de reposição hídrica com os estoques de CO e nutrientes do solo, respectivamente. Os ranqueamento indicou OEM-120%; OEM-40%; OEM-80% e OEM-0%, nessa ordem, como os sistemas que apresentaram o maior número de médias intermediárias e superiores. Logo, a escolha do sistema potencializa a produtividade, e os estoques de água, carbono e nutrientes no semiárido brasileiro. Diante disso, sistemas com o clone OEM são excelentes opções para combinar produtividade e os estoques de água e nutriente na planta. Enquanto os níveis inferiores de irrigação minimizam os efeitos das mudanças climáticas por potencializar os estoques de carbono orgânico no

sistema. Entretanto, estudos mais precisos devem ser conduzidos a fim de analisar a influência da precipitação pluviométrica juntamente ao manejo de reposição hídrica.

Palavra-chave: Mudanças climáticas; *Nopalea* spp.; *Opuntia* spp. Sustentabilidade.

Do water replacement levels affect water, carbon and nutrient stocks in forage palm systems grown in semi-arid environments?

Abstract

The balance between productivity and sustainability is one of the main challenges faced by the agricultural sector. In this context, given the lack of information on this topic, this study aimed to analyze the real effects of water replacement on productivity, water, carbon and nutrient stocks in forage palm clone systems cultivated in a semiarid environment. The study was developed at UFRPE-UAST in Serra Talhada-PE, Brazil. Three production cycles of forage palm developed between January/2017 and January/2022 were evaluated. Twelve cropping systems consisting of the combination of three forage palm clones (Ipa Sertânia-IPA; Miúda-MIU; and Orelha de Elefante Mexicana-OEM) and four levels of water replacement based on crop evapotranspiration (0%-ETc; 40%-ETc; 80%-ETc; and 120%-ETc) were used. The following were evaluated: fresh matter (MF) and dry matter (DM) productivity and water stocks (PlantWater; SoilWater_0-70cm), carbon (COPlant; SoilCO_0-20/20-40cm) and nutrients in the plant (NPlant, PPlant, KPlant, CaPlant, MgPlant; and NaPlant) and in the soil (PSoil_0-20/20-40cm, KSoil_0-20/20-40cm, CaSoil_0-20/20-40cm, MgSoil_0-20/20-40cm; and NaSoil_0-20/20-40cm). Data were subjected to descriptive analysis, normality test, homoscedasticity, analysis of variance and mean comparison test (Fisher, $p < 0.05$). Principal component analysis was also performed to determine the groups of correlated variables and the ranking of the systems according to the highest averages. The results indicated that, due to their intrinsic characteristics, systems with the OEM clone ($p < 0.05$) stood out in all variables of the plant interface. The level of water replacement did not affect the MF and DM ($p > 0.05$) within the clones. However, considering the best system of each clone for COplanta, OEM-0% is capable of storing approximately 133% (5.3 Mg ha⁻¹) and 315% (7.1 Mg ha⁻¹) more than MIU-40% and IPA-120%, respectively. NPlanta was superior at the lowest levels of water replacement (131.6 kg ha⁻¹ – OEM-0% and 109.1 kg ha⁻¹ – OEM-40%). Due to the chemical composition of the water used, the practice of irrigation enhanced the accumulation of MgPlanta and NaPlanta. Furthermore, it was found that, regardless of the clone, CaPlanta and KPlanta are extracted in greater proportion. As for soil, due to rainfall levels, a marked variability was noted between systems. Águasolo_0-70cm is higher in OEM-120%ETc (93.1 mm) and OEM-0%ETc (87.0 mm), but does not differ from IPA-0% (79.7 mm) and MIU-0% (78.3 mm). Low levels of water replacement boosted COsolo, Psolo and Ksolo, on the other hand, higher levels contributed to Casolo, Mgsolo and Nasolo. Four PCs explained 76% of the data variation. CP1 (30.40%) and PC2 (27.82%) related the plant variables with ÁguaSolo_0-70cm, NaSolo_0-20cm and KSolo_0-20/20-40cm and the water replacement levels with the soil CO and nutrient stocks, respectively. The rankings indicated OEM-120%; OEM-40%; OEM-80% and OEM-0%, in that order, as the systems that presented the highest number of intermediate and higher averages. Therefore, the choice of the system enhances productivity, and water, carbon and nutrient stocks in the Brazilian semiarid region. Therefore, systems with the OEM clone are excellent options for combining productivity and water and

nutrient stocks in the plant. While lower irrigation levels minimize the effects of climate change by enhancing organic carbon stocks in the system. However, more precise studies must be conducted in order to analyze the influence of rainfall together with water replacement management. Keyword: Climate change; *Nopalea* spp.; *Opuntia* spp. Sustainability.

Keyword: Climate changes; *Nopalea* spp.; *Opuntia* spp. Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

Diante do cenário das mudanças climáticas, a busca incansável pelo equilíbrio entre a produção de alimento e a sustentabilidade é um dos principais desafios enfrentados na atualidade (SALVADOR et al., 2021). Impulsionada pela conversão da vegetação nativa, as projeções sobre o clima indicam modificações nos regimes de precipitação pluvial, elevação da temperatura do ar e intensificação dos seus efeitos sobre o setor agropecuário (QUEIROZ et al., 2020).

Em regiões semiáridas, mesmo sob as condições climáticas adversas (i.e. alta taxas de temperaturas, variabilidade espaço-temporal das chuvas e elevada demanda atmosférica), esse setor se destaca dentre as atividades econômicas e de subsistência (JARDIM et al., 2023). Porém, temendo situações piores, pesquisadores e estudiosos da área não têm medido esforços em busca de alternativas que aliem a produtividade e a conservação dos recursos (JARDIM et al., 2023; SANTOS et al., 2024a).

O solo é um dos principais recursos terrestres e desempenha funções fundamentais na manutenção dos seres vivos. Capaz de armazenar água, nutrientes e carbono, a dinâmica desses elementos sofre influência das condições do clima e de uso da terra (LUO et al., 2024). Estudos recentes apontam que o conteúdo de Carbono Orgânico do Solo (COS) é a chave para estabelecer uma agricultura produtiva e sustentável, tendo em vista que na maioria dos casos a produtividade está intimamente relacionada a este indicador (MEDEIROS; SOARES; MAIA, 2022). Além disso, sistemas que promovam o acúmulo de COS são considerados sumidouros capazes de absorver o carbono atmosférico (AVILA et al., 2023; JARDIM et al., 2023; JARECKI; LAL, 2003; LAL, 2021). Afirmações semelhantes referem-se à fixação de Nitrogênio (N), uma vez que esses são os principais elementos dos gases de efeito estufa.

Além do solo, o entendimento do potencial de extração e armazenamento de carbono e nutrientes pela planta é de grande valia. O nitrogênio, por exemplo, apresenta um papel fundamental no desenvolvimento das espécies vegetais, visto que está presente

nas moléculas orgânicas das plantas (FERRAZ et al., 2019; TAIZ et al., 2017). Dessa forma, a eficiência de uso dos recursos do material vegetal deve ser considerada.

A utilização de espécies adaptadas é amplamente citada na literatura como uma prática resiliente e eficiente em termos econômicos e de uso dos recursos naturais (JARDIM et al., 2021; SOUZA et al., 2023). No caso de regiões de clima semiárido, a palma forrageira é uma das principais alternativas. Pertencente à família das cactáceas, a palma é detentora do Metabolismo Ácido das Crassuláceas (MAC), que promove uma maior eficiência no uso da água quando comparada a espécies de metabolismo C3 e C4 (SALVADOR et al., 2024, 2021).

Esse tipo de metabolismo promove o fechamento estomático durante o dia (período caracterizado por temperatura elevadas e alta demanda atmosférica) e a abertura durante a noite, o que minimiza os efeitos do clima sobre sua transpiração e eleva sua capacidade de armazenamento de água pelos tecidos (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021). Além disso, espécies MAC têm alta capacidade de absorção de CO₂ (JARDIM et al., 2023).

Por sua rusticidade, informações sobre adoção de práticas de cultivo ainda estão sendo exploradas. Estudos recentes têm buscado desvendar o efeito dos manejos de adubação e irrigação em sua produtividade (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021; SANTOS et al., 2024b). Porém, pouco se sabe sobre a adoção de práticas sustentáveis que venham a mitigar os efeitos das mudanças climáticas, por meio dos estoques de água, carbono e nutrientes (WANG et al., 2024).

Dessa forma, partimos da hipótese de que a produtividade e os estoques de água, carbono e nutrientes no solo e na planta podem ser afetados pela adoção de práticas resilientes como o uso de espécies adaptadas associada ao manejo de irrigação. Além disso, espera-se que a melhor combinação possa promover a sustentabilidade e atingir as metas impostas pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2024): ODS 1 (Erradicação da pobreza); 2 (Fome zero); 8 (Emprego digno e crescimento econômico); 12 (Consumo e produção responsável) e 13 (Combate as alterações climáticas). Logo, o presente estudo tem como objetivo determinar a produtividade e os estoques de água, carbono e nutrientes de sistemas de cultivo com clones de palma forrageira submetida a diferentes níveis de reposição hídrica, bem como indicar os sistemas que proporcionam maior equilíbrio produtivo e sustentável.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização da área de estudo

Os dados deste estudo foram coletados entre os anos de 2017 e 2022 no município de Serra Talhada, Pernambuco, Brasil, mais especificamente no Centro de Referência Internacional de Estudos Agrometeorológicos de Palma e outras Plantas Forrageiras (CentroRef), pertencente a Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UAST-UFRPE, 7°59' S, 38°15' W e 431 m, Figura 1). Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é denominado como BSw_h (ALVARES et al., 2013), semiárido, com precipitação pluvial média de 624 mm ano⁻¹ e valores médios anuais de temperatura e umidade relativa em torno de 24,8 °C e 63%, respectivamente (SILVA et al., 2015).

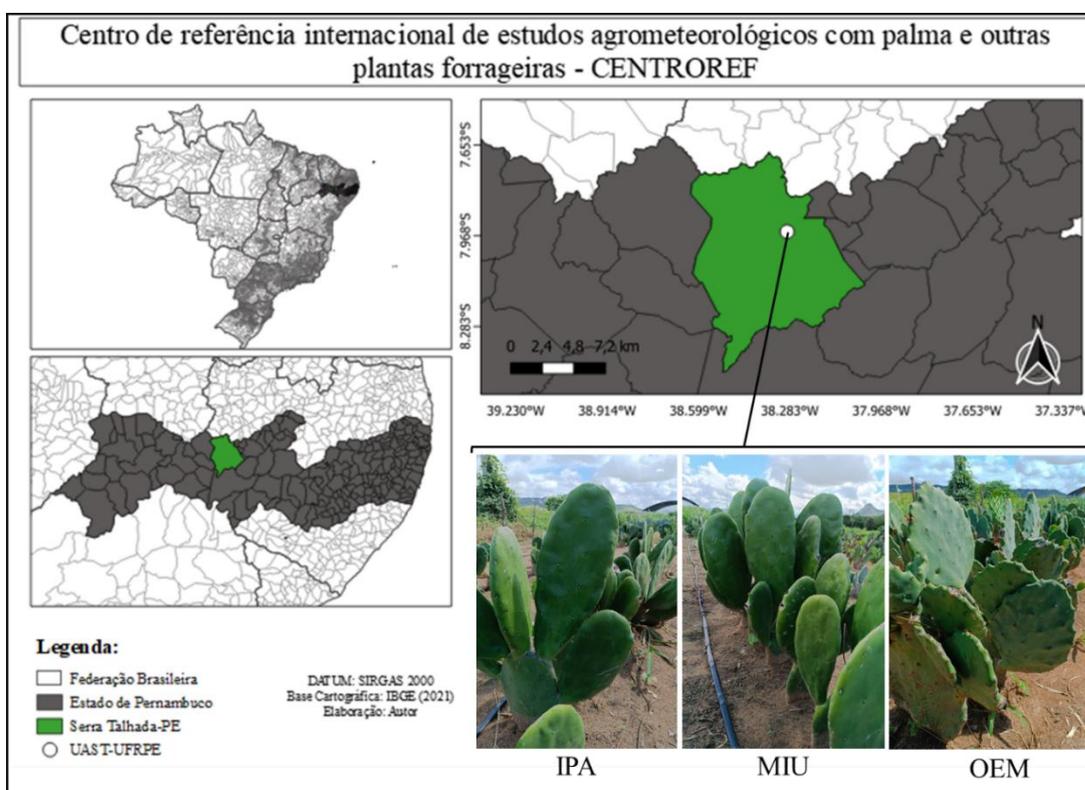


Figura 1. Localização das áreas experimentais no Centro de Referência Internacional de Estudos de Agrometeorologia de Palma e outras Plantas Forrageiras – CentroRef e descrição dos clones IPA (Ipa Sertânea), MIU (Miúda) e OEM (Orelha de Elefante Mexicana). Fonte: Elaborado pelo autor.

O solo da área experimental é classificado como Cambissolo Háplico Ta Eutrófico Típico, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018), sendo suas características físico-químicas descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Características físico-químicas do solo da área experimental.

Características químicas											
Prof.	CEes	pH	C	MO	P	K	Na	Ca	Mg	CTC	V
(cm)	dS m ⁻¹		g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	mg dm ⁻³		---- cmolc dm ⁻³ ----				%
0-20	0,87	6,9	5,8	10,02	78,11	1,28	0,04	4,0	1,60	7,4	93,5
20-40	0,52	6,7	4,8	8,28	66,51	0,74	0,03	4,5	2,20	8,2	91,2
Características físicas											
Prof.	Densidade		Porosidade			Partícula					
(cm)	g cm ³		(%)			g kg ⁻¹					
	solo	Partícula	Total	Areia total	Silte	Argila					
0-20	1,58	2,43	34,80	833,3	128,4	38,3					
20-40	1,60	2,53	36,71	830,4	118,8	50,8					

CEes – Condutividade elétrica do estrato de saturação do solo; MO – Matéria orgânica; CTC – Capacidade de troca de cátions; V – saturação por bases.

2.2 Caracterização dos sistemas de cultivo

Neste estudo foram avaliados dados de três ciclos experimentais referentes a três clones de palma forrageira submetidos a quatro níveis de reposição hídrica durante o período de janeiro de 2017 a janeiro de 2022.

O plantio da palma ocorreu em setembro de 2016 obedecendo ao espaçamento de 1,00 m entre fileiras e 0,20 m entre plantas (50.000 plantas ha⁻¹). O delineamento experimental utilizado deu-se em blocos casualizados (DBC) com quatro repetições. Foram analisados 12 tratamentos (sistemas de cultivo) por meio da combinação entre os clones de palma forrageira Ipa Sertânia (IPA - *Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck), Miúda (MIU - *N. cochenillifera* (L.) Salm-Dyck) e Orelha de Elefante Mexicana (OEM - *Opuntia stricta* (Haw.) Haw.) e as lâminas de reposição hídrica 0%, 40%, 80% e 120% da evapotranspiração da cultura (ETc). Cada parcela experimental foi composta por quatro fileiras com 25 plantas cada, arranjadas em uma área de 20 m².

Após estabilização do palmar, deu-se início a aplicação dos tratamentos. Os ciclos compreenderam os seguintes intervalos de tempo: Ciclo 1 - C1: janeiro de 2017 a junho de 2018 (~531 dias); Ciclo 2 - C2: fevereiro de 2019 a maio de 2020 (~423 dias); e Ciclo 3 - C3: outubro de 2020 a janeiro de 2022 (~433 dias).

2.3 Manejo da área experimental

Para melhor condução do estudo, capinas e aplicações de defensivos foram realizadas para o controle de ervas daninhas e pragas/doenças, respectivamente. Adubações foram realizadas ao início de cada ciclo experimental conforme a

recomendação do Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) para a cultura da palma forrageira (250 Kg de N ha⁻¹; 60 Kg de P ha⁻¹; 325 Kg de K ha⁻¹).

O manejo de água foi realizado a cada dois dias (segundas, quartas e sextas-feiras) por meio de um sistema de irrigação por gotejamento com 0,20 m de espaçamento entre emissores. A vazão de trabalho do sistema foi de 2,25 L h⁻¹ sob pressão de 1 atm. A água utilizada era proveniente de poço artesiano com condutividade elétrica de 1,51 dS m⁻¹ e concentrações de sódio e potássio em torno de 168,66 mg L⁻¹ e 28,17 mg L⁻¹, respectivamente. As lâminas de água foram determinadas pela metodologia imposta por Penman-Monteith, conforme parametrização do boletim da FAO-56 (ALLEN et al., 1998), que considera o produto entre a evapotranspiração de referência (ET_o) e o coeficiente da cultura da palma forrageira (k_c) de 0,52 proposto por Queiroz et al. (2016). Para isso, dados diários de temperatura do ar (T_{ar}, °C), umidade relativa do ar (UR, %), radiação solar global (R_g, MJ m⁻²), velocidade do vento a 2 metros de altura (V, m s⁻¹), pressão atmosférica (P_{atm}, kPa) e precipitação pluviométrica (Precip., mm), foram coletados em uma estação meteorológica pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizado a 20 m da área de cultivo.

2.4 Produtividades de matéria fresca e seca

Para determinação da produtividade de matéria fresca (MF), cinco plantas representativas da área útil de cada sistema foram colhidas e pesadas para obtenção do peso médio da planta. Em seguida, estimou-se a densidade final de plantas por hectare com base na contabilização dos indivíduos das duas linhas centrais de cada parcela. Por fim, a MF de cada sistema foi determinada por meio do produto entre o peso médio e a densidade das plantas.

Já para produtividade de matéria seca (MS), um cladódio representativo de cada ordem foi selecionado, pesado, fracionado, acondicionado em sacos de papel identificados e levados a estufa de circulação de ar forçada a uma temperatura de 55°C, até obtenção de peso constante. Em seguida, pela relação entre o peso seco e o peso fresco dos cladódios, obteve-se o teor de massa seca (teorMS). Dessa forma, MS foi obtida por meio do produto entre teorMS e a MF.

2.5 Estoque de água, carbono e nutrientes na planta

O estoque de água na planta ($\text{Água}_{\text{planta}}$, $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) foi obtido pela diferença entre as produtividades de matéria fresca e seca de cada sistema ($\text{Água}_{\text{planta}} = \text{MF} - \text{MS}$). Já para determinação dos estoques de carbono ($\text{CO}_{\text{planta}}$) e nutrientes (N_{planta} , P_{planta} , K_{planta} , $\text{Ca}_{\text{planta}}$, $\text{Mg}_{\text{planta}}$, e $\text{Na}_{\text{planta}}$), o material vegetal seco em estufa mencionado na seção anterior (seção 2.4), foi moído e peneirado com auxílio de um moinho do tipo Willey equipado com uma peneira de 1,0 mm. Em seguida, o material moído foi encaminhado ao laboratório de análises químicas para determinação dos respectivos teores, conforme metodologia da Embrapa (2009).

Os estoques foram estimados partir dos teores de cada elemento e da produtividade de matéria seca de cada sistema produtivo. Conforme a expressão a seguir:

$$X_{\text{planta}} = \text{Teor}_{X_{\text{planta}}} \cdot \text{MS} \quad (1)$$

Em que, X_{planta} é o estoque do referido elemento na planta (kg ha^{-1}); $\text{Teor}_{X_{\text{planta}}}$ é o teor do referido elemento da amostra vegetal (kg kg^{-1}); MS é a produtividade de matéria seca do sistema de produção (kg ha^{-1}).

2.6 Estoque de água, carbono e nutrientes no solo

O estoque de água no solo foi determinado com o auxílio do sensor capacitivo modelo Diviner® 2000 (Sentek Pty Ltd., Austrália) em camadas de 10 cm de profundidade a um limite estabelecido em 70 cm. A partir dos dados de umidade a cada 10 cm, o estoque ou armazenamento de água no solo ($\text{Água}_{\text{Solo}_{0-70\text{cm}}}$) foi estimado conforme a expressão a seguir:

$$\text{Água}_{\text{Solo}_{0-70\text{cm}}} = \sum \theta_{0-70\text{cm}} * \Delta h \quad (2)$$

Onde, $\theta_{0-70\text{cm}}$ representa a umidade de água no solo na camada 0-70cm ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e Δh é a profundidade total da camada do solo em mm.

Quanto aos estoques de carbono e nutrientes no solo, com auxílio de um trado holandês, amostras foram coletadas no início e ao final de cada ciclo experimental nas camadas de 0–20 cm e 20–40 cm de profundidade. As amostras foram armazenadas em sacos plásticos, identificados e, em seguida, enviadas ao laboratório de análises químicas

para determinação das propriedades físico-hídricas (densidade do solo [$D_{s_{solo_0-20/20-40}}$], densidade da partícula [$D_{p_{solo_0-20/20-40}}$], porosidade total [$P_{t_{solo_0-20/20-40}}$] e textura [$Areia_{solo_0-20/20-40}$, $Silte_{solo_0-20/20-40}$, $Argila_{solo_0-20/20-40}$] e teores de Carbono Orgânico do Solo (CO_{solo}) e nutrientes ($P_{solo_0-20/20-40}$; $K_{solo_0-20/20-40}$; $Ca_{solo_0-20/20-40}$; $Mg_{solo_0-20/20-40}$; $Na_{solo_0-20/20-40}$). Os estoques foram determinados a partir dos teores de cada amostra, conforme a mostrado na expressão a seguir (3):

$$X_{solo_{zi-zf}} = \frac{(Teor_{X_{solo_{zi-zf}}} \cdot D_s \cdot h)}{10} \quad (3)$$

Em que, X_{solo} é o estoque do elemento x presente na camada de solo ($Mg\ ha^{-1}$); z_i é o limite inicial da camada (cm); z_f é o limite final da camada (cm); $Teor_x$ é o teor do elemento x para a camada amostrada ($g\ kg^{-1}$); D_s é a densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$); e h é a profundidade da camada de solo analisada (0,20 m).

Os teores até aqui citados foram determinados conforme a metodologia da Embrapa (2009) e estão presentes na Tabela 2:

Tabela 2. Métodos a serem utilizados na determinação dos teores de cada elementos.

Fração	Elementos	Método
Planta	N	Método Kjeldahl
	P, K, Ca, Mg e Na	Espectrometria de emissão atômica por Plasma (Digestão Nitro-perclórica)
	CO	Método da Mufla
Solo	P, K e Na	Espectrometria de emissão atômica de Plasma (Mehlich-1)
	Ca e Mg	Espectrometria de emissão atômica de plasma (Cloreto de Amônia - NH_4Cl)
	CO	Walkley Black (Via úmida)

2.7 Procedimentos estatísticos

Para efeito de comparação dos sistemas, os dados foram submetidos a estatística descritiva (Boxplot - média, mediana e dispersão), teste de normalidade ($p < 0,05$), homoscedasticidade ($p < 0,05$), análise de variância (ANOVA, $p < 0,05$) e teste de comparação de média conforme Fisher a 5% de probabilidade. Os sistemas foram ranqueados conforme os maiores valores médios dentro de cada variável (mapa de calor) e geral (maior número de médias superiores). Por último, por meio da análise de componentes principais, determinou-se os grupos de variáveis (componentes) de maior relação. Para organização, tabulação, estatística e saídas gráficas utilizou-se os softwares Microsoft excel, RStudio (R Core Team, 2018) e SigmaPlot (Versão 14.0).

3. RESULTADOS

3.1 Caracterização microclimática e manejo hídrico

A caracterização microclimática e o manejo hídrico dos sistemas de cultivo são expressos na figura 2. De imediato, nota-se, durante os três ciclos de cultivo, que as variáveis climáticas apresentaram comportamento padronizado com relação à média da região. Para temperatura, os valores oscilaram entre 20,5°C e 31,1°C, com maiores intensidades durante o verão (novembro a janeiro). Neste período, também são observadas magnitudes referentes a radiação solar global, que apresentou média em torno de 20,3 MJ m² dia⁻¹. Inversamente proporcional a essas variáveis, a umidade relativa do ar média é superior entre maio e julho (89% - inverno). Logo, em cultivos agrícolas, o monitoramento dessas variáveis é de extrema importância visto que a adoção de estratégias de manejo é altamente dependente de seus desempenhos. Exemplo disso é a influência da dinâmica da evapotranspiração de referência (ET₀) e da precipitação pluviométrica (Precip.) sobre a lâmina de irrigação aplicada (L_{Iacum.}) em cada um dos ciclos produtivos. Durante o ciclo 1, por exemplo, a ET₀ total foi de 2699,2 mm, o que resultou em lâminas acumuladas de 346,5 mm, 736,3 mm e 1129,6 mm para 40%ET_c, 80%ET_c e 120%ET_c, respectivamente. Já os ciclos 2 e 3 apresentaram demanda atmosférica em torno de 2557,2 mm e 3367,5 mm. Ainda nesses ciclos (2 e 3), embora tenham apresentado uma menor duração, observou-se os maiores índices de precipitação (1701,4 mm e 1638,0 mm) quando comparado ao ciclo 1 (1005,0 mm). Logo, cabe ressaltar que o ciclo 2 apresentou precipitações mais concentradas, enquanto o ciclo 3 mostrou a melhor distribuição temporal. Isso, por sua vez, reflete na reposição hídrica por

meio da irrigação, onde os sistemas submetidos a 120%ETc receberam 728,3 mm e 434,7 mm, 35,5% e 61,5% inferior ao ciclo 1.

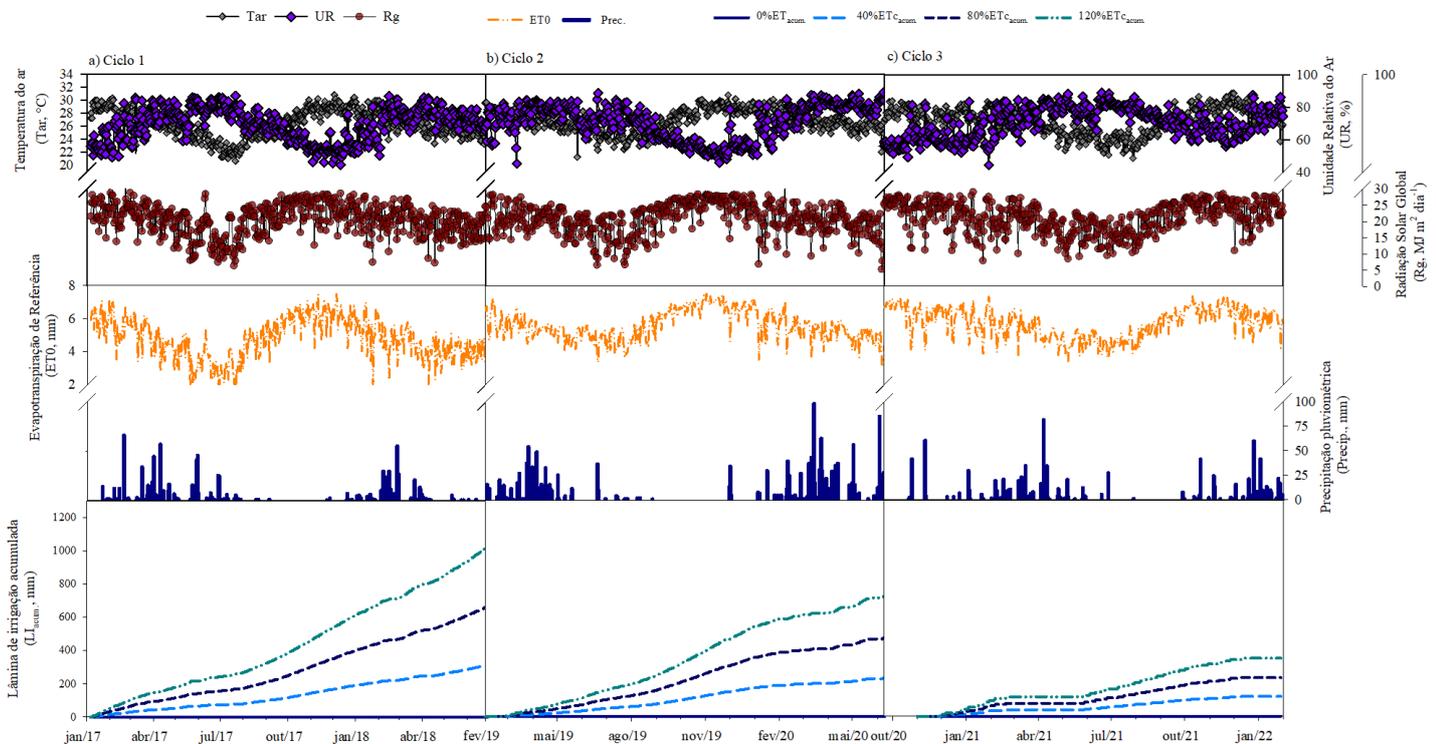


Figura 2. Caracterização microclimática e manejo hídrico de três ciclos produtivos de palma forrageira submetida a diferentes níveis de reposição hídrica em ambiente semiárido.

3.2 Produtividades e estoques de água, carbono e nutrientes na planta

3.2.1 Produtividades de matéria fresca e seca

A figura 3 representa a dispersão dos dados de produtividades de matéria fresca (MF) e seca (MS) durante três ciclos (C1, C2 e C3) de palma forrageira sob diferentes lâminas de irrigação. Em análise, independentemente do nível de reposição hídrica, sistemas com a presença do clone OEM se destacaram com as maiores produtividades médias para os três ciclos (MF: 638,3 Mg ha⁻¹; 321,7 Mg ha⁻¹ e 305,7 Mg ha⁻¹ / MS: 13,5 Mg ha⁻¹; 28,4 Mg ha⁻¹ e 22,6 Mg ha⁻¹). Por sua vez, semelhanças são vistas entre os clones IPA e MIL, que não diferiram entre si ($p > 0,05$). O ciclo 1 apresentou os melhores resultados de MF quando comparado com os ciclos 2 e 3 (figura 3a). Entretanto, para MS (figura 3b), nota-se um maior equilíbrio. Logo vê-se que a variabilidade dos resultados entre os ciclos pode ser atribuída a duração do ciclo (~531 dias) e ao volume de água aplicado via irrigação (Figura 2), sendo que ambos contribuem para o maior

desenvolvimento e absorção de água pela planta. Já quanto aos níveis de reposição hídrica (lâminas), independente do ciclo, é possível observar uma elevada variabilidade dentro de cada clone, o que de fato reforça o potencial produtivo da espécie mesmo em condições de reposição hídrica limitante. Além disso, a distribuição das chuvas pode minimizar o efeito das lâminas aplicadas, visto que a palma forrageira é altamente eficiente na utilização dos recursos naturais.

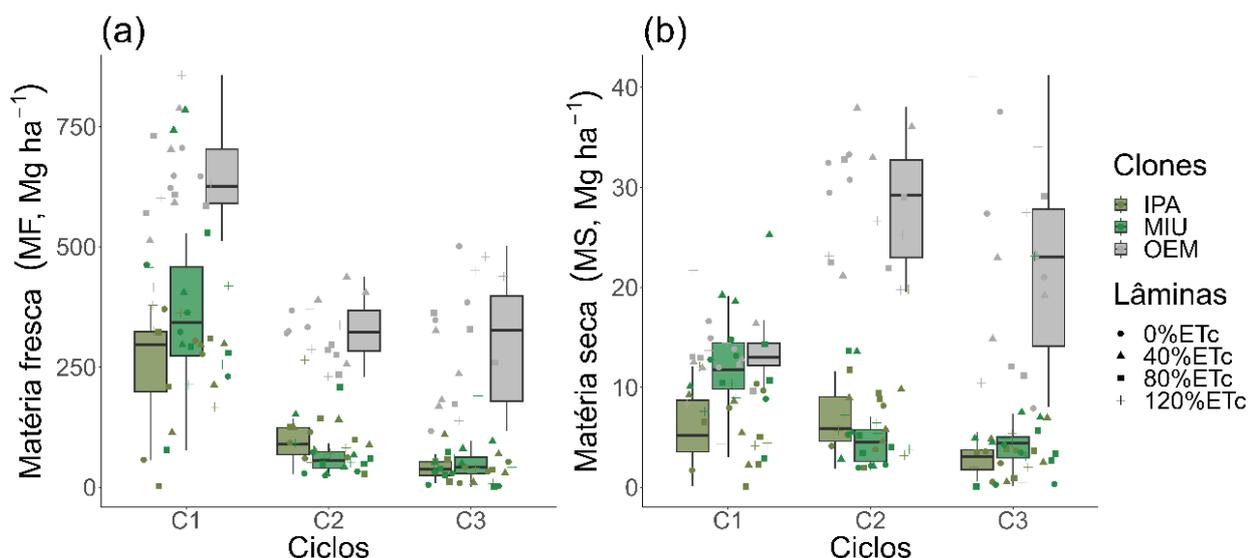


Figura 3. Análise de dispersão dos dados de produtividade de matéria fresca (MF) e seca (MS) durante três ciclos produtivos de palma forrageira (IPA; Miúda e Orelha de Elefante Mexicana) submetidas a diferentes níveis de reposição hídrica (0%; 40%; 80% e 120% da evapotranspiração da cultura) em ambiente semiárido.

Na tabela 3, o teste de Fisher para os valores médios de produtividade (MF e MS) comprova a superioridade produtiva do clone OEM sobre os clones IPA e MIU ($p < 0,05$). Em termos percentuais, quando comparados com MIU-40% (arranjo de melhor desempenho do clone), os sistemas com OEM apresentam incremento de 69-90% (~ 160 - 210 Mg ha^{-1}) de MF e 90-129% (~ 9 - 13 Mg ha^{-1}) de MS. Esses resultados são ainda mais expressivos quando comparados com IPA-120%. (MF: 158-191% [~ 240 - 291 Mg ha^{-1}]; e MS: 228-296% [~ 13 - 17 Mg ha^{-1}]). Observa-se ainda que os níveis de reposição hídrica não afetaram a produtividade dos clones ($p > 0,05$), o que implica dizer que durante o período experimental, o volume e a distribuição temporal da precipitação pluviométrica foram suficientes para o sucesso produtivo da palma forrageira. Entretanto, para evitar conclusões equivocadas, cabe ressaltar que esse resultado se aplica ao período vigente, e

que em regiões semiáridas, os eventos de chuva, em sua maioria, não apresentam distribuição padronizada, o que poderá inviabilizar a maioria dos cultivos.

Tabela 3. Teste de Fisher para produtividade média de matéria fresca (a) e seca (b) de três ciclos de clones de palma forrageira (Ipa Sertânea - IPA, Miúda - MIU, Orelha de elefante Mexicana - OEM) submetidas a diferentes níveis de reposição hídrica (0%; 40%; 80%; e 120% ETc) em ambiente semiárido. Valores médios ordenados dos maiores para os menores em escala de cores na sequência: verde escuro, verde claro, amarelo, laranja e vermelho.

Produtividade	IPA-0%	IPA-40%	IPA-80%	IPA-120%	MIU-0%	MIU-40%	MIU-80%	MIU-120%	OEM-0%	OEM-40%	OEM-80%	OEM-120%
MF (Mg ha ⁻¹)	122,791 b	130,500 b	116,493 b	152,010 b	133,813 b	232,759 b	139,970 b	162,698 b	443,159 a	416,114 a	392,499 a	436,261 a
MS (Mg ha ⁻¹)	5,121 b	5,801 b	4,770 b	5,826 b	5,779 b	10,060 b	6,385 b	8,172 b	23,094 a	21,817 a	19,101 a	22,123 a

3.2.2 Estoques de água, carbono e nutrientes na planta

A variabilidade dos estoques de água (a), carbono (b) e nutrientes (c-h) dos clones de palma forrageira são expostos na figura 4. Devido à alta correlação com a MF, o estoque de água na planta (Figura 4a) apresentou comportamento semelhante (Figura 3a), sendo visto no C1 os valores médios potenciais de cada clone. Da mesma forma, na Tabela 4, o clone OEM se destaca dos demais ($p < 0,05$) com média total variando entre 420 m³ ha⁻¹ (OEM-0%) e 373 m³ ha⁻¹ (OEM-80%). Além disso, não se verificou diferenças entre sistemas dentro dos clones ($p > 0,05$), o que confirma a ausência do efeito das lâminas de reposição hídrica. Quanto aos clones do gênero *Nopalea* sp., foi visto ainda que MIU e IPA não diferem entre si ($p > 0,05$), com potências de armazenamento de água em torno de 222,6 m³ ha⁻¹ e 146,1 m³ ha⁻¹, respectivamente.

Já para os estoques de carbono (Figura 3b) e nutrientes (Figura 3c-h) nos tecidos vegetais, o comportamento seguiu o padrão da MS, com superioridade nos ciclos 2 e 3 e melhores resultados envolvendo a palma forrageira OEM ($p < 0,05$). Ao considerarmos o sistema que apresenta a maior média potencial dentro de cada clone, é possível observar que o sistema OEM-0% é capaz de estocar aproximadamente 133% (5,313 Mg ha⁻¹ de CO) e 315 % (7,057 Mg ha⁻¹ de CO) de carbono a mais que os sistemas MIU-40% e IPA-120%, respectivamente (Tabela 4). Esses resultados enaltecem a eficiência do clone em sequestrar o carbono atmosférico mesmo em condições hídricas deficitárias.

Para Nitrogênio (N), os estoques foram maiores quando o clone OEM foi submetido a ausência (131,6 kg ha⁻¹ – OEM-0%) ou a menor reposição hídrica (109,1 kg ha⁻¹ – OEM-40%). O mesmo ocorre para o fósforo (P). Já para o potássio (K) e o cálcio (Ca), nota-se que independente do clone ou da lâmina de irrigação aplicada, esses elementos são extraídos em maiores quantidades quando comparados aos demais. Além

disso, observa-se que sistemas submetidos a prática da reposição hídrica apresentaram um maior acúmulo de Magnésio (Mg) e Sódio (Na).

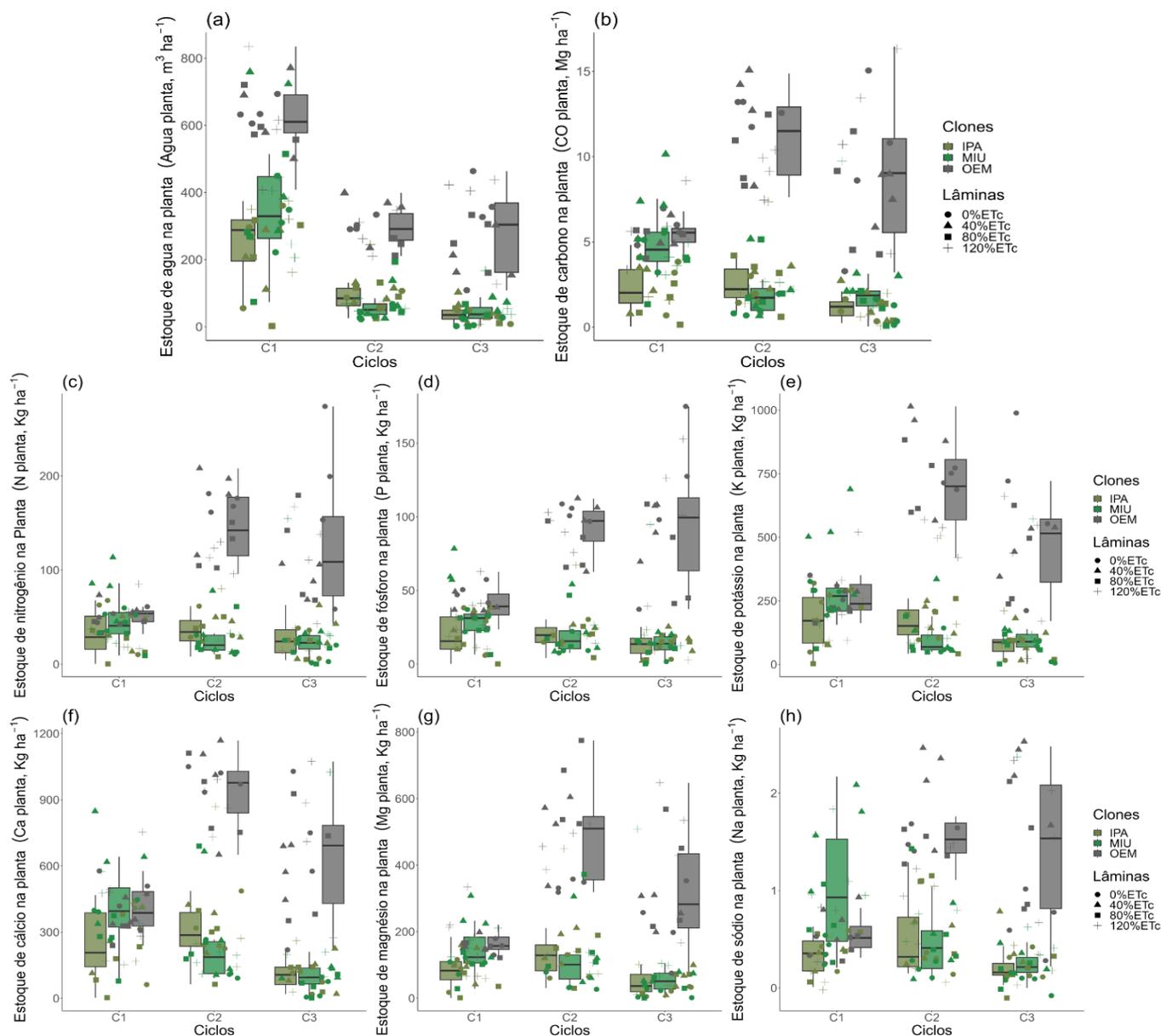


Figura 4. Estoques de água (a), carbono (b) e nutrientes (c-h) em clones de palma forrageira (Ipa Sertânea - IPA, Miúda - MIU, Orelha de elefante Mexicana - OEM) submetidas a diferentes níveis de reposição hídrica (0%; 40%; 80%; e 120% ETC) em ambiente semiárido.

Tabela 4. Teste de Fisher para os estoques de água, carbono e nutrientes nas plantas de três ciclos de palma forrageira (Ipa Sertânea - IPA, Miúda - MIU, Orelha de elefante Mexicana - OEM) submetidas a diferentes níveis de reposição hídrica (0%; 40%; 80%; e 120% ETC) em ambiente semiárido. Valores médios ordenados dos maiores para os menores em escala de cores na sequência: verde escuro, verde claro, amarelo, laranja e vermelho.

Água/Carbono	IPA-0%	IPA-40%	IPA-80%	IPA-120%	MIU-0%	MIU-40%	MIU-80%	MIU-120%	OEM-0%	OEM-40%	OEM-80%	OEM-120%
ÁGUA _{planta} ** (Mg ha ⁻¹)	117,670 b	124,698 b	111,723 b	146,184 b	128,034 b	222,699 b	133,585 b	154,527 b	420,064 a	394,297 a	373,398 a	414,138 a
CO _{planta} ** (Mg ha ⁻¹)	2,024 bc	2,224 bc	1,825 c	2,243 bc	2,250 bc	3,987 b	2,476 bc	3,300 bc	9,300 a	8,604 a	7,604 a	8,758 a
Nutrientes	IPA-0%	IPA-40%	IPA-80%	IPA-120%	MIU-0%	MIU-40%	MIU-80%	MIU-120%	OEM-0%	OEM-40%	OEM-80%	OEM-120%
N _{planta} ** (kg ha ⁻¹)	38,132 c	35,294 c	24,476 c	26,359 c	26,489 c	48,124 c	24,497 c	38,377 c	131,671 a	109,153 ab	93,461 b	95,742 b

P_{planta} ** (kg ha ⁻¹)	20,129 cd	20,062 cd	13,031 d	18,758 cd	16,780 cd	32,542 c	17,374 cd	27,470 cd	87,164 a	76,168 ab	59,957 b	79,430 ab
K_{planta} ** (kg ha ⁻¹)	143,914 b	160,990 b	124,112 b	151,550 b	131,954 b	251,849 b	116,869 b	171,372 b	550,127 a	517,618 a	442,630 a	435,599 a
Ca_{planta} ** (kg ha ⁻¹)	230,578 b	246,752 b	169,342 b	248,000 b	189,274 b	339,658 b	213,885 b	337,209 b	711,051 a	653,026 a	601,640 a	707,032 a
Mg_{planta} ** (kg ha ⁻¹)	64,067 de	106,969 de	79,872 de	113,061 de	53,193 e	139,989 cde	101,709 de	156,873 cd	237,861 bc	312,876 ab	383,506 a	377,722 a
Na_{planta} ** (kg ha ⁻¹)	0,264 f	0,378 ef	0,446 ef	0,293 f	0,211 f	0,764 cde	0,527 def	0,943 bc	0,895 bcd	1,648 a	1,081 bc	1,177 b

3.2 Estoques de água, carbono e nutrientes no solo

Na Figura 5 é verificada a dinâmica do estoque de água no solo durante três ciclos produtivos de palma forrageira submetida a diferentes níveis de reposição hídrica. Logo, observa-se que o volume de água armazenado no solo respondeu positivamente a lâmina de água aplicada em cada ciclo (Figura 2). Reposições hídricas mais acentuadas (80%ETc e 120%ETc) promoveram os maiores estoques durante a época seca (junho e novembro), entretanto, na ocorrência de eventos de precipitação esse efeito é reduzido, o que implicou na d. Nota-se ainda que os clones apresentaram semelhança nos estoques de água no solo dentro de cada ciclo produtivo, com leve destaque para OEM, que em termos potenciais atingiu um armazenamento próximo a 180 mm.

Entender, essa dinâmica permite ao produtor ajustar o manejo de água da cultura conforme sua realidade. Exemplo disso é a redução da umidade do solo (Figura 4a-c) em respostas a redução da lâmina de água aplicada dentro de cada ciclo (Figura 2), que, no entanto, provavelmente não surtiu efeito expressivos na produtividade da cultura (Tabela 3) devido os eventos de precipitação.

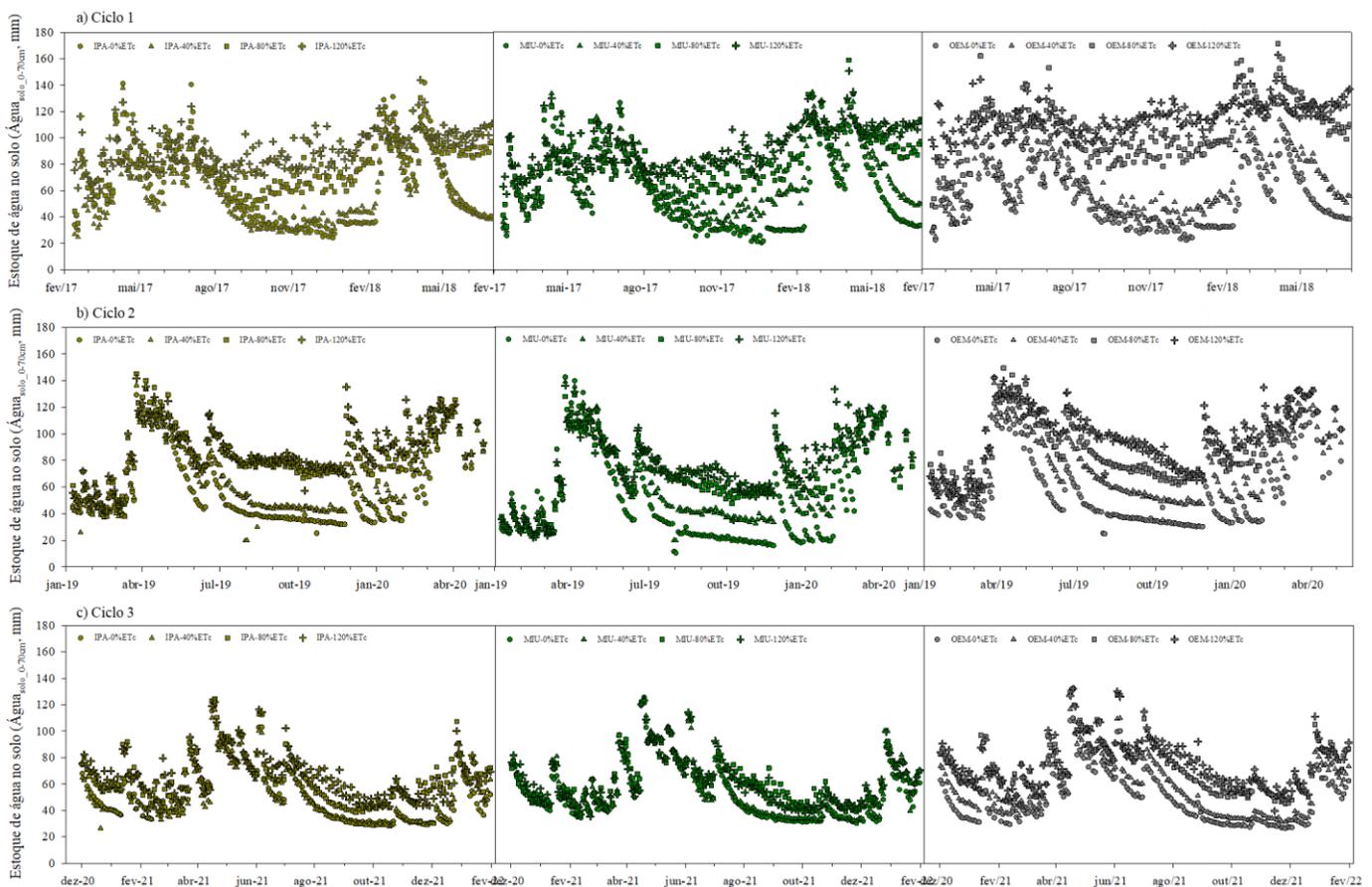


Figura 5. Efeito dos níveis de reposição hídrica (0%; 40%; 80%; e 120% da evapotranspiração da cultura) na dinâmica dos estoques de água no solo de três ciclos (a; b; e c) de palma forrageira (IPA, Miúda e Orelha de elefante mexicana) cultivados em ambiente semiárido.

A exploração da dinâmica de água no solo (Figura 4) fundamenta os resultados obtidos pelo teste de média (Fisher, $p < 0,05$) dos estoques de água, carbono e nutrientes (Tabela 5), que, diferentemente dos encontrados no componente planta, no solo, esses valores apresentaram variabilidade acentuada. O armazenamento de água no solo ($\text{Água}_{\text{solo}_0-70\text{cm}}$), por exemplo, apresentou as maiores médias entre os sistemas com 0%-ETc (87,0 mm) e 120%-ETc (93,1 mm) para o clone OEM ($p < 0,05$). Porém esses sistemas não diferiram de IPA-0% (79,7 mm) e MIU-0% (78,3 mm). Logo, os eventos de precipitação podem ter interferido no comportamento dessa variável. Quanto ao CO_{solo} , os sistemas IPA-120% e IPA-0% não diferiram entre si e apresentaram médias em torno de $22,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ e $18,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ para a camada 0-20 cm, enquanto OEM-0% e MIU-0% estocaram em torno de $15,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ e $14,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ para a profundidade 20-40 cm. Assim, é possível notar que o estoque de CO em cultivos de palma forrageira é maior em camadas superficiais e em situações de restrição hídrica. Além disso, as condições iniciais do solo (tabela 1), nota-se que independentemente do sistema houve um aumento exponencial

do carbono orgânico no solo, o que implica dizer que o cultivo da palma forrageira se comporta como sumidouro de carbono em áreas degradadas.

Já para os nutrientes no solo, com exceção do clone IPA, a reposição hídrica igual ou superior a 80% da ETc reduziu os estoques de P e K nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm ($p < 0,05$). Em contrapartida, na maioria dos casos, os estoques de Ca_{solo} , Mg_{solo} , Na_{solo} e $S.B._{solo}$ são influenciados positivamente por essas mesmas lâminas. Neste caso, por se tratar de um manejo com água salobra, o manejo de irrigação potencializou os estoques desses elementos nessas camadas.

Tabela 5. Teste de Fisher para os estoques de água, carbono e nutrientes no solo de sistemas de Palma Forrageira submetidas a diferentes níveis de reposição hídrica no semiárido brasileiro. Valores médios ordenados dos maiores para os menores em escala de cores na sequência: verde escuro, verde claro, amarelo, laranja e vermelho.

Água/Carbono	IPA-0%	IPA-40%	IPA-80%	IPA-120%	MIU-0%	MIU-40%	MIU-80%	MIU-120%	OEM-0%	OEM-40%	OEM-80%	OEM-120%
Água _{solo_0-70cm} (mm)	79,726 abc	55,857 bc	57,433 bc	51,753 c	78,34 abc	63,738 bc	64,729 bc	56,459 bc	87,029 a	74,28 bc	73,665 bc	93,174 a
CO _{solo_0-20cm} **	18,077 ab	14,892 bc	13,230 c	22,430 a	14,806 bc	14,817 bc	15,768 bc	14,708 bc	16,033 bc	16,032 bc	16,502 bc	15,354 bc
CO _{solo_20-40cm} **	11,632 bcde	13,280 abc	9,862 e	12,153 bcde	14,377 ab	11,010 cde	9,657 e	10,755 cde	15,941 a	10,328 de	12,692 bcd	12,316 bcde
Nutrientes	IPA-0%	IPA-40%	IPA-80%	IPA-120%	MIU-0%	MIU-40%	MIU-80%	MIU-120%	OEM-0%	OEM-40%	OEM-80%	OEM-120%
P _{solo_0-20cm} ** (Mg ha ⁻¹)	0,631 abc	0,608 abcd	0,669 a	0,483 fg	0,557 cdef	0,584 bcde	0,536 defg	0,502 efg	0,653 ab	0,634 abc	0,462 g	0,560 cdef
P _{solo_20-40cm} ** (Mg ha ⁻¹)	0,571 ab	0,477 bc	0,565 ab	0,524 abc	0,618 a	0,626 a	0,563 ab	0,421 c	0,568 ab	0,581 ab	0,461 bc	0,479 bc
K _{solo_0-20cm} ** (Mg ha ⁻¹)	0,248 a	0,174 c	0,179 bc	0,161 cd	0,163 cd	0,128 de	0,101 e	0,173 c	0,193 bc	0,216 ab	0,087 e	0,126 de
K _{solo_20-40cm} ** (Mg ha ⁻¹)	0,217 a	0,206 a	0,125 c	0,119 c	0,177 ab	0,132 c	0,130 c	0,125 c	0,189 a	0,142 bc	0,120 c	0,120 c
Ca _{solo_0-20cm} ** (Mg ha ⁻¹)	1,938 ab	1,875 ab	2,111 a	1,802 ab	2,098 a	2,044 a	2,267 a	1,964 ab	1,746 ab	1,472 b	2,083 a	2,149 a
Ca _{solo_20-40cm} ** (Mg ha ⁻¹)	2,047 ab	1,801 b	1,940 ab	1,838 ab	2,475 a	1,899 ab	1,872 ab	1,870 ab	2,196 ab	2,210 ab	2,280 ab	2,180 ab
Mg _{solo_0-20cm} ** (Mg ha ⁻¹)	0,293 c	0,791 a	0,726 ab	0,683 ab	0,295 c	0,661 ab	0,790 a	0,754 ab	0,153 d	0,370 c	0,642 b	0,711 ab
Mg _{solo_20-40cm} ** (Mg ha ⁻¹)	0,456 d	0,678 bc	0,861 ab	0,706 b	0,445 d	0,744 ab	0,855 ab	0,763 ab	0,398 d	0,488 cd	0,848 ab	0,928 a
Na _{solo_0-20cm} ** (Mg ha ⁻¹)	0,010 b	0,023 b	0,020 b	0,019 b	0,004 b	0,021 b	0,021 b	0,015 b	0,003 b	0,059 a	0,027 b	0,027 b
Na _{solo_20-40cm} ** (Mg ha ⁻¹)	0,013 bcd	0,030 abcd	0,046 ab	0,030 abcd	0,002 d	0,027 abcd	0,048 ab	0,020 abcd	0,004 cd	0,031 abcd	0,054 a	0,039 abc
S.B. _{solo_0-20cm} ** (Mg ha ⁻¹)	12,780 cd	16,425 ab	17,068 a	15,115 abc	13,337 bcd	16,077 abc	18,179 a	16,528 ab	10,487 d	11,207 d	16,035 abc	17,030 a
S.B. _{solo_20-40cm} ns (Mg ha ⁻¹)	14,583	15,235	17,300	15,430	16,500	16,076	16,931	16,025	14,752	15,560	18,912	19,010
Ranking	IPA-0%	IPA-40%	IPA-80%	IPA-120%	MIU-0%	MIU-40%	MIU-80%	MIU-120%	OEM-0%	OEM-40%	OEM-80%	OEM-120%
Geral	11	8	9	10	12	5	7	6	4	2	3	1

3.3 Correlação entre o manejo de irrigação, as características físico-hídricas do solo e os estoques de água, carbono e nutrientes dos sistemas de cultivo com palma forrageira

A Figura 4 apresenta a análise de componentes principais para o manejo de irrigação, características físico-hídricas, produtividades e estoques de água, carbono e nutrientes de sistemas de cultivos de palma forrageira submetidas a diferentes níveis de

reposição hídrica em ambiente semiárido. Para este estudo foi verificado que a correlação entre as variáveis é explicada de forma precisa apenas a partir da PC4 (76,2%). O detalhamento desta análise está descrito na Tabela Suplementar 1. Logo, a componente principal 1 (PC1) explicou a variação de 30,40% dos dados sendo composto pelos sistemas OEM-0% e OEM-40% que possuem alta correlação positiva com o estoque de N na planta, os estoques de $Ca_{Solo_20-40cm}$ e $COT_{Solo_20-40cm}$ no solo e a $Areias_{Solo_20-40cm}$, DS_{Solo_0-20cm} e $DS_{Solo_20-40cm}$. Enquanto mostrou-se inversamente proporcional aos sistemas IPA-80% e MIU-80%, aos estoques de Ca_{Solo_0-20cm} , Mg_{Solo_0-20cm} , $Mg_{Solo_20-40cm}$, $Na_{Solo_20-40cm}$ e $S.B._{Solo_0-20cm}$ no solo e a IR.

Já a componente principal 2 (PC2) explicou 27,82% da variância dos dados, com OEM-120% e OEM-80% responsáveis por proporcionar os maiores valores de MF_{Planta} , MS_{Planta} , P_{Planta} , K_{Planta} , Ca_{Planta} , Mg_{Planta} , Na_{Planta} , CO_{Planta} , $\acute{A}gua_{Planta}$, e Na_{Solo_0-20cm} , $S.B._{Solo_20-40cm}$ e $\acute{A}gua_{Solo_0-70cm}$. Sendo inversos a MIU-0%, IPA-0% e os estoques de K_{Solo} a 0-20 e 20-40 cm de profundidade. Já a PC3 (11,02%) é formada por IPA-40% e as variáveis P_{Solo_0-20cm} , $Areias_{Solo_0-20cm}$, $PT_{Solo_20-40cm}$ e $siltes_{Solo_0-20cm}$. MIU-120% integra a PC4 (6,96%) e está relacionada aos menores valores de $Dp_{Solo_20-40cm}$, $argilas_{Solo_0-20cm}$ e $P_{Solo_20-40cm}$.

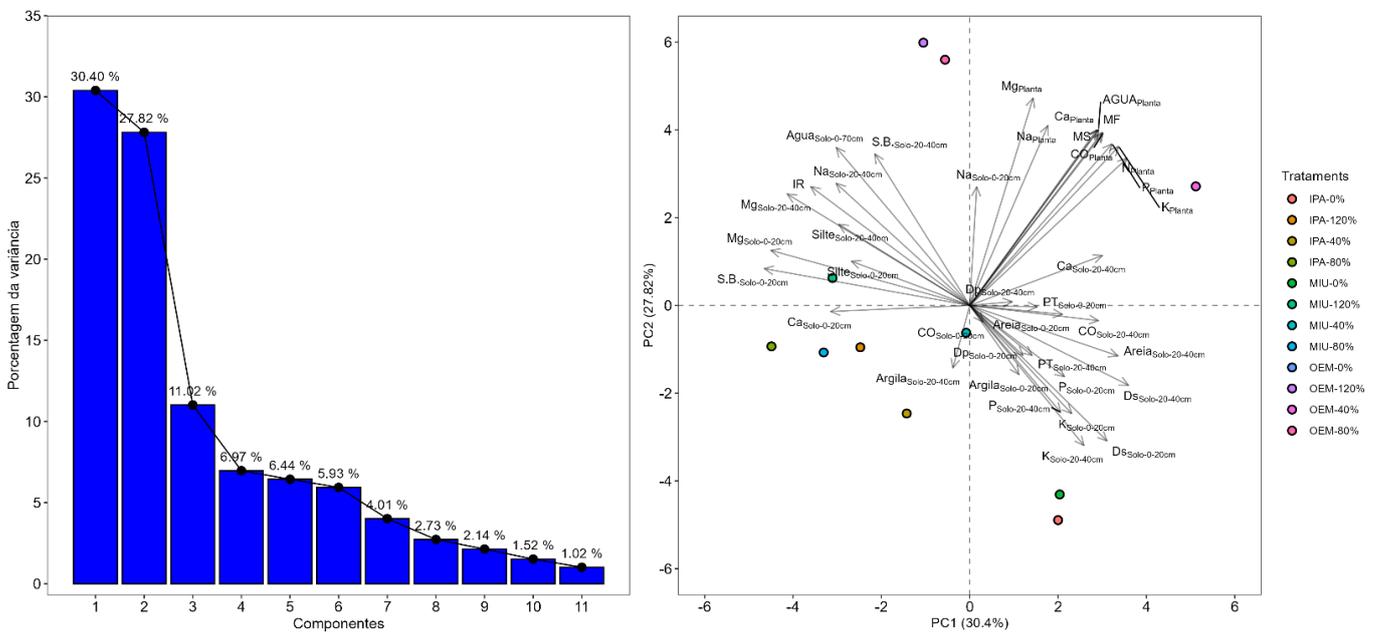


Figura 6. Análise de componentes principais para o manejo de irrigação, características físico-hídricas, produtividades e estoques de água, carbono e nutrientes de sistemas de cultivos de palma forrageira submetidas a diferentes níveis de reposição hídrica em ambiente semiárido. Símbolos em azul integram a PC1; símbolos em vermelho integram a PC2; símbolos em verde integram a PC3; símbolos em amarelo integram a PC4; símbolos em cinza integram a PC5+.

4. DISCUSSÃO

4.1 Produtividade e estoques de água, carbono e nutrientes na planta

O sucesso produtivo do clone OEM, como descrito na Figura 3, está associado a características intrínsecas ao gênero *Opuntia* spp., que por sua vez, apresentam maior vigor e menor mortalidade que os clones do gênero *Nopalea* spp. (JARDIM et al., 2021). Além disso, o clone OEM possui um maior índice de área do cladódio, o que resulta em uma maior eficiência fotossintética promovendo o acúmulo de matéria seca (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021). Essas características se refletem nos estoques de água, carbono e nutrientes pelos tecidos vegetais (Figura 4 e Tabela 4). Estudos mostram que a palma forrageira possui apenas 10% de matéria seca, sendo 90% de sua produtividade atribuída aos solutos armazenados na planta. Araújo Júnior et al. (2023) estudaram a eficiência do uso da água em sistemas com palma forrageira OEM e verificaram que quando submetida a reposição hídrica de 120% da ETc, este clone é capaz de armazenar cerca de 8,73 litros de água por planta (densidade 31.250 plantas ha⁻¹), o equivalente a ~273 m³ ha⁻¹. Esses valores são inferiores aos encontrados no presente estudo (~414 m³ ha⁻¹), porém vale ressaltar a diferença na densidade de plantas (50.000 plantas ha⁻¹). Essa informação passa a ser relevante pois a palma forrageira se torna uma excelente estratégia do ponto de vista hídrico, a fim de reduzir o consumo de água por parte dos animais. Além disso, nota-se que, mesmo ocorrendo períodos distintos de disponibilidade de água no solo (Figura 5), essa espécie mantém seu potencial em estocar água independente da lâmina de água aplicada. Porém, vale ressaltar, que durante os ciclos experimentais (Figura 2) os volumes de entrada de água no sistema (Precipitação + irrigação) excederam a média histórica da precipitação da região (624 mm ano⁻¹).

Devido sua alta eficiência no uso da água, a palma forrageira também se destaca quanto ao uso eficiente do carbono (Figura 4 e Tabela 4). Segundo Jardim et al. (2023), independente das condições climáticas ou época do ano (i.e seca ou chuvosa), a palma forrageira apresenta sequestro líquido do carbono atmosférico, tornando-a uma excelente alternativa de sumidouro para áreas degradadas. Logo, isso implica dizer que mesmo em condições de baixa disponibilidade hídrica, a palma forrageira continua a acumular carbono em seus tecidos, justificando ausência do efeito dos níveis de reposição de água.

Entretanto, isso só é possível devido a eficiência do uso dos nutrientes (JARDIM et al., 2023).

Os nutrientes são responsáveis por ajustar o potencial osmótico das células, que por sua vez controla as trocas gasosas, a utilização dos recursos e o desenvolvimento das plantas (MA et al., 2022; SANTOS et al., 2024b). Porém, o potencial de extração de nutrientes depende do clone, das condições de manejo e da produtividade de matéria seca (DONATO et al., 2014; FERRAZ et al., 2020; MOREIRA et al., 2020). Ferraz et al. (2020) analisaram o potencial de extração de clones de palma forrageira submetidos a diferentes lâminas de irrigação e verificaram que o clone OEM obteve os maiores acúmulos de biomassa e nutrientes, quando comparados ao clone MIU. Santos et al., (2024b) avaliaram a extração dos nutrientes pelo clone OEM e verificaram a seguinte ordem de elementos Ca, K, Mg, N, P e Na. Essas informações corroboram com os resultados deste estudo e explicam a eficiência na absorção e armazenamento de água pela cultura, pois a abundância de potássio permite que a espécie ajuste seu pH e regule a abertura estomática minimizando o fluxo de perda de água para a atmosfera (SPERLING et al., 2024).

4.2 Estoques de água, carbono e nutrientes no solo

Como visto na Tabela 3 (mapa de calor), os componentes do solo apresentaram comportamento dinâmico e acentuado. Diferentemente do descrito na literatura, observa-se que a lâmina de irrigação não apresentou diferença significativa no estoque de água no solo, tendo em vista que dentro do clone OEM, as maiores umidade são vistas em lâminas com 120%ETc e 0%ETc, não havendo diferença entre si. Isso pode ocorrer devido a eficiência do uso da água por parte da espécie, além de eventos respiração e evaporação da água presente nos solos (AVILA et al., 2023; SANTOS et al., 2024b). Somado a isso, a dinâmica do estoque de água (Figura 4) é influenciada pelos eventos de precipitação ocorridos durante os três ciclos produtivos (Figura 2), que por sua vez apresentaram volumes superiores à média regional. Logo, a uniformidade de distribuição ao longo do ciclo 3, bem como a concentração dos volumes chuva durante o ciclo 2 promoveram maior umidade e interferiram nas respostas dos clones aos níveis de reposição hídrica.

Já o aumento substancial dos estoques CO_{solo} quando comparada aos valores iniciais (Tabela 1) está intimamente relacionada ao potencial de emissão e distribuição das raízes da cultura no solo, tendo em vista que, como estratégia de sobrevivência a

regiões com déficit hídrico, a palma forrageira induz o crescimento radicular, eleva a densidade de raízes secundárias e expandir sua área de superfície para absorção de água (SANTOS, 2023). Logo, sistemas radiculares contribuem para a formação da matéria orgânica do solo por meio do depósito de compostos recalcitrantes (COELHO et al., 2023). Em contrapartida, esse efeito é reverso a depender das práticas de manejo adotadas no cultivo (JARDIM et al. 2023). No caso de cultivos irrigados, ciclos de umedecimento e secagem, principalmente em regiões com altas temperaturas, intensificam a atividade dos microorganismos responsáveis pela degradação da MO (LI et al., 2022). Dessa forma, além de uma maior utilização de água pelo sistema, esse cenário também promove o efluxo de carbono dos solos, influenciando nos seus estoques (HOU et al., 2024). Essas afirmativas justificam os maiores estoques de carbono no solo serem encontrados em sistemas submetidos a lâminas inferiores, visto que, em regiões semiáridas, durante o período seco, ciclos de umedecimento e secagem ocorrem de forma mais intensa.

Quanto aos estoques de nutrientes no solo, o baixo conteúdo de P_{solo} e K_{solo} em sistemas com reposição hídrica mais acentuada pode estar atrelada ao fato da adsorção e lixiviação desses nutrientes para camadas mais inferiores (ABBOUD et al., 2018; FERRAZ et al., 2020), além disso, cabe ressaltar o potencial de extração da planta (discutido na seção 4.1), visto que a palma forrageira estabelece altos teores desses elementos em seus tecidos (figura 2) (SANTOS et al., 2024b). Já os teores de Ca_{solo} , Mg_{solo} e Na_{solo} são influenciados pela qualidade da água de irrigação, pois sua condutividade elétrica elevada indica a presença desses elementos em grandes quantidades. Fato também ocorrido em estudo desenvolvido por Ferraz et al. (2020).

4.3 Correlação entre o manejo de irrigação, as características físico-hídricas do solo e os estoques de água, carbono e nutrientes e ranqueamento dos sistemas

A análise de componentes principais simplifica e agrupa as variáveis e as condições de manejo, a fim de indicar o potencial que cada sistema possui (Figura 4). Como já discutido anteriormente, os baixos níveis de irrigação favorecem os estoques de carbono no solo, mesmo que em camadas inferiores. Isso porque a ausência ou a aplicação de lâminas de irrigação deficitária minimizam os efeitos da respiração do solo, evitando ciclos de umedecimento e secagem com maiores intensidades (AVILA et al., 2023; DAVIDSON; JANSSENS, 2006; HOU et al., 2024; LI et al., 2022; YOU et al., 2021).

Além disso, a CP1 confirma a entrada de Ca_{solo} , Mg_{solo} e Na_{solo} , por meio do manejo de irrigação, que por sua vez são proporcionais aos sistemas MIU-80%ETc e IPA-80%ETc. Observa-se ainda que a CP2 indica que a exposição do clone OEM aos maiores níveis de reposição hídrica promove as maiores médias para variáveis produtivas (MF, MS) e de estoque ($Aguaplanta$, CO_{planta} , N_{planta} , P_{planta} , K_{planta} , Ca_{planta} , Mg_{planta} e Na_{planta}). Por outro lado, é importante perceber que essas variáveis, principalmente produtivas também apresentam ótima correlação com lâminas de 40% e 0% para o mesmo clone (Figura 3 e Tabela Suplementar 1). Lâminas inferiores também são responsáveis pelo maior estoque de K_{solo} , como indica a relação com os clones MIU-0%ETc e IPA-0%ETc.

O mapa de calor exposto nas figuras 2 e 3 e na Tabela 4, ordena os sistemas conforme o maior número de médias superiores e intermediária. O objetivo é indicar o sistema que apresenta maior equilíbrio, a fim de proporcionar a exploração eficiente e sustentável dos recursos. Neste caso, o clone OEM, ocupa posição de destaque, com lâminas de 120%, 40%, 80% e 0% da ETc, nessa ordem. Observa-se ainda que a prática de irrigação também favorece a sustentabilidade dos sistemas com clones IPA e MIU, porém a escolha do sistema deve obedecer a realidade financeira de cada produtor.

5. CONCLUSÃO

A escolha do clone e da lâmina de irrigação pode potencializar a produtividade e os estoques de água, carbono e nutrientes no semiárido brasileiro. Diante disso, verificou-se que:

- Sistemas com o clone OEM potencializam os componentes da planta (MF, MS, $Aguaplanta$, CO_{planta} , N_{planta} , P_{planta} , K_{planta} , Ca_{planta} , Mg_{planta} , Na_{planta}). Enquanto os clones IPA e MIU não diferem entre si.
- A MF e a MS não foram influenciadas pelos níveis de reposição hídrica, uma vez que os volumes de água provenientes das precipitações pluviométricas foram superiores à média da região em cada ciclo produtivo.
- A palma forrageira eleva o estoque de carbono orgânico no solo independente do clone ou do nível de reposição hídrica, entretanto, níveis de 0%ETc e 40%ETc proporcionam os melhores resultados.
- O manejo de irrigação com água salobra sob níveis de 80%ETc e 120%ETc promove os estoques de Ca_{solo} , Mg_{solo} e Na_{solo} no solo.

- Os sistemas OEM-120%, OEM-40%, OEM-80% e OEM-0%, nessa ordem, apresentam o maior número de médias intermediárias ou superiores para todas as variáveis, podendo ser indicadas como sistemas sustentáveis. Dessa forma, cabe ao produtor estabelecer o sistema que melhor se enquadre a sua realidade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOUD, F. Y. et al. Phosphorus mobility and degree of saturation in oxisol under no-tillage after long-term dairy liquid manure application. **Soil and Tillage Research**, v. 177, p. 45–53, 2018.

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ARAÚJO JÚNIOR, G. N. et al. Use of intercropping and mulch to improve the water and natural resources use efficiencies of forage cactus and millet production in a semiarid region. **Field Crops Research**, v. 304, p. 109171, 2023.

ARAÚJO JÚNIOR, G. N. et al. Phenophases, morphophysiological indices and cutting time in clones of the forage cacti under controlled water regimes in a semiarid environment. **Journal of Arid Environments journal**, v. 190, n. 104510, p. 1–9, 2021.

AVILA, C. C. E. et al. Carbon dynamics as a function of soil moisture following repeated wet-dry cycles in irrigated soils. **Geoderma**, v. 439, p. 116681, 2023.

DAVIDSON, E. A.; JANSSENS, I. A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. **Nature**, v. 440, p. 165–173, 2006.

DONATO, P. E. R. et al. Morfometria e rendimento da palma forrageira 'Gigante' sob diferentes espaçamentos e doses de adubação orgânica. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 9, n. 1, p. 151–158, 2014.

FERRAZ, R. L. S. et al. Estimation of productivity gain by irrigated and fertilized forage palm plants (*Opuntia ficus-indica* (L .) Mill . and *Nopalea cochenillifera* (L .) Salm-Dyck): systematic review and meta-analysis. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 11, p. 1873–1882, 2019.

FERRAZ, R. L. S. et al. Variations in soil water replacement levels promote changes in forage cactus mineral composition and biomass productivity. **Ambiente e água**, v. 15, n. 5, p. e2537, 2020.

HOU, L. et al. Mineral protection explains the elevational variation of temperature sensitivity of soil carbon decomposition in the Eastern Himalaya. **Applied Soil Ecology**, v. 197, p. 105346, 2024.

JARDIM, A. M. R. F. et al. Intercropping forage cactus and sorghum in a semi-arid environment improves biological efficiency and competitive ability through interspecific complementarity. **Journal of Arid Environments**, v. 188, p. 104464, 2021.

JARDIM, A. M. R. F. et al. Sink or carbon source? how the Opuntia cactus agroecosystem interacts in the use of carbon, nutrients and radiation in the Brazilian semi-arid region. **Journal of Hydrology**, v. 625, p. 130121, 2023.

JARECKI, M. K.; LAL, R. Crop Management for Soil Carbon Sequestration. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 22, n. 5, p. 37–41, 2003.

LAL, R. Soil management for carbon sequestration. **South African Journal of Plant and Soil**, v. 38, n. 3, 231–237, 2021.

LI, C. et al. Short-term effects of labile organic C addition on soil microbial response to temperature in a temperate steppe. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 167, p. 108589, 2022.

LUO, Z. et al. Improving soil thickness estimations and its spatial pattern on hillslopes in karst forests along latitudinal gradients. **Geoderma**, v. 441, p. 116749, 2024.

MA, H. et al. Physiological response, phytohormone signaling, biomass production and water use efficiency of the CAM plant Ananas comosus under different water and nitrogen regimes. **Agricultural Water Management**, v. 266, p. 107563, 2022.

MEDEIROS, A. S.; SOARES, A. A. S.; MAIA, S. M. F. Soil carbon stocks and compartments of organic matter under conventional systems in brazilian semi-arid region. **Revista Caatinga**, v. 35, n. 3, p. 697–710, 2022.

MOREIRA, J. M. et al. Nutrients demand of cactus forage. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 2, p. 811–820, 2020.

ONU - Organização das Nações Unidas (2024). **Objetivos do desenvolvimento sustentável**. Disponível em : <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em :01 jul.2024.

QUEIROZ, M. G. et al. Spatial and temporal dynamics of soil moisture for surfaces with a change in land use in the semi-arid region of Brazil. **Catena**, v. 188, p. 104457, 2020.

- QUEIROZ, M. G. et al. Relações hídrico-econômicas da palma forrageira cultivada em ambiente semiárido. **Irriga**, v. Edição esp., p. 141–154, 2016.
- SALVADOR, K. R. S. et al. Intercropping impacts growth in the forage cactus, but complementarity affords greater productivity, competitive ability, biological efficiency and economic return. **Agricultural Systems**, v. 218, p. 103958, 2024.
- SALVADOR, K. R. S. et al. Intensificação de sistemas de produção de palma forrageira por meio de consorciação rotativa com gramíneas, leguminosas e oleaginosas: uma revisão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 04, p. 2322–2343, 2021.
- SANTOS, W. R. et al. Carbon and nutrient dynamics in landscapes under different levels of anthropogenic intervention in the semi-arid region of Brazil. **Ecosystems and Environment**, v. 368, p. 109020, 2024a.
- SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5^a ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018.
- SANTOS, J. P. A. S. (2023) Exigência nutricional, eficiência de utilização de nutrientes e indicadores agrometeorológicos por clones de palma forrageira em diferentes sistemas de manejo no semiárido. **Dissertação (Mestrado)** - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, 137 f., Serra Talhada-PE, 2023.
- SANTOS, J. P. A. S. et al. Morphophysiological responses, water, and nutritional performance of the forage cactus submitted to different doses of nitrogen. **Field Crops Research**, v. 308, p. 109273, 2024b.
- SILVA, T. G. F. et al. Soil water dynamics and evapotranspiration of forage cactus clones under rainfed conditions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 7, p. 515–525, 2015.
- SOUZA, M. S. et al. Forage yield, competition and economic benefit of intercropping cactus and millet with mulch in a semi-arid environment. **African Journal of Range and Forage Science**, v. 40, n. 2, p. 219–230, 2023.
- SPERLING, O et al. Potassium deficiency reduces grapevine transpiration through decreased leaf area and stomatal conductance. **Plant Physiology and Biochemistry**. V. 208, p. 108534, 2024.
- TAIZ, L. et al. **Plant Physiology & Development**. 6th. ed. [s.l.] Oxford University Press, 2017.

WANG, L. et al. Exploring ecological carbon sequestration advantage and economic responses in an ecological security pattern: A nature-based solutions perspective. **Ecological Modelling**, v. 488, p. 110597, 2024.

YOU, M. et al. Priming effect of stable C pool in soil and its temperature sensitivity. **Geoderma**, v. 401, p. 115216, 2021.

7. MATERIAL SUPLEMENTAR

Tabela Suplementar 1. Detalhamento da análise de componentes principais (PCs) de variáveis produtivas, características físicas do solo e estoques de água, carbono e nutrientes na interface solo-planta de sistemas de cultivo com clones de palma forrageira submetidos a diferentes níveis de reposição hídrica.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10	PC11
Autovalor	11,551	10,571	4,188	2,648	2,447	2,255	1,525	1,038	0,812	0,578	0,387
Variabilidade (%)	30,397	27,819	11,021	6,967	6,440	5,935	4,013	2,731	2,138	1,521	1,018
% acumulada	30,397	58,216	69,237	76,204	82,644	88,579	92,592	95,323	97,461	98,982	100,000
Variáveis	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10	PC11
MF	-0,584	0,801	-0,003	0,068	-0,021	-0,060	-0,073	-0,007	-0,021	0,038	0,041
MS	-0,600	0,789	0,030	0,053	-0,029	-0,066	-0,086	0,037	0,003	0,010	0,007
N _{planta}	-0,713	0,671	0,052	0,048	0,003	-0,154	-0,067	-0,007	0,019	-0,079	0,036
P _{planta}	-0,645	0,736	0,077	0,040	-0,005	-0,125	-0,114	0,066	0,001	0,034	0,029
K _{planta}	-0,674	0,725	0,051	0,066	0,011	-0,077	-0,028	-0,049	-0,031	-0,054	0,014
Ca _{planta}	-0,574	0,800	0,058	-0,023	0,027	-0,111	-0,101	0,029	0,023	0,027	0,040
Mg _{planta}	-0,287	0,945	-0,011	-0,031	0,016	-0,013	0,036	-0,056	0,126	0,048	0,004
Na _{planta}	-0,354	0,820	0,292	-0,043	0,031	0,271	0,005	0,118	0,017	-0,163	-0,021
CO _{planta}	-0,604	0,785	0,026	0,044	-0,030	-0,072	-0,092	0,039	0,001	0,001	0,014
Água _{planta}	-0,583	0,801	-0,005	0,069	-0,020	-0,060	-0,072	-0,010	-0,022	0,040	0,043
Água _{solo_0-70cm}	0,605	0,720	-0,189	-0,061	0,070	0,007	0,098	0,171	-0,026	0,165	0,075
IR	0,720	0,542	0,014	-0,136	0,275	-0,051	-0,030	0,225	-0,169	0,086	-0,059
Ds _{solo_0-20cm}	-0,622	-0,618	-0,333	0,156	-0,112	-0,093	0,006	0,118	0,218	-0,046	-0,107
Dp _{solo_0-20cm}	-0,241	-0,228	0,023	-0,544	-0,383	0,604	-0,026	0,210	0,049	0,106	-0,152
PT _{solo_0-20cm}	-0,306	-0,006	0,567	0,013	-0,148	0,676	-0,135	-0,130	-0,146	0,219	0,030
Areia _{solo_0-20cm}	-0,420	-0,041	-0,698	-0,143	0,318	0,346	0,069	0,132	0,223	-0,054	0,137
Silte _{solo_0-20cm}	0,536	0,201	0,610	-0,277	-0,311	-0,265	-0,097	-0,063	-0,164	-0,078	-0,097
Argila _{solo_0-20cm}	-0,223	-0,315	0,178	0,827	-0,017	-0,162	0,053	-0,135	-0,118	0,260	-0,080
Ds _{solo_20-40cm}	-0,719	-0,364	-0,332	0,149	-0,356	0,136	0,070	-0,021	-0,209	-0,151	-0,032
Dp _{solo_20-40cm}	-0,193	0,017	0,449	-0,750	-0,134	-0,083	0,253	-0,195	-0,143	0,042	0,222
PT _{solo_20-40cm}	-0,282	-0,228	0,745	-0,059	0,136	0,187	0,066	-0,267	0,357	0,201	0,115
Areia _{solo_20-40cm}	-0,672	-0,230	-0,269	-0,093	0,264	0,293	-0,418	-0,269	-0,057	-0,094	0,014
Silte _{solo_20-40cm}	0,594	0,370	-0,046	0,038	-0,286	-0,185	0,623	-0,058	0,000	0,006	0,011
Argila _{solo_20-40cm}	0,076	-0,285	0,560	0,093	0,067	-0,171	-0,426	0,583	0,099	0,155	-0,045
P _{solo_0-20cm}	-0,429	-0,325	0,576	0,460	-0,277	-0,220	0,058	0,101	0,005	-0,110	0,128
K _{solo_0-20cm}	-0,462	-0,493	0,491	-0,094	0,187	-0,203	0,361	0,275	0,054	-0,041	0,079
Ca _{solo_0-20cm}	0,630	-0,028	-0,417	0,081	-0,497	-0,002	-0,269	0,049	0,194	0,098	0,231
Mg _{solo_0-20cm}	0,901	0,251	0,171	0,032	0,093	0,078	-0,196	-0,181	0,016	-0,002	-0,094
Na _{solo_0-20cm}	-0,031	0,541	0,432	0,271	0,240	0,481	0,296	-0,048	0,125	-0,007	-0,229
S.B. _{solo_0-20cm}	0,931	0,168	-0,017	0,062	-0,130	0,060	-0,240	-0,103	0,103	0,038	0,028
CO _{solo_0-20cm}	-0,060	-0,076	-0,377	-0,018	0,833	-0,107	0,199	-0,001	-0,108	0,299	0,047
P _{solo_20-40cm}	-0,412	-0,487	-0,098	0,523	-0,212	0,368	0,051	0,037	-0,286	0,105	0,177
K _{solo_20-40cm}	-0,517	-0,638	0,148	-0,066	-0,051	-0,293	-0,052	-0,188	0,411	0,054	-0,020
Ca _{solo_20-40cm}	-0,601	0,228	-0,392	-0,096	-0,494	0,073	0,314	0,125	0,090	0,192	-0,122
Mg _{solo_20-40cm}	0,827	0,508	-0,008	0,143	-0,077	0,010	-0,138	-0,052	0,022	0,017	0,099
Na _{solo_20-40cm}	0,605	0,557	-0,031	0,444	0,078	0,125	0,126	-0,156	0,192	-0,160	-0,035
S.B. _{solo_20-40cm}	0,430	0,691	-0,288	0,099	-0,443	0,052	0,087	0,017	0,124	0,154	0,010
CO _{solo_20-40cm}	-0,583	-0,070	-0,309	-0,264	-0,166	-0,512	-0,170	-0,279	-0,088	0,224	-0,188

MF – Produtividade de matéria fresca; MS – Produtividade de matéria seca; N_{planta} – nitrogênio da planta; P_{planta} – fósforo na planta; K_{planta} – potássio na planta; Ca_{planta} – cálcio na planta; Mg_{planta} – magnésio na planta; Na_{planta} – sódio na planta; CO_{planta} – carbono orgânico na planta; Água_{planta} – água na planta; Água_{solo_0-70cm} – água no solo; IR – lâmina de irrigação; Ds_{solo} – densidade do solo; Dp_{solo} – densidade da partícula; PT_{solo} – porosidade total do solo; Areia_{solo} – fração areia; Silte_{solo} – fração silte; Argila_{solo} – fração argila; P_{solo} – fósforo no solo; K_{solo} – potássio no solo; Ca_{solo} – cálcio no solo; Mg_{solo} – magnésio no solo; Na_{solo} – sódio no solo; S.B. _{solo} – soma de bases; CO_{solo} – carbono orgânico no solo. Variáveis referente ao solo foram determinadas nas camadas 0-20 cm e 20-40 cm de profundidade.

----- CAPÍTULO 3 -----

**A COMBINAÇÃO DE PRÁTICAS RESILIENTES MAXIMIZA A
PRODUTIVIDADE E OS ESTOQUES DE ÁGUA, CARBONO E NUTRIENTES
DE SISTEMAS COM ESPÉCIES FORRAGEIRAS CULTIVADAS EM
AMBIENTE SEMIÁRIDO**

CAPÍTULO 3 - A COMBINAÇÃO DE PRÁTICAS RESILIENTES MAXIMIZA A PRODUTIVIDADE E OS ESTOQUES DE ÁGUA, CARBONO E NUTRIENTES DE SISTEMAS COM ESPÉCIES FORRAGEIRAS CULTIVADAS EM AMBIENTE SEMIÁRIDO

Resumo

Mediante aos efeitos das mudanças climáticas, a adoção de práticas resilientes é o caminho mais racional para conciliar a produção de alimento e a sustentabilidade dos cultivos em região semiárida. Assim, a fim de promover uma agricultura de conservação, a adoção de sistemas que promovam maiores estoques de água, carbono, e nutrientes no interface solo-planta torna-se necessário. Dessa forma, objetivou-se avaliar os estoques de água, carbono e nutrientes no sistema solo-planta de cultivos com espécies forrageiras irrigadas em ambiente semiárido, além de estabelecer suas relações com as características físico-hídricas dos solos e do manejo adotado. O estudo foi desenvolvido no “Centro de Referência Internacional de Estudos em Agrometeorologia de Palma e outras Plantas Forrageiras”, localizado na Universidade Federal Rural de Pernambuco - Unidade Acadêmica de Serra Talhada, no município de Serra Talhada-PE, Brasil. Foram avaliados quatro ciclos produtivos desenvolvidos entre janeiro de 2017 e janeiro de 2022. Para tanto foram avaliados sete sistemas de cultivo: feijão guandu exclusivo (S1); milho exclusivo (S2); sorgo exclusivo (S3); palma exclusiva (S4); palma+girassol+feijãoGuandu (S5); palma+sorgo+milho (S6) e palma+sorgo (S7). Foram avaliadas: a produtividade de matéria fresca (MF) e seca (MS) e os estoques de água, carbono e nutrientes na planta ($\text{Água}_{\text{Planta}}$, $\text{CO}_{\text{Planta}}$, N_{Planta} , P_{Planta} , K_{Planta} , $\text{Ca}_{\text{Planta}}$, $\text{Mg}_{\text{Planta}}$ e $\text{Na}_{\text{Planta}}$) e no solo, entre as camadas 0-20cm e 20-40cm de profundidade ($\text{Água}_{\text{Solo}_{0-70\text{cm}}}$, CO_{Solo} , P_{Solo} , K_{Solo} , Ca_{Solo} , Mg_{Solo} e Na_{Solo}). Para análise dos dados realizou-se estatística descritiva, teste de normalidade, homoscedasticidade, análise de variância e teste de comparação de médias (Fisher, $p < 0,05$). Por meio da análise de componentes principais determinou-se grupos de variáveis correlacionadas. Por fim, estabeleceu-se o ranqueamento dos sistemas considerando as melhores médias. Os resultados mostraram que os sistemas consorciados (S5, S6 e S7) apresentaram as melhores médias para todas as variáveis da planta ($p < 0,05$). Dentre os sistemas exclusivos, a palma forrageira (S4) não diferiu dos consórcios quanto a MF ($393,3 \text{ Mg ha}^{-1}$), P_{Planta} ($133,7 \text{ Mg ha}^{-1}$), $\text{Ca}_{\text{Planta}}$ ($1333,9 \text{ kg ha}^{-1}$), $\text{Mg}_{\text{Planta}}$ ($639,4 \text{ kg ha}^{-1}$) e $\text{Água}_{\text{Planta}}$ ($363,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). Já o sorgo exclusivo apresentou média elevada para MS ($44,0 \text{ Mg ha}^{-1}$) e $\text{CO}_{\text{Planta}}$ ($18,7 \text{ Mg ha}^{-1}$). Os sistemas milho-exclusivo e feijão guandu-exclusivo mostraram-se inferiores para todas as variáveis da planta. Quanto as variáveis de estoque no solo, apenas $\text{P}_{\text{Solo}_{0-20\text{cm}}}$, $\text{K}_{\text{Solo}_{0-20\text{cm}}}$, $\text{K}_{\text{Solo}_{20-40\text{cm}}}$, $\text{Na}_{\text{Solo}_{20-40\text{cm}}}$ e $\text{CO}_{\text{Solo}_{20-40\text{cm}}}$, apresentaram diferença significativa ($p < 0,05$). A palma forrageira exclusiva apresentou as maiores médias para $\text{CO}_{\text{Solo}_{20-40\text{cm}}}$ ($14,5 \text{ Mg ha}^{-1}$). Duas PCs explicaram 70,42% da variação dos dados. Os sistemas que proporcionam maior equilíbrio entre as variáveis produtivas e os estoques obedecem a seguinte ordem $\text{S7} > \text{S5} > \text{S6} > \text{S4} > \text{S3} > \text{S2} > \text{S1}$. Assim, conclui-se que a conformação palma-sorgo (S7) apresenta o maior equilíbrio entre produtividade e os estoques de água, carbono e nutrientes. Já entre os sistemas exclusivos: a palma forrageira é capaz de estocar as maiores quantidade de carbono orgânico no solo, enquanto o sorgo se destaca quanto ao acúmulo de carbono na planta. Diante desses achados, faz-se necessário a continuidade de estudos envolvendo a sustentabilidade dos cultivos de espécies forrageiras, a fim de

promover sistemas que equilibram a produtividade e estoques de água, carbono e nutrientes.

Palavras chaves: carbono orgânico; consórcio; palma forrageira; sorgo; sustentabilidade.

Does the combination of resilient practices maximize productivity and water, carbon and nutrient stocks in systems with forage species grown in a semi-arid environment?

Abstract

Given the effects of climate change, the adoption of resilient practices is the most rational way to reconcile food production and crop sustainability in semiarid regions. Thus, in order to promote conservation agriculture, the adoption of systems that promote greater stocks of water, carbon, and nutrients at the soil-plant interface becomes necessary. Thus, the objective was to evaluate the stocks of water, carbon, and nutrients in the soil-plant system of crops with irrigated forage species in semiarid environments, in addition to establishing their relationships with the physical-hydric characteristics of the soils and the management adopted. The study was developed at the “International Reference Center for Studies in Agrometeorology of Palm and other Forage Plants”, located at the Federal Rural University of Pernambuco - Serra Talhada Academic Unit, in the municipality of Serra Talhada-PE, Brazil. Four production cycles developed between January 2017 and January 2022 were evaluated. For this purpose, seven cultivation systems were evaluated: exclusive pigeon pea (S1); exclusive millet (S2); exclusive sorghum (S3); exclusive palm (S4); palm+sunflower+pigeon pea (S5); palm+sorghum+millet (S6) and palm+sorghum (S7). The following were evaluated: fresh matter (MF) and dry matter (DM) productivity and water, carbon and nutrient stocks in the plant (WaterPlant, COPlant, NPlant, PPlant, KPlant, CaPlant, MgPlant and NaPlant) and in the soil, between the 0-20cm and 20-40cm depth layers (WaterSoil_0-70cm, COsoil, Psoil, Ksoil, Casoil, Mgsoil and Nasoil). Descriptive statistics, normality test, homoscedasticity, analysis of variance and mean comparison test (Fisher, $p < 0.05$) were used to analyze the data. Groups of correlated variables were determined through principal component analysis. Finally, the systems were ranked considering the best means. The results showed that the intercropped systems (S5, S6 and S7) presented the best means for all plant variables ($p < 0.05$). Among the exclusive systems, forage cactus (S4) did not differ from the intercropped systems regarding MF (393.3 Mg ha⁻¹), PPlanta (133.7 Mg ha⁻¹), CaPlanta (1333.9 kg ha⁻¹), MgPlanta (639.4 kg ha⁻¹) and ÁguaPlanta (363.5 m³ ha⁻¹). The exclusive sorghum presented high averages for DM (44.0 Mg ha⁻¹) and COplanta (18.7 Mg ha⁻¹). The exclusive millet and exclusive pigeon pea systems were inferior for all plant variables. Regarding the soil stock variables, only PSolo_0-20cm, KSolo_0-20cm, KSolo_20-40cm, NaSolo_20-40cm and COSolo_20-40cm showed significant differences ($p < 0.05$). The exclusive forage cactus presented the highest averages for COSolo_20-40cm (14.5 Mg ha⁻¹). Two PCs explained 70.42% of the data variation. The systems that provide greater balance between the productive variables and stocks follow the following order S7>S5>S6>S4>S3>S2>S1. Thus, it is concluded that the cactus-sorghum conformation (S7) presents the greatest balance between productivity and water, carbon and nutrient stocks. Among the exclusive systems: cactus is capable of storing the largest amount of

organic carbon in the soil, while sorghum stands out in terms of carbon accumulation in the plant. Given these findings, it is necessary to continue studies involving the sustainability of forage species crops, in order to promote systems that balance productivity and water, carbon and nutrient stocks.

Keywords: organic carbon; consortium; fodder palm; sorghum; sustainability

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os efeitos adversos promovidos pelas mudanças climáticas tornaram-se o principal problema enfrentado pelas instituições governamentais em todo o mundo (NHEMACHENA et al., 2020; MIRZAEI; KAHRIZI; SHAH HASSAN, 2021; BIBI e RAHMAN, 2023). Intimamente relacionada ao crescimento e ao desenvolvimento dos vegetais, assim como ao bem-estar humano e animal, as variáveis climáticas (i.e precipitação pluviométrica, temperatura e a umidade relativa do ar) vem sofrendo alterações significativas que colocam em risco a segurança alimentar e a economia mundial (MARKOU et al., 2020; ALI et al., 2021; SHRESTHA et al., 2022).

Impulsionada principalmente pelo crescimento populacional, pela emissão de gases de efeito estufa (GEE) e pela exploração desenfreada de áreas de vegetação natural, a expectativa é de condições futuras ainda piores. Estimativas indicam que a população mundial atingirá a marca de 9,5 bilhões de pessoas até 2050, aumentando a demanda por recursos (ONU, 2019). Somado a isso, expandir as áreas de cultivo não garante a sustentabilidade da produção, além afetar a fertilidade, os estoques de carbono orgânico dos solos (COS) e a viabilidade do sistema (DAVIDSON e JANSSENS, 2006; YANARDAĞ et al., 2015).

O COS é considerado um dos principais indicadores da sustentabilidade de sistemas agroflorestais (CHAPPELL et al., 2021). Logo, optar por sistemas de manejos que maximizem seu conteúdo no solo é a tendência futura. Além disso, o manejo resiliente não só potencializa a produtividade dos cultivos agrícolas, mas contribui com a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas.

Em regiões semiáridas onde a limitação da disponibilidade hídrica e a má variabilidade das chuvas são realidade, as consequências podem ser ainda mais agravantes (NHEMACHENA et al., 2020). Além disso, as temperaturas elevadas e o baixo índice de umidade relativa do ar potencializam a demanda atmosférica exigindo ainda mais dos sistemas de produção. Segundo Bibi e Rahman (2023), o efeito conjunto

destas variáveis também afetam as propriedades físico-hídricas e nutricionais do solo, dificultando a transformação de minerais em compostos orgânicos.

Nessa perspectiva, a adoção de práticas agronômicas sustentáveis torna-se a alternativa mais importante e viável para contornar essa realidade (ALVES et al., 2024; SALVADOR et al., 2021). Estudos envolvendo o uso de espécies adaptadas, o manejo de irrigação deficitária, o consórcio entre plantas, a presença de cobertura morta e a rotação de culturas, está cada vez mais frequente na literatura (ALVES et al., 2022a; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021a, 2021b; JARDIM et al., 2021a, 2021b; QUEIROZ et al., 2020). Segundo Anghinoni et al. (2021), práticas resilientes quando aplicadas de forma combinada, possuem o potencial de maximizar a produtividade e proporcionar um ambiente diversificado capaz de melhorar as características físicas, químicas e biológicas do solo.

Dentre as espécies adaptadas ao clima semiárido, a palma forrageira se destaca por apresentar produtividade elevada e alta eficiência no uso da água (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2021a). Entretanto, por possuir baixos teores de fibra e proteína, seu consumo de forma isolada pode promover distúrbios intestinais, obrigando o produtor a fornecer uma segunda opção de alimento aos animais (CARDOSO et al., 2019).

Nesses casos, a opção mais adequada é o desenvolvimento de sistemas consorciados pois, além melhorar a diversidade alimentar, promovem a eficiência do uso dos recursos (ALVES et al., 2022a). Segundo Jardim et al. (2020) a competição entre as espécies minimiza a produtividade individual das culturas, porém, quando somadas, o sistema é capaz de produzir até 3 vezes mais quando comparados a sistemas exclusivos. Em estudos envolvendo a palma forrageira consorciada com o milho em clima semiárido, SOUZA et al. (2023a, 2023b) também verificaram que essa prática aumenta a eficiência do uso da água. Além disso, observou-se que esse mesmo tipo de sistema somado a adição de cobertura morta não só aumenta a produção de matéria seca como mantém a mesma relação de custo/lucro quando comparado ao sistema sem palha no solo. Para Salvador et al. (2021) a presença de palhada não só enriquece o sistema com a liberação de nutrientes, como reduz a os efeitos erosivos da chuva e diminui a temperatura e a evaporação do solo. Em revisão, os autores ainda citam o girassol (Oleaginosa) e o feijão guandu (leguminosa) como opções de culturas secundárias resistentes ao clima semiárido.

Embora essas práticas proporcionem eficiências no uso dos recursos naturais, pouco se sabe sobre a capacidade que as espécies forrageiras possuem em estocar de água, carbono e nutrientes de forma conjunta. Araújo Júnior et al. (2023), por exemplo, observaram que a palma forrageira é capaz de armazenar até 8,73 litros de água por planta em seus tecidos. Enquanto Santos et al. (2024b) e Ferraz et al., (2019) verificaram que a cultura tem potencial de extração maior para os nutrientes Ca e K. Já com relação ao carbono orgânico no solo, Santos et al. (2024a) mencionam que a cultura da palma pode estocar 58,9 Mg ha⁻¹, valores superiores aos encontrados em vegetação caatinga. Assim, necessita-se de estudos que reúnam todas essas informações e estabeleça relações mais precisas a fim de desenvolver sistemas cada vez mais sustentáveis.

Dessa forma, este estudo parte da hipótese de que 1- práticas agronômicas resilientes potencializam os estoques de água, carbono e nutrientes em sistemas de cultivo em ambiente semiárido; 2- entender as relações entre os estoques de água, carbono e nutrientes e as variáveis abióticas e de manejo auxiliam na tomada de decisão para se obter um sistema sustentável eficiente. Assim, espera-se que a melhor combinação possa a promover sustentabilidade e atingir as ODS 1 (Erradicação da pobreza); 2 (Fome zero); 8 (Emprego digno e crescimento econômico); 12 (Consumo e produção responsável) e 13 (Combate as alterações climáticas).

Diante do exposto, este estudo tem como objetivo: 1- avaliar os estoques de água, carbono e nutrientes na interface solo-planta de sistemas que envolvem espécies forrageiras irrigadas, e 2- estabelecer suas relações com variáveis abióticas e de manejo com a fim de compreender e recomendar práticas resilientes que potencializem a produtividade dos sistemas e a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas em ambiente semiárido.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização da área de estudo

O estudo foi desenvolvido no Centro de Referência Internacional de Estudos agrometeorológico de Palma e outras Plantas Forrageiras (CentroRef), localizado na Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UAST-UFRPE) em Serra Talhada, Pernambuco (7°56'20" S; 38°17'31" O; 499 m; Figura 1). O clima da região, segundo a classificação de Koppen, é denominado como Seminário-BSh' e apresenta precipitação pluvial

média de 624 mm ano⁻¹, com valores médios anuais de temperatura e umidade relativa do ar próximos a 24,8 °C e 63%, respectivamente (SILVA et al., 2015).

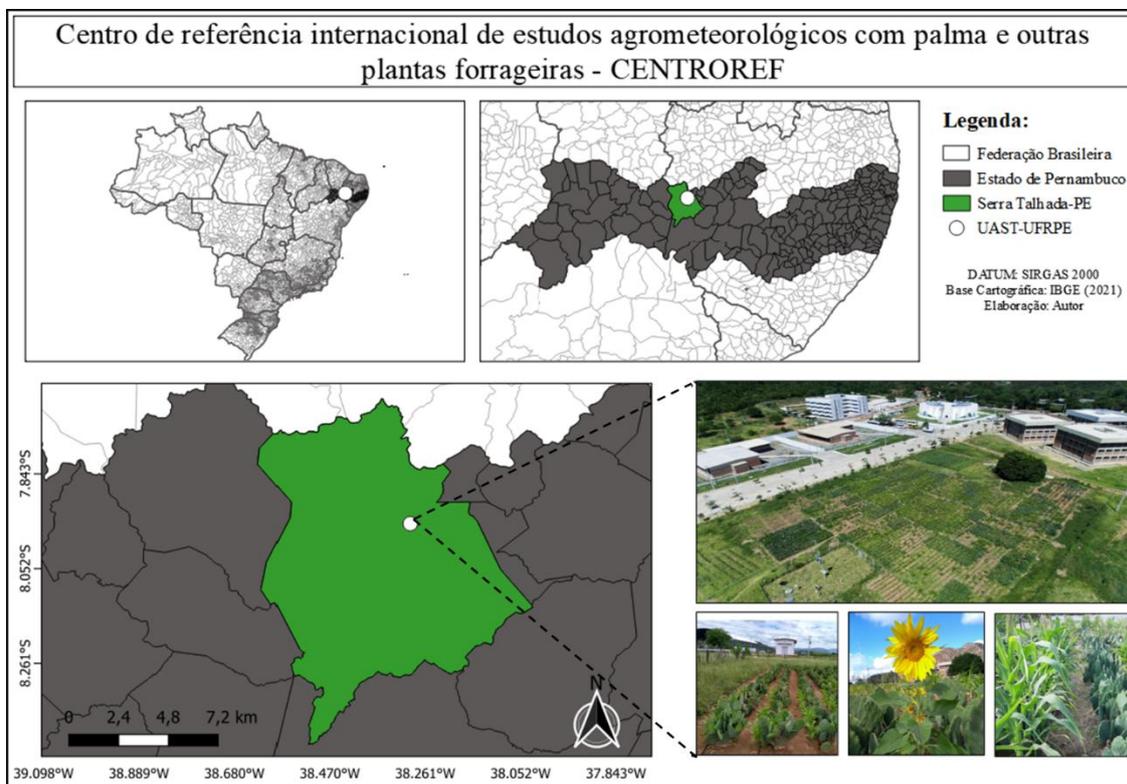


Figura 1. Localização das áreas experimentais do Centro de Referência Internacional de Estudos de Agrometeorologia de Palma e outras Plantas Forrageiras - CentroRef. Fonte: Elaborado pelo autor.

O solo da área experimental é classificado como Cambissolo Háplico Ta Eutrófico Típico, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018), sendo suas características físico-químicas (0-20 cm e 20-40 cm) no início do período experimental descritas a seguir: Densidade do solo = 1,58 e 1,60 g cm⁻³; Densidade da partícula = 2,43 e 2,53 g cm⁻³; Porosidade total = 34,80 e 36,71 %; Areia = 833,3 e 830,4 g Kg⁻¹; Silte = 128,4 e 118,8 g Kg⁻¹; Argila = 38,3 e 50,8 g Kg⁻¹; condutividade elétrica no extrato de saturação (CEes) = 0,87 e 0,52 mS cm⁻¹; pH = 6,9 e 6,7; CO = 5,8 e 4,8 g kg⁻¹; P = 78,11 e 66,51 mg dm⁻³; K = 1,28 e 0,74 cmolc dm⁻³; Na = 0,04 e 0,03 cmolc dm⁻³; Ca = 4,0 e 4,5 cmolc dm⁻³; Mg = 1,60 e 2,20 cmolc dm⁻³; Saturação de bases = 93,5 e 91,2 %.

2.2 Caracterização dos sistemas de cultivo

O experimento foi conduzido durante quatro épocas entre setembro de 2017 e junho de 2022 onde foram analisados 7 sistemas de cultivo envolvendo a palma forrageira e espécies gramíneas, leguminosas e oleaginosas de forma exclusiva e consorciada. A duração de cada época foi caracterizada pelo período respectivo ao ciclo de palma que será detalhado a seguir:

De início, o plantio da palma forrageira ocorreu em abril de 2017 obedecendo a um espaçamento de 0,10 m x 1,00 m em uma área de 144 m² (100.000 plantas ha⁻¹). A irrigação da área deu-se por meio de gotejamento com início em agosto de 2017.

O período de análise deste ciclo (época 1) compreendeu o intervalo de setembro de 2017 a outubro de 2018, o equivalente a 13 meses de duração. Para culturas de consórcios utilizadas foram: Feijão guandu (*Cajanus cajan*), cv. BRS Mandarin; girassol forrageiro (*Helianthus annuus* L.) cv. Rumbosol; e o sorgo (*Sorghum bicolor*) cv. IPA - 2502. As sementeiras dessas espécies ocorreram em outubro de 2017 e obedeceram a uma distância de 0,30 m das plantas de palma forrageira. Para o feijão guandu e o girassol, foram adotadas densidades de 33.333 plantas ha⁻¹ (0,30 entre plantas) e 40.000 plantas ha⁻¹ (0,25 entre plantas), respectivamente, enquanto o milho considerou 20 plantas por metro linear (200.000 plantas ha⁻¹). Durante este ciclo utilizou-se 18 Mg ha⁻¹ de capim corrente (*Urochloa mosambicensis*) como cobertura morta. Já o segundo ciclo da palma (época 2) teve duração de aproximadamente 16 meses, compreendendo o período entre fevereiro de 2019 e junho de 2020. Para tanto, neste segundo ciclo, o feijão guandu e o girassol foram substituídos pelo milho cv. BULK-01 e pelo sorgo cv. IPA-1011. A densidade de plantas do milho seguiu o mesmo exemplo citado para o sorgo.

O delineamento experimental utilizado para os dois primeiros ciclos de palma (época 1 e 2) foi em blocos ao acaso (DBC), com quatro tratamentos e três repetições, composto por 12 parcelas experimentais de 12 m². Sendo os seguintes tratamentos: Palma exclusiva – controle; palma + feijão guandu; Palma + Girassol e Palma + Sorgo para o primeiro ciclo; e Palma exclusiva – controle; Palma + feijão guandu; Palma + Girassol e Palma + Sorgo para o segundo ciclo.

O terceiro ciclo (época 3) teve início em setembro de 2020 e foi concluído em setembro de 2021 (12 meses). Diferente dos ciclos anteriores, o terceiro foi conduzido

em outra conformação. Dessa vez, com a análise exclusiva das culturas atribuídas aos consórcios, que foram: Feijão Guandú, Milheto e Sorgo. As mesmas características dos plantios anteriores foram adotadas. Logo, o delineamento experimental passou a ser em blocos ao acaso (DBC), com sete tratamentos e três repetições, totalizando 21 parcelas experimentais de 12 m². A nova conformação seguiu o seguinte arranjo: Palma exclusiva; Feijão Guandú exclusivo; Milheto exclusivo; Sorgo exclusivo; Palma + Feijão Guandú; Palma + Milheto e Palma + Sorgo. Para o quarto ciclo (época 4), manteve-se o padrão.

Dessa forma, a determinação dos sistemas obedeceu ao critério de sucessão na mesma parcela de plantio, conforme descrito na Tabela 2.

Tabela 2. Descrição dos sistemas de cultivo em cada época de análise

Sistema	Época 1	Época 2	Época 3	Época 4
GE-GE (S1)	-	-	FeijãoGuandú exclusivo	FeijãoGuandú exclusivo
ME-ME (S2)	-	-	Milheto exclusivo	Milheto exclusivo
SF15-SF15 (S3)	-	-	Sorgo exclusivo	Sorgo exclusivo
PE-PE-PE-PE (S4)	Palma*	Palma	Palma	Palma
PG-P1011-PG-PG (S5)	Palma+FeijãoGuandú*	Palma+Sorgo	Palma+FeijãoGuandú	Palma+FeijãoGuandú
PGI-PM-PM-PM (S6)	Palma+Girassol*	Palma+Milheto	Palma+Milheto	Palma+Milheto
P2502-PSF15-PSF15-PSF15 (S7)	Palma+Sorgo*	Palma+Sorgo	Palma+Sorgo	Palma+Sorgo

*Cultivo com presença de palhada no solo

Para melhor interpretação e comparação dos efeitos de cada sistema, as variáveis avaliadas neste estudo (descritas as seções a seguir) passaram por padronização. No caso de sistemas consorciados, para médias como a produtividade total, por exemplo, foram somadas as produtividades obtidas pela palma forrageira e pelas culturas de consórcio dentro de seus respectivos ciclos. Já para os casos de diferenças na duração dos ciclos, foram feitos ajustes proporcionais para ciclos de 365 dias. Dessa forma, todas as variáveis passaram a apresentar condições semelhantes.

2.3 Descrições gerais de manejo

De modo geral, para implantação da área experimental foram realizadas práticas de aração, gradagem e sulcagem, além dos manejos de adubação, irrigação e controle de plantas daninhas, ao longo do período experimental.

As adubações foram realizadas conforme o manual de recomendação do Instituto Agrônômico de Pernambuco (IPA) em intervalos de dois ciclos produtivos (250 Kg ha⁻¹ de nitrogênio; 60 Kg ha⁻¹ de fósforo; 325 Kg ha⁻¹ de potássio).

Para o manejo de irrigação considerou-se a evapotranspiração da cultura (ET_c) determinada conforme o boletim da FAO-56 (ALLEN et al., 1998), que considera o produto entre a evapotranspiração de referência (ET_o) e o coeficiente da cultura (k_c). Neste caso, se tratando uma região de clima semiárido e em busca de um sistema sustentável, considerou-se lâminas fixas de 120% da evapotranspiração da palma forrageira (ET_c), com coeficiente médio da cultura (K_c) de 0,52 (QUEIROZ et al., 2016). Essa decisão foi tomada com base na cultura que apresenta a eficiência no uso da água (palma forrageira). Na determinação da ET_c utilizou-se dados médios diários de uma estação meteorológica pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada 10 m da área de cultivo. A água utilizada foi proveniente de um poço artesiano localizado a aproximadamente 50 metros das áreas experimentais e possui classificação do tipo C3, sendo considerada água de alta salinidade, com condutividade elétrica média de 1,62 dS m⁻¹, concentração de sódio e potássio média de 168,66 mg L⁻¹ e 28,17 mg L⁻¹, respectivamente. Os controles de pragas e plantas daninhas foram efetuados sempre que necessários.

2.4 Produtividade de matéria fresca e seca

A produtividade de matéria fresca total do sistema (MF, Mg ha⁻¹) foi obtida pelo produto entre o peso fresco médio da planta e a densidade final das plantas por hectare. Para isso, cinco plantas representativa de cada parcela foram colhidas e pesadas para obtenção do peso fresco médio. Já para densidade, levou-se em consideração o número de plantas existentes em dois metros lineares para extrapolação do número de plantas por hectare. Esse procedimento foi realizado de forma igualitária para todas as espécies.

Para a produtividade de matéria seca total da palma (MS, Mg ha⁻¹), uma planta de cada parcela foi selecionada, colhida e pesada. Neste procedimento, para a palma forrageira também foram contados o número de cladódios por ordem de surgimento. Em seguida, um cladódio de cada ordem foi pesado, fracionado, acondicionados em sacos de papel identificados e levado a estufa a uma temperatura de 65°C até obter peso seco constante.

Para o MS das demais espécies, duas plantas por parcela foram colhidas, pesadas, fracionadas, acondicionadas em sacos identificados e levadas a estufa a uma temperatura de 65°C até obter peso seco constante.

Em ambos os casos, pela relação entre peso seco e fresco foi obtido o teor de matéria seca (Tms) de cada espécie. Por fim, MS foi determinado pelo produto entre MF x Tms. Para sistemas consorciados realizou-se a soma dessas estimativas referente as duas espécies.

2.5 Estoque de água, carbono e nutrientes na planta

O estoque de água na planta ($\text{Água}_{\text{Planta}}$, $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) foi obtido pela diferença entre as produtividades de matéria fresca e seca de cada sistema ($\text{Água}_{\text{Planta}} = \text{MF} - \text{MS}$). Já para determinação dos estoques de carbono ($\text{CO}_{\text{Planta}}$) e nutrientes (N_{Planta} , P_{Planta} , K_{Planta} , $\text{Ca}_{\text{Planta}}$, $\text{Mg}_{\text{Planta}}$, $\text{Na}_{\text{Planta}}$) na planta, o material vegetal seco em estufa mencionado na seção anterior (seção 2.3), foi moído e peneirado com auxílio de um moinho do tipo Willey equipado com uma peneira de 1,0 mm. Em seguida, foi levado ao laboratório de análises químicas para determinação dos teores macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg), íon Na e Carbono Orgânico (CO), conforme metodologia da Embrapa (2009).

Os estoques serão determinados partir dos teores de cada elemento e da produtividade de matéria seca de cada sistema produtivo. Conforme a expressão a seguir:

$$\text{Elemento}_{\text{Planta}} = \text{Teor}_{\text{Elemento}} \cdot \text{MS} \quad (1)$$

Em que, $\text{Elemento}_{\text{Planta}}$ é o estoque do referido elemento na planta (kg ha^{-1}); $\text{Teor}_{\text{Elemento}}$ é o teor do referido elemento da amostra vegetal (kg kg^{-1}); MS é a produtividade de matéria seca do sistema de produção (kg ha^{-1}).

2.6 Estoque de água, carbono e nutrientes no solo

O estoque de água no solo foi estabelecido em camadas de 10 cm de profundidade a um limite de 70 cm, por meio de um sensor capacitivo modelo Diviner® 2000 (Sentek Pty Ltd., Austrália). Logo, com base nos dados de cada camada, determinou-se o armazenamento de água no solo ($\text{Água}_{\text{solo}_{0-70\text{cm}}}$, mm) conforme a equação a seguir:

$$\text{Água}_{\text{solo}_{0-70\text{cm}}} = \sum \theta_{0-70 \text{ cm}} * \Delta h \quad (8)$$

Onde, $\theta_{0-70 \text{ cm}}$ representa a umidade de água no solo na subcamada ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e Δh é a profundidade total da camada do solo em mm.

Para os estoques de carbono e nutrientes, amostras de solo foram coletadas no início e ao final de cada ciclo experimental nas camadas de 0–20 cm e 20–40 cm de profundidade, identificadas e, em seguida, enviadas ao laboratório de análises químicas para determinação das propriedades físico-hídricas (textura [$\text{Areia}_{\text{solo}_{x-x \text{ cm}}}$; $\text{silte}_{\text{solo}_{x-x \text{ cm}}}$; $\text{argila}_{\text{solo}_{x-x \text{ cm}}}$], porosidade [$\text{PT}_{\text{solo}_{x-x \text{ cm}}}$] e densidades do solo [$\text{Ds}_{\text{solo}_{x-x \text{ cm}}}$] e da partícula [$\text{Dp}_{\text{solo}_{x-x \text{ cm}}}$]) e teores de macronutrientes ($\text{P}_{\text{solo}_{x-x \text{ cm}}}$, $\text{K}_{\text{solo}_{x-x \text{ cm}}}$, $\text{Ca}_{\text{solo}_{x-x \text{ cm}}}$, $\text{Mg}_{\text{solo}_{x-x \text{ cm}}}$), íon $\text{Na}_{\text{solo}_{x-x \text{ cm}}}$ e Carbono Orgânico do Solo ($\text{CO}_{\text{solo}_{x-x \text{ cm}}}$). Os estoques foram determinados a partir dos teores de cada amostra, conforme a mostrado na expressão a seguir (3):

$$\text{Elemento}_{\text{solo}_{x-x \text{ cm}}} = \frac{(\text{Teor}_{\text{Elemento}_{x-x \text{ cm}}} \cdot \text{Ds} \cdot h)}{10} \quad (9)$$

Em que, $\text{Elemento}_{\text{solo}_{x-x \text{ cm}}}$ é o estoque do elemento presente na camada de solo 0-20 ou 0-40 (Mg ha^{-1}); $\text{Teor}_{\text{Elemento}_{x-x \text{ cm}}}$ é o teor de nutrientes para a camada amostrada (g kg^{-1}); Ds é a densidade do solo (Mg m^{-3}); e h é a profundidade da camada de solo analisada (m).

Os teores foram determinados conforme a metodologia da Embrapa (2009), onde foram considerados para planta o método de Kjeldahl para N, a Espectrometria de emissão atômica por Plasma (Digestão Nitro-perclórica) para P, K, Ca, Mg e Na, e o método da mufla para CO. Já para o solo os elementos P, K e Na foram extraídos por meio da Espectrometria de emissão atômica de plasma (Mehlich-1), enquanto para o Ca e o Mg utilizou-se a Espectrometria de emissão atômica de plasma (Cloreto de Amônia - NH_4Cl). Já o CO foi determinado pelo método Walkley Black (Via úmida).

2.7 Análise estatística

Como protocolo da análise, os dados passaram por estatística descritiva (Boxplot - média, mediana e dispersão) e em seguida, foram submetidos ao teste de normalidade ($p < 0,05$) e homoscedasticidade ($p < 0,05$), análise de variância (ANOVA, $p < 0,05$) e teste de comparação de média conforme Fisher a 5% de probabilidade. Os sistemas foram ranqueados conforme os maiores valores médios dentro de cada variável (mapa de calor)

e geral (maior número de médias superiores). Por último, determinou-se os grupos de variáveis (componentes) de maior relação utilizando a análise de componentes principais (PCA). Como suporte para organização e tabulação utilizou-se o software Microsoft excel. Todo o procedimento estatístico e saídas gráficas, foi realizado com auxílio dos programas RStudio (R Core Team, 2018) e SigmaPlot (Versão 14.0), respectivamente.

3. RESULTADOS

A Figura 2 apresenta o comportamento das variáveis meteorológicas durante todo o período do experimental. Os valores de temperatura do ar (Tar) oscilaram entre 20,5°C e 31,1°C mantendo a média próxima a 26,7°C. Já a umidade relativa do ar (UR) registou valor médio de 68,7% com comportamento inverso a temperatura. Os maiores valores de Tar foram registrados durante o verão (~29,5°C) época de maior intensidade da radiação solar global (Rg). Em regiões semiáridas o potencial de Rg é elevado e neste estudo apresentou média próxima a 20,75 MJ m² dia. A variação desses elementos meteorológicos contribuiu para uma demanda atmosférica (ET0) em torno de 8445 mm. A precipitação pluviométrica obedeceu a sazonalidade apresentada na região, demonstrando períodos de maiores intensidades entre os meses de janeiro e março de cada ano, o que totalizou 2259 mm acumulados. Além disso, a reposição hídrica realizada por meio de irrigação foi de 847 mm, totalizando 3106 mm quando somada a precipitação.

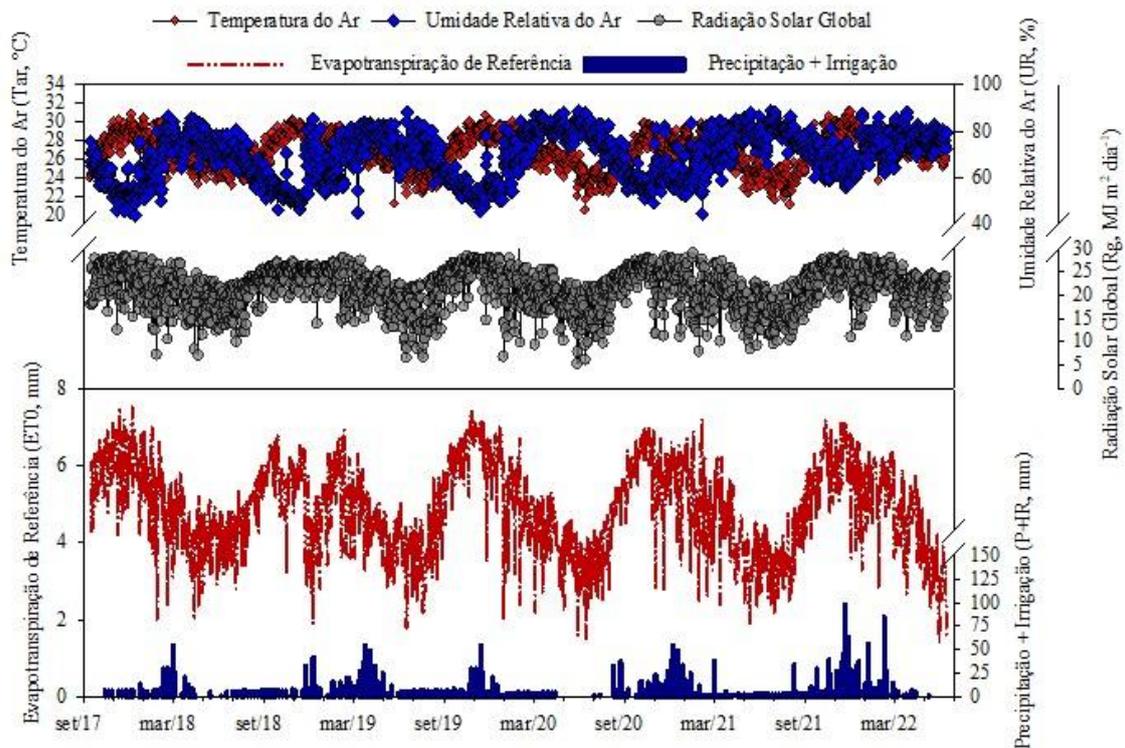


Figura 2. Meteorológicas e lâmina de irrigação aplicada durante o período experimental.

3.1 Produtividade e estoques de água, carbono e nutrientes na planta

Dados de produtividade de matéria fresca (MF) e seca (MS) são vistos na Figura 3. Logo, é possível observar que sistemas que apresentam a palma forrageira em sua conformação (S4; S5; S6 e S7) proporcionam as maiores médias de produtividade para ambas as variáveis. Sistemas exclusivos com feijão guandú (S1), milho (S2) e sorgo (S3) apresentaram MF inferior a 200 Mg ha^{-1} (Figura3a), enquanto a palma forrageira (S4) produziu aproximadamente o dobro (400 Mg ha^{-1}). Já para MS (figura3b), o sorgo (S3) se destaca sobre os sistemas exclusivos, chegando a produzir pouco mais de 40 Mg ha^{-1} . Esses resultados individuais do sorgo justificam o desempenho do sistema consorciado entre palma e sorgo (S7), que obtiveram as melhores médias para ambas as produtividades. Embora a palma possua maior contribuição nas para MF e MS, sistemas consorciados se sobressaem ao exclusivo por apresentarem as maiores médias, valendo destacar a junção palma-sorgo (S7).

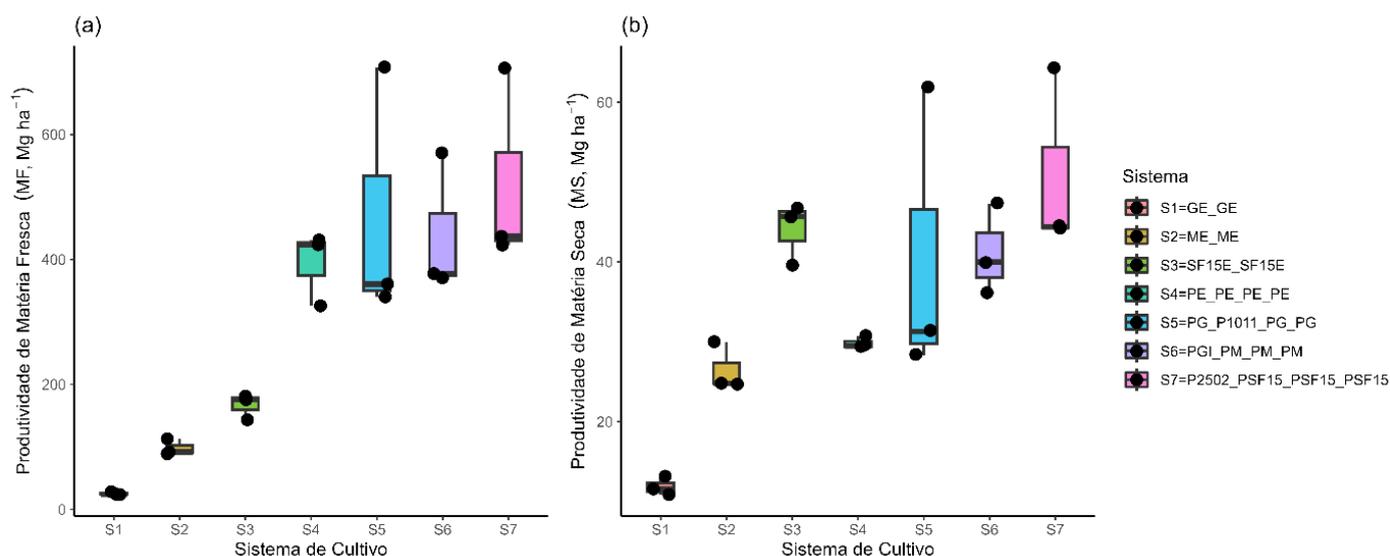


Figura 3. Produtividade de matéria fresca (a) e seca (b) de sistemas de cultivo exclusivo e consorciado de espécies forrageiras irrigadas em ambiente semiárido.

Em que, GE_GE – Ciclos de feijão-guandú exclusivo; ME_ME – Ciclos de milho exclusivo; SF15_SF15 – Ciclos de sorgoSF15 exclusivo; PE_PE_PE_PE – Ciclos de Palma forrageira exclusiva; PG_P1011_PG_PG – Ciclos de palma forrageira consorciada com feijão guandu e sorgo1011; PGL_PM_PM_PM – Ciclos de palma forrageira consorciada com Girassol e Milheto; P2502_SF15_SF15_SF15 - Ciclos de palma forrageira consorciada com sorgo2502 e sorgoSF15.

Na Figura 4 são expostos os estoques de água, carbono e nutrientes das plantas de cada sistema de cultivo. De imediato, é possível observar que, em resposta as produtividades de MF e MS, os estoques de água na planta ($\text{Água}_{\text{Planta}}$, figura 4a) são significativamente maiores em sistemas com palma forrageira (S4, S5, S6 e S7). Já para os estoques de carbono orgânico na planta (C_{Planta} , figura 4b), nota-se diferentes respostas entre os sistemas. S3, por exemplo, apresenta média superior aos demais sistemas exclusivos (S1, S2 e S4), indicando o potencial da cultura do sorgo em estocar esse elemento. Quanto aos estoques de nutrientes, observa-se que a disposição dos dados é semelhante (Figura 4c-h). Sistemas com palma forrageira na forma exclusiva ou consorciada (S4, S5, S6 e S7) apresentam o maior estoque de nutrientes independente do elemento a ser considerado. A maior intensidade é vista em consorcio com espécies gramíneas (i.e milho e sorgo). Vê-se ainda que o feijão guandu pouco contribui para os estoques. Entretanto, não se pode ignorar a utilização desse sistema, uma vez que a escolha da melhor conformação deverá atender as características bromatológicas da espécie e as condições socioeconômicas do produtor. Além disso, é importante considerar a influência desse sistema no estoque no solo.

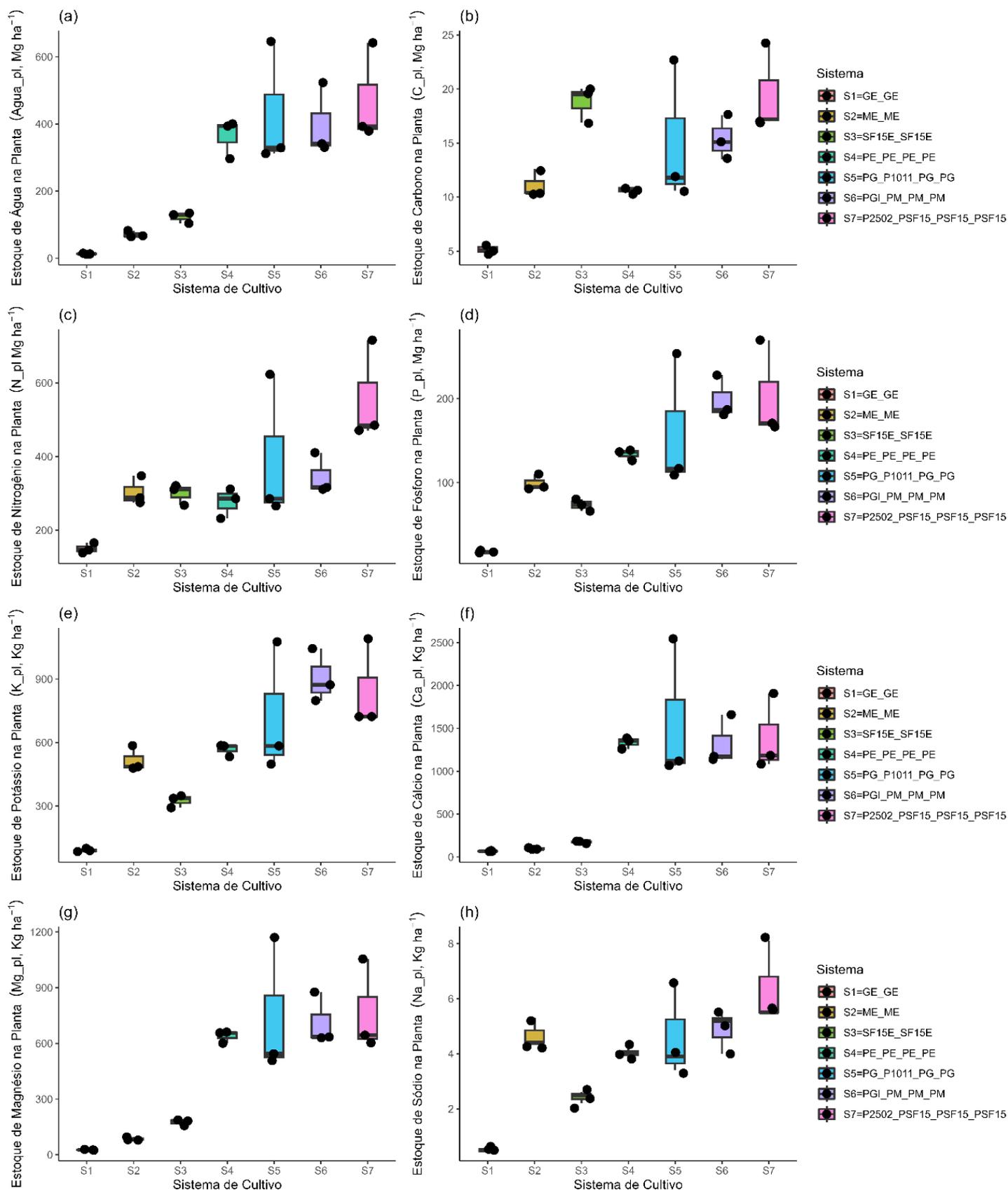


Figura 4. Estoques de água (a), carbono (b) e nutrientes (c-d) em plantas de sistemas cultivos exclusivos e consorciados de espécies forrageiras irrigadas em ambiente semiárido. Em que, GE_GE – Ciclos de feijão-guandú exclusivo; ME_ME – Ciclos de milho exclusivo; SF15_SF15 – Ciclos de sorgoSF15 exclusivo; PE_PE_PE_PE – Ciclos de Palma forrageira exclusiva; PG_P1011_PG_PG – Ciclos de palma forrageira consorciada com feijão guandú e

O teste de média para a produtividade e os estoques de água, carbono e nutrientes do sistema solo-planta são apresentados na Tabela 3. Conforme explorado na disposição dos dados das Figuras 3 e 4, o teste de Fisher ($p < 0,05$) comprova que o sistema palma-sorgo (S7) se destaca em relação aos demais sistemas quanto a produtividade e estoques de água, carbono e nutrientes das plantas. Porém, não é observada diferença ($p > 0,05$) entre S7, S4, S5 e S6 para MF e S7, S3, S5 e S6 para MS, nessa ordem. Os sistemas exclusivos sem a presença da palma forrageira (S1, S2 e S3), mostraram-se inferiores em praticamente todas as variáveis da interface planta, com exceção da MS ($44,07 \text{ Mg ha}^{-1}$) e $\text{CO}_{\text{Planta}}$ ($18,782 \text{ Mg ha}^{-1}$) em S3.

Tabela 3. Médias de produtividade, estoques de água, carbono e nutrientes na planta, e ranking dos sistemas de cultivo exclusivos e consorciados entre espécies forrageiras irrigadas no semiárido brasileiro. Valores médios ordenados dos maiores para os menores em escala de cores na sequência: verde escuro, verde claro, amarelo, laranja e vermelho.

Sistemas de Cultivo							
Produtividade	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
MF (Mg ha^{-1}) **	25,341 b	97,967 b	166,696 b	393,337 a	469,388 a	439,417 a	522,094 a
MS (Mg ha^{-1}) **	11,838 d	26,557 cd	44,071 ab	29,834 bc	40,466 abc	41,138 abc	50,954 a
Estoque na planta	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
N_{Planta} (kg ha^{-1}) **	150,367 c	303,713 bc	299,939 bc	276,636 bc	391,629 ab	346,051 b	557,232 a
P_{Planta} (kg ha^{-1}) **	17,617 d	99,311 bc	73,296 cd	133,794 abc	159,887 ab	198,563 a	202,323 a
K_{Planta} (kg ha^{-1}) **	91,266 d	516,779 bc	325,459 cd	567,579 bc	719,364 ab	905,055 a	845,299 a
$\text{Ca}_{\text{Planta}}$ (kg ha^{-1}) **	68,651 b	96,766 b	174,396 b	1333,955 a	1577,598 a	1324,005 a	1391,915 a
$\text{Mg}_{\text{Planta}}$ (kg ha^{-1}) **	26,573 b	85,254 b	175,514 b	639,488 a	740,513 a	713,392 a	767,363 a
$\text{Na}_{\text{Planta}}$ (kg ha^{-1}) **	0,502 d	4,709 b	2,451 c	4,037 bc	4,650 b	4,876 ab	6,337 a
$\text{CO}_{\text{Planta}}$ (Mg ha^{-1}) **	5,189 c	11,115 b	18,782 a	10,728 bc	15,067 ab	15,381 ab	19,511 a
$\text{Água}_{\text{Planta}}$ ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) **	13,503 b	71,411 b	122,625 b	363,503 a	428,922 a	398,280 a	471,140 a
Ranking geral	7	6	5	4	2	3	1

3.2 Estoques de água, carbono e nutrientes no solo

As variáveis do solo não apresentaram variabilidade moderada quanto as médias de cada sistema (Tabela 4). Entretanto, nota-se que apenas $\text{P}_{\text{Solo}_{0-20\text{cm}}}$, $\text{K}_{\text{Solo}_{0-20\text{cm}}}$, $\text{K}_{\text{Solo}_{20-40\text{cm}}}$, $\text{Na}_{\text{Solo}_{20-40\text{cm}}}$ e $\text{CO}_{\text{Solo}_{20-40\text{cm}}}$, apresentaram diferença significativa ($p < 0,05$). Para $\text{P}_{\text{Solo}_{0-20\text{cm}}}$ é verificado que sistemas exclusivos e consorciados com presença do feijão guandu apresentaram médias superiores (S1 – $1,210 \text{ kg ha}^{-1}$ e S5 – $1,293 \text{ kg ha}^{-1}$, respectivamente). Já para o K_{Solo} , o consórcio diminuiu significativamente seus estoques

independente da profundidade, enquanto para $\text{Na}_{\text{Solo}_{20-40\text{cm}}}$ e $\text{CO}_{\text{Solo}_{20-40\text{cm}}}$ a presença de palma forrageira proporcionou as maiores médias, com destaque para o sistema exclusivo ($14,5 \text{ Mg ha}^{-1}$).

Tabela 4. Médias de produtividade, estoques de água, carbono e nutrientes no solo e planta, e ranking dos sistemas de cultivo exclusivos e consorciados entre espécies forrageiras irrigadas no semiárido brasileiro. Valores médios ordenados dos maiores para os menores em escala de cores na sequência: verde escuro, verde claro, amarelo, laranja e vermelho.

Água e Carbono no solo	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
$\text{Água}_{\text{Solo}_{0-70\text{cm}}} \text{ (mm)}^{\text{ns}}$	106,275	103,432	106,272	96,08	110,625	103,175	103,2
$\text{CO}_{\text{Solo}_{0-20\text{cm}}} \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)}^{\text{ns}}$	15,37	14,842	14,853	22,227	16,434	16,806	15,266
$\text{CO}_{\text{Solo}_{20-40\text{cm}}} \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)}^{**}$	9,010 cd	8,530 d	9,592 bcd	14,556 a	11,412 b	10,859 b	10,558 bc
Nutrientes no solo	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
$\text{P}_{\text{Solo}_{0-20\text{cm}}} \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)}^{**}$	1,210 ab	0,951 c	1,033 bc	0,967 bc	1,293 a	1,082 bc	1,145 abc
$\text{K}_{\text{Solo}_{0-20\text{cm}}} \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)}^{**}$	0,446 a	0,354 ab	0,467 a	0,247 b	0,322 b	0,347 ab	0,301 b
$\text{Ca}_{\text{Solo}_{0-20\text{cm}}} \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)}^{\text{ns}}$	2,62	2,814	2,576	2,719	3,012	2,527	2,884
$\text{Mg}_{\text{Solo}_{0-20\text{cm}}} \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)}^{\text{ns}}$	1,026	1,056	0,995	1,041	1,159	0,975	1,199
$\text{Na}_{\text{Solo}_{0-20\text{cm}}} \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)}^{\text{ns}}$	0,232	0,223	0,181	0,204	0,255	0,266	0,227
$\text{SB}_{\text{Solo}_{0-20\text{cm}}} \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)}^{\text{ns}}$	23,722	24,63	23,052	23,681	26,525	22,695	26,038
$\text{P}_{\text{Solo}_{20-40\text{cm}}} \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)}^{\text{ns}}$	0,976	1,078	1,08	1,137	1,172	1,056	1,149
$\text{K}_{\text{Solo}_{20-40\text{cm}}} \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)}^{**}$	0,410 ab	0,452 a	0,496 a	0,312 c	0,303 c	0,355 bc	0,352 bc
$\text{Ca}_{\text{Solo}_{20-40\text{cm}}} \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)}^{\text{ns}}$	2,751	2,84	2,739	2,969	2,973	2,902	3,239
$\text{Mg}_{\text{Solo}_{20-40\text{cm}}} \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)}^{\text{ns}}$	1,043	1,116	1,041	1,107	1,163	1,114	1,187
$\text{Na}_{\text{Solo}_{20-40\text{cm}}} \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)}^{**}$	0,208 ab	0,150 b	0,209 ab	0,249 ab	0,256 a	0,233 ab	0,249 a
$\text{SB}_{\text{Solo}_{20-40\text{cm}}} \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)}^{\text{ns}}$	24,293	25,19	24,438	25,833	26,314	25,596	27,944
Ranking geral	7	6	5	4	2	3	1

3.3 Correlação entre o manejo de irrigação, as características físico-hídricas do solo e os estoques de água, carbono e nutrientes dos sistemas de cultivo com espécies forrageiras

A Figura 4 mostra a análise de componentes principais envolvendo as variáveis de solo e da planta dos sistemas de cultivo. Assim, foi observado que 69,39% da variação dos dados pode ser explicada em dois conjuntos de componentes. A PC1 corresponde com 49,50% de variação dos dados que apresenta alta correlação entre os sistemas GE-GE (S1); ME-ME (S2), SF15-SF15 (S3); PGI-PM-PM-PM (S4) e P2502-SF15-SF15-SF15 (S7) e as variáveis destacadas com pontos em azul. Enquanto a PC2 (19,89%) relaciona as variáveis em vermelho e os sistemas destacados em vermelho. Variáveis em verde e amarelo correspondem a PC3 e PC4, respectivamente. Analisando o resultado verifica-se que os estoques das plantas se correlacionam entre si. Além disso, é possível confirmar

que sistemas exclusivos sem presença de palma apresentam maior afinidade com o potássio no solo.

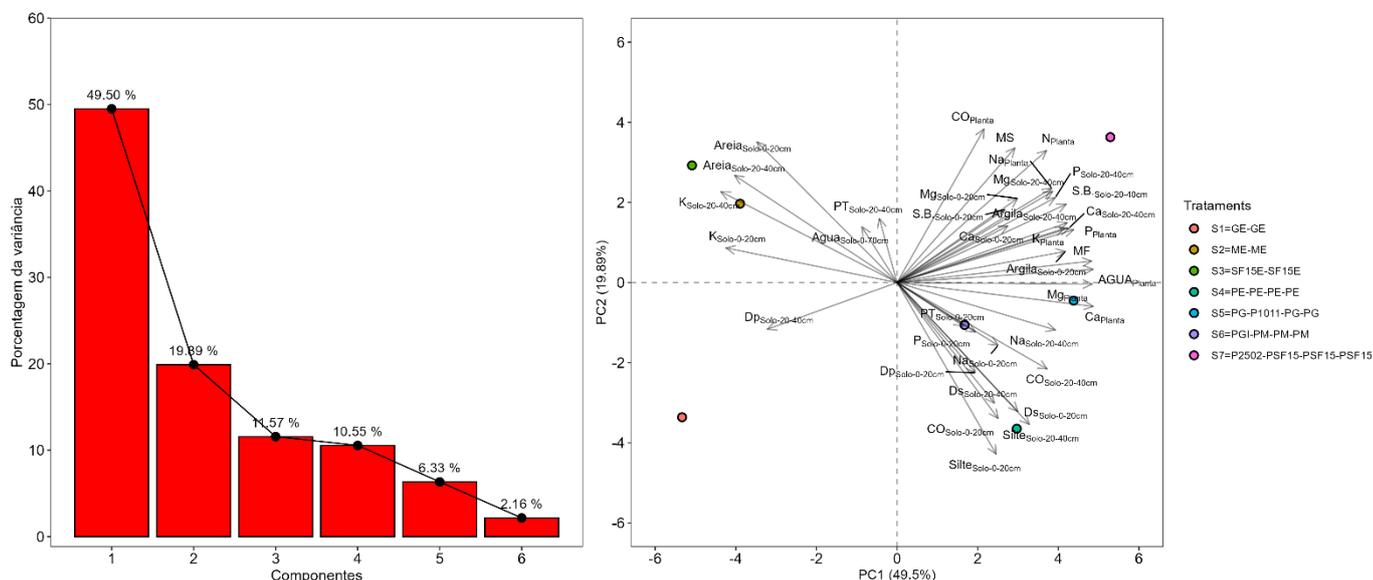


Figura 4. Análise de componentes principais (PCA) envolvendo as variáveis do solo e da planta de sistemas de cultivo com espécies forrageira.

4. DISCUSSÃO

4.1 Produtividade e estoques de água, carbono e nutrientes de sistemas produtivos com espécies forrageiras

Por se tratar de uma espécie adaptada às condições semiáridas, a palma forrageira possui alta eficiência no uso da água, o que a possibilita obter resultados produtivos superiores às demais espécies (SALVADOR et al., 2021). Isso, por sua vez, se deve às suas características morfofisiológicas e anatômicas que minimizam a perda de água e promovem absorção mesmo em quantidades inferiores, possibilitando que a planta apresente alto turgor celular (ALVES; SANTOS, 2024). Dessa forma, essas condições justificam a superioridade de MF e Água_{planta} obtidas pelos sistemas em que a cultura está presente (S4, S5, S6 e S7, figura 3a; figura 4a e tabela 3).

Quanto a MS (figura 3b e tabela3), com exceção do feijão-guandú exclusivo que obteve resultados bem inferiores, espécies gramíneas (i.e. milho – S2; e sorgo – S3) se

destacam devido ao seu teor de matéria seca (~26%) quando comparado a palma forrageira (~10%). Assim, em termos produtivos e de armazenamento de água pelo sistema, a prática do consórcio torna-se mais vantajosa ao produtor. Esses resultados corroboram com os resultados mencionados na literatura (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2023; DINIZ et al., 2017; JARDIM et al., 2021a; LIMA et al., 2018; SILVA et al., 2023). A capacidade de armazenamento de água pela cultura da palma forrageira permite ao produtor traçar planos estratégicos a fim de diminuir o consumo de água pelos animais durante as épocas secas, quando este recurso é escasso. Somado a isso, a combinação de espécies por meio do consórcio e da rotação promove a diversidade de forragem, a diminuição dos custos com a aquisição de novas fontes de alimento, a eficiência do uso da terra, e por consequência, uma maior sustentabilidade.

Ao considerar a sustentabilidade, é importante que o sistema de cultivo haja como sumidouro de carbono, além de possuir eficiência no uso dos nutrientes. Em um contexto geral, o sequestro de carbono por parte das plantas depende de seu metabolismo e de sua eficiência fotossintética (JARDIM et al., 2022). Os resultados deste estudo mostraram o estoque de carbono na planta variou conforme as espécies adotadas, sendo o milho (11,115 Mg ha⁻¹), o sorgo (18,782 Mg ha⁻¹) e a palma (10,728 Mg ha⁻¹) responsáveis pelos maiores estoques, quando comparada ao feijão-guandú (5,189 Mg ha⁻¹) (figura 4b e tabela 3). Espécies que possuem metabolismo C4 (i.e sorgo e milho) são mais eficientes ao sequestro de carbono quando comparadas a espécies C3 (i.e feijão-guandú), devido apresentarem maiores necessidades de incidência luminosa (SILVA; ALVES; ZINGARETTI, 2020). Já espécies de metabolismo CAM, são capazes de assimilar CO₂ em grande quantidade principalmente no período da noite, tornando a rota enzimática ainda mais eficiente (SALVADOR et al., 2021). Dessa forma, por possuírem mecanismos distintos, a combinação entre a palma forrageira e espécies C3 e C4, tendem a apresentar maior eficiência produtiva (SALVADOR et al., 2024) e, conseqüentemente, elevado sequestro de carbono, o que justifica os achados desse estudo.

O desenvolvimento vegetal e a assimilação de carbono estão intimamente relacionadas a absorção de água e nutrientes para as plantas (VERGUTZ et al., 2012). Quanto aos nutrientes, os sistemas possuem peculiaridades e seu potencial de extração vai depender do elemento, da conformação, da produtividade e da fenologia das espécies. Resultados de estudos envolvendo a extração de N por sistemas com feijão guandu, milho e sorgo, na forma exclusiva e consorciada, demonstraram que,

independentemente das espécies, o consórcio apresenta maior extração de N quando comparado a sistemas exclusivos (CALVO; FOLONI; BRANCALIÃO, 2010). Além disso, o estudo ainda aponta que o Feijão guandu ($21,88 \text{ g kg}^{-1}$) apresenta maior teor de N que o sorgo ($14,08 \text{ g kg}^{-1}$) e o milheto ($16,98 \text{ g kg}^{-1}$), resultado que confirma o potencial de fixação de nitrogênio por espécies leguminosas. Já para a palma forrageira, Ferraz et al. (2020) verificaram que o clone OEM possui potencial de extração em torno de 18.17 g kg^{-1} , o que justifica os altos teores desse elemento em sistemas com esse clone. Dados da literatura mostram que o consórcio envolvendo palma forrageira gera maior eficiência quanto ao uso da água, da terra, dos nutrientes e da radiação (ALVES et al., 2022a, 2022b; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2023; LIMA et al., 2018; SARAIVA et al., 2022; SILVA et al., 2023). Fato que corrobora com os resultados encontrados.

4.2 Estoques de água, carbono e nutrientes na interface solo de sistemas produtivos de espécies forrageira.

Os resultados mostram que, dentre as espécies, a palma forrageira apresenta alto potencial para estocar carbono no solo, principalmente na profundidade (20-40 cm), tornando-se uma alternativa promissora para o estabelecimento de áreas de produção de forragem. Além disso, seus resultados apresentam diferença moderada quando comparados na forma exclusiva ou consorciada, o que possibilita que o produtor possa atribuir o sistema conforme sua necessidade. Santos et al. (2024a) compararam locais com diferentes usos do solo e verificaram que o cultivo da palma forrageira obteve os maiores estoques de carbono, quando comparado a área de vegetação caatinga. Essa afirmação corrobora com os resultados encontrados por Gava et al. (2021). Entretanto, faz necessário o desenvolvimento de estudos com maiores durações. Já a ausência de diferença de $\text{CO}_{\text{Solo}_{0-20\text{cm}}}$ entre os sistemas, pode estar associado ao manejo de capina o revolvimento da terra pode ter afetado a dinâmica desse elemento. Para o estoque de K no solo, sistemas exclusivos com feijão-guandú, sorgo e milheto, se destacam quando comparados a sistemas com palma forrageira, porém a alta extração por parte desta cactácea pode ter influenciado (FERRAZ et al., 2020; SANTOS et al., 2024b).

4.3 Correlação entre o manejo de irrigação, as características físico-hídricas do solo e os estoques de água, carbono e nutrientes e ranqueamento dos sistemas

A PC1 confirmou a influência dos sistemas exclusivo de feijão-guandú (GE-GE), milho (ME-ME) e sorgo (SF15E-SF15E) com o estoque de K no solo. Por outro lado, palma-sorgo (P2502-PSF15E-PSF15E-PSF15E) e palma-milho (PGI-PM-PM-PM) demonstraram alto potencial produtivo e sustentável, visto que sistemas consorciados apresentam complementariedade e eficiência na exploração dos recursos como água, carbono e nutrientes no solo (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2023; JARDIM et al., 2021a; SALVADOR et al., 2024). Já a PC2 comprova a capacidade da palma forrageira em estocar carbono no solo e na planta. Esses resultados podem ser atribuídos a alta eficiência na utilização do carbono atmosférico e ao seu elevado desenvolvimento radicular, fazendo com que a espécie seja considerada um sumidouro de carbono (JARDIM et al., 2023).

A análise de ranqueamento representada nas tabelas 3 e 4 (mapa de calor), ordena os sistemas conforme a disposição do número de médias superiores e intermediárias. Dessa forma, é possível definir o sistema que permite equilibrar os aspectos produtivos e sustentáveis. Para este estudo, nota-se que os sistemas consorciados palma/sorgo (S7), palma/feijão-guandú (S5) e palma/milho (S6) se destacaram. Observa-se ainda que para sistemas exclusivos, a ordem segue com palma (S4), sorgo (S3), milho (S2) e feijão-guandú (S1).

5. CONCLUSÃO

Esse estudo buscou avaliar os estoques de água, carbono e nutrientes na interface solo-planta de diferentes sistemas de cultivo envolvendo espécies forrageiras adaptadas ao ambiente semiárido. Assim, conclui-se que:

- A conformação palma-sorgo apresenta o maior equilíbrio entre produtividade e os estoques de água, carbono e nutrientes;
- Entre os sistemas exclusivos: a palma forrageira é capaz de estocar as maiores quantidade de carbono orgânico no solo, enquanto o sorgo se destaca quanto ao acúmulo de carbono na planta.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALI, U. et al. Climate change impacts on agriculture sector: A case study of Pakistan. **Ciência Rural**, v. 51, n. 8, p. e20200110, 2021.
- ALVES, C. P. et al. How to enhance the agronomic performance of cactus-sorghum intercropped system: planting configurations, density and orientation. **Industrial Crops and Products**, v. 184, 2022a.
- ALVES, F. A. L.; SANTOS, D. C. Morphological and nutritional characterization of the cladodes of seven varieties of forage cactus of the genus *Opuntia* cultivated in Brazil. **South African Journal of Botany**, v. 169, p. 46–55, 2024.
- ALVES, H. K. M. N. et al. Integrated management of agronomic practices in the forage cactus: maximizing productivity, biological efficiency and economic profitability. **Journal of the Professional Association for Cactus Development**, v. 24, p. 307–329, 2022b.
- ALVES, H. K. M. N. et al. How Multiple Agricultural Production Systems Alter the Growth and Development of the Forage Cactus in a Semi-arid Environment. **Agricultural Research**, v. 13, n. 1, p. 147–159, 2024.
- ANGHINONI, G. et al. Conservation agriculture strengthen sustainability of Brazilian grain production and food security. **Land Use Policy**, v. 108, n. 105591, p. 1–9, 2021.
- ARAÚJO JÚNIOR, G. N. et al. Productivity, bromatological composition and economic benefits of using irrigation in the forage cactus under regulated deficit irrigation in a semiarid environment. **Bragantia**, v. 80, p. e1221, 2021a.
- ARAÚJO JÚNIOR, G. N. et al. Use of intercropping and mulch to improve the water and natural resources use efficiencies of forage cactus and millet production in a semiarid region. **Field Crops Research**, v. 304, p. 109171, 2023.
- ARAÚJO JÚNIOR, G. N. et al. Phenophases, morphophysiological indices and cutting time in clones of the forage cacti under controlled water regimes in a semiarid environment. **Journal of Arid Environments journal**, v. 190, n. 104510, p. 1–9, 2021b.
- BIBI, F.; RAHMAN, A. An Overview of Climate Change Impacts on Agriculture and Their Mitigation Strategies. **Agriculture (Switzerland)**, v. 13, n. 8, p. 1–15, 2023.
- CALVO, C. L.; FOLONI, J. S. S.; BRANCALIÃO, S. R. Produtividade de fitomassa e relação C/N de monocultivos e consórcios de guandu-anão, milho e sorgo em três épocas de corte. **Bragantia**, v. 69, n. 1, p. 77–86, 2010.

CARDOSO, D. B. et al. Levels of inclusion of spineless cactus (*Nopalea cochenillifera* Salm Dyck) in the diet of lambs. **Animal Feed Science and Technology**, v. 247, p. 23–31, 2019.

CHAPPELL, E., et al. Soil Organic Carbon: Past, Present, and Future Research. In: RAKSHIT, A., et al. (Eds.). **Soil Science: Fundamentals to Recent Advances**. Springer ed. Singapore: [s.n.]. p. 35–47, 2021.

DAVIDSON, E. A.; JANSSENS, I. A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. **Nature**, v. 440, p. 165–173, 2006.

DINIZ, W. J. S. et al. Forage cactus-sorghum intercropping at different irrigation water depths in the Brazilian Semiarid Region. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 52, n. 9, p. 724–733, 2017.

FERRAZ, R. L. S. et al. Estimation of productivity gain by irrigated and fertilized forage palm plants (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. and *Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck): systematic review and meta-analysis. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 11, p. 1873–1882, 2019.

FERRAZ, R. L. S. et al. Variations in soil water replacement levels promote changes in forage cactus mineral composition and biomass productivity. **Ambiente e água**, v. 15, n. 5, p. e2537, 2020.

GAVA, C. A. T. et al. Land- use change alters the stocks of carbon, nitrogen, and phosphorus in a Haplic Cambisol in the Brazilian semi- arid region. **Soil use and management**, v.38, p. 1–11, 2021.

JARDIM, A. M. R. F. et al. Interaction of agroecosystem intercropped with forage cactus-sorghum in the semi-arid environment: a review. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 5, n. 1, p. 069–087, 2020.

JARDIM, A. M. R. F. et al. Intercropping forage cactus and sorghum in a semi-arid environment improves biological efficiency and competitive ability through interspecific complementarity. **Journal of Arid Environments**, v. 188, p. 104464, 2021a.

JARDIM, A. M. R. F. et al. Understanding interactive processes: a review of CO₂ flux, evapotranspiration, and energy partitioning under stressful conditions in dry forest and agricultural environments. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, p. 1–22, 2022.

JARDIM, A. M. R. F. et al. Sink or carbon source? how the *Opuntia* cactus agroecosystem interacts in the use of carbon, nutrients and radiation in the Brazilian semi-arid region. **Journal of Hydrology**, v. 625, p. 130121, 2023.

JARDIM, A. M. R. F. et al. Genotypic differences relative photochemical activity, inorganic and organic solutes and yield performance in clones of the forage cactus under semi-arid environment. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 162, p. 421–430, 2021b.

LIMA, L. R. et al. Growth, water use and efficiency of forage cactus sorghum intercropping under different water depths. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 113–118, 2018.

MARKOU, M. et al. Addressing climate change impacts on agriculture: Adaptation measures for six crops in Cyprus. **Atmosphere**, v. 11, n. 5, p. 1–15, 2020.

MIRZAEI, S.; KAHRIZI, D.; SHAH HASSAN, S. Climate change impacts on agriculture and food security; a global overview. **Central Asian Journal of Environmental Science and Technology Innovation**, v. 5, p. 184–197, 2021.

NHEMACHENA, C. et al. Climate change impacts on water and agriculture sectors in southern África: Threats and opportunities for sustainable development. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 10, p. 1–17, 2020.

QUEIROZ, M. G. et al. Spatial and temporal dynamics of soil moisture for surfaces with a change in land use in the semi-arid region of Brazil. **Catena**, v. 188, 2019, p. 104457, 2020.

QUEIROZ, M. G. et al. Relações hídrico-econômicas da palma forrageira cultivada em ambiente semiárido. **Irriga**, v. Edição esp, p. 141–154, 2016.

SALVADOR, K. R. S. et al. Intercropping impacts growth in the forage cactus, but complementarity affords greater productivity, competitive ability, biological efficiency and economic return. **Agricultural Systems**, v. 218, p. 103958, 2024.

SALVADOR, K. R. S. et al. Intensificação de sistemas de produção de palma forrageira por meio de consorciação rotativa com gramíneas, leguminosas e oleaginosas: uma revisão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 04, p. 2322–2343, 2021.

SANTOS, W. R. et al. Carbon and nutrient dynamics in landscapes under different levels of anthropogenic intervention in the semi-arid region of Brazil. **Ecosystems and Environment**, v. 368, p. 109020, 2024a.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5^a ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018.

SANTOS, J. P. A. S. et al. Morphophysiological responses, water, and nutritional performance of the forage cactus submitted to different doses of nitrogen. **Field Crops Research**, v. 308, p. 109273, 2024b.

- SARAIVA, F. M. et al. Performance of Forage Cactus Intercropped with Arboreal Legumes and Fertilized with Different Manure Sources. **Agronomy**, v. 12, n. 8, 1 ago. 2022.
- SHRESTHA, R. et al. Farmers' Perception of Climate Change and Its Impacts on Agriculture. **Hydrology**, v. 9, n. 12, 2022.
- SILVA, R. G.; ALVES, R. C.; ZINGARETTI, S. M. Increased [CO₂] Causes Changes in Physiological and Genetic Responses in C 4 Crops: A Brief Review. **Plants**, v. 9, n. 11, p. 1567, 2020.
- SILVA, T. G. F. et al. Profitability of using irrigation in forage cactus-sorghum intercropping for farmers in semi-arid environment. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 2, p. 132–139, 2023.
- SOUZA, M. S. et al. Improving productivity and water use efficiency by intercropping cactus and millet. **Irrigation and Drainage**, v. 72, n. 4, p. 982–998, 2023a.
- SOUZA, M. S. et al. Forage yield, competition and economic benefit of intercropping cactus and millet with mulch in a semi-arid environment. **African Journal of Range and Forage Science**, v. 40, n. 2, p. 219–230, 2023b.
- VERGUTZ, L. et al. Global resorption efficiencies and concentrations of carbon and nutrients in leaves of terrestrial plants. **Ecological Monographs**, v. 82, n. 2, p. 205–220, 2012.
- YANARDAĞ, İ. H. et al. Evaluation of carbon and nitrogen dynamics in different soil types amended with pig slurry, pig manure and its biochar by chemical and thermogravimetric analysis. **Biol Fertil Soils**, v. 51, p. 183–196, 2015.

CAPÍTULO 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do cenário das mudanças climáticas, a adoção de sistemas de cultivo com espécies adaptadas (i.e. caso da palma forrageira, do sorgo, do milho, do feijão guandu e do girassol) é considerada uma das principais estratégias para maximizar a produção e mitigar as consequências do efeito estufa. Nesse estudo, foi possível observar que a adoção de práticas resilientes (i.e. irrigação, consórcio e adubação) não só garantem a sustentabilidade agrícola, mas também contribuem significativamente para a redução das emissões de gases que potencializam as adversidades climáticas.

A palma forrageira, em particular, desempenha um papel crucial como sumidouro de carbono. Sua eficiente capacidade de sequestrar e armazenar este elemento, seja no solo ou em seus tecidos, faz da cultura uma alternativa promissora para a produção de forragem ecologicamente eficiente. Além disso, se tratando de regiões de clima semiárido, onde há limitações na disponibilidade de água, a palma promoveu resultados significativos mesmo quando submetida a baixos níveis de reposição hídrica (tratamentos com maiores valores de carbono no solo). Porém, vale ressaltar a importância da realização de estudos mais detalhados, visto que a precipitação pluviométrica ocorrida durante o período experimental superou a média histórica local. Fato que pode ter interferido no desempenho produtivo da cultura, que por sua vez, não apresentou diferenças entre as lâminas aplicadas. Enquanto lâminas superiores elevaram os teores de sais nas camadas superficiais do solo.

Já para o fator clone, independente das espécies, a palma forrageira promove o estoque de carbono nas camadas superficiais do solo (0-20 cm e 20-40 cm), podendo ser indicada para projetos de restauração de áreas degradadas. Porém, a escolha da espécie depende de suas características produtivas. O clone Orelha de Elefante Mexicana (OEM), pertencente ao gênero *Opuntia*, se sobressai em aspectos de rendimentos e de estoques de água, carbono e nutrientes na planta, enquanto a Ipa-Sertânea e a Miúda não diferem entre si. Logo, essas variáveis são influenciadas diretamente pelas características intrínsecas a cada gênero, que é justificada pela semelhança entre os últimos dois clones.

Nessa perspectiva, viu-se ainda que a consorciação entre o clone OEM com o sorgo, o milho e o feijão guandu potencializam a produtividade, aumentam a eficiência no uso dos recursos (i.e. água, nutriente e terra) e os estoques de água, carbono e nutrientes na planta e no solo quando comparados a sistemas em arranjo solteiro. Dessa forma, com base nos resultados, vê-se que o manejo hídrico com aplicações de lâminas moderadas e

a conformação do cultivo consorciado podem não só promover a resiliência dos ecossistemas semiáridos, mas também contribuir para a saúde ambiental global, reforçando a importância de políticas e práticas agrícolas que priorizem a sustentabilidade e a conservação dos recursos naturais.