UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DE SERRA TALHADA
CURSO DE AGRONOMIA

THAUANA MILENA DA SILVA

DESEMPENHO AGRONÔMICO, EVAPOTRANSPIRAÇÃO E INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA DURANTE DOIS CICLOS SUCESSIVOS DE MILHETO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

SERRA TALHADA-PE
2026

THAUANA MILENA DA SILVA

DESEMPENHO AGRONÔMICO, EVAPOTRANSPIRAÇÃO E INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA EM DOIS CICLOS SUCESSIVOS DE MILHETO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de bacharelado em Agronomia da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Agrônoma.

Orientador: Prof. Dr. Thieres George Freire da Silva

SERRA TALHADA-PE

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário: Danilo Trindade Barbosa – CRB – 4 2285

S586d Silva, Thauana Milena da

Desempenho agronômico, evapotranspiração e indicadores de eficiência do uso da água durante dois ciclos sucessivos de milheto no semiárido brasileiro / Thauana Milena da Silva. – Serra Talhada, 2026.

53 f. il.

Orientador (a): Thieres George Freire da Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica Serra Talhada - UAST, Bacharelado em Agronomia, Serra Talhada, PE- BR, 2026.

Inclui referências, anexo(s) e apêndice(s).

THAUANA MILENA DA SILVA

DESEMPENHO AGRONÔMICO, EVAPOTRANSPIRAÇÃO E INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA EM DOIS CICLOS SUCESSIVOS DE MILHETO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de bacharelado em Agronomia da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Agrônoma.

Aprovado em:11/02/2026

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Thieres George Freire da Silva (orientador)
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

_____

MSc. Lady Daiane Costa de Sousa Martins
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

_____

MSc. João Pedro Alves de Souza Santos.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS

Primeiramente a Deus, pois se não fosse ele eu não teria chegado até aqui. Segundamente a mim mesma por ter consigo trilhar essa longa caminhada, mesmo com tantas pedras no caminho.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, que por muitas vezes enxugou as minhas lágrimas, ouviu minhas orações e me levantava sempre que eu caia, colocando pessoas abençoadas e usadas por ele para me ajudar continuar essa jornada, cumprindo sua palavra que diz: “Consagre ao Senhor tudo o que faz, e os seus planos serão bem-sucedidos” - Provérbios 16:3.

A minha família, em especial a minha avó Izabel, que me criou e mesmo sem entender, me deu suporte sempre que podia. A tia Islândia e tia Robevânia que além de tias, fazem o papel de uma mãe na minha vida e tio Ideginaldo, pelos conselhos, me apoiar e por todo amor que dá, crescemos juntos e nossa conexão é de pai e filha, entre outros que direto ou indiretamente estavam comigo.

Aos meus amigos que iniciaram a graduação comigo e, mesmo eu ficando para trás, continuaram torcendo por mim. Ás mulheres: Elizabety Lima, Luzia Mikaele, Islla Mikaelly, Denise Ramos e Aline Amaral e aos homens: Neurisvaldo Alves, Enzo Viana e Matheus Santana, com os quais tenho vínculo até hoje e me ajudaram nessa jornada até o fim, mesmo alguns estando distantes. E aos meus colegas e amigos que encontrei durante meu retorno que foram essenciais durante ao resto do processo, acolhendo-me: Natanael Lucena, Elenide Vanessa, Gabrielle Siqueira, Emílio Gabriel, Cintya Fausto, Vivian Soraya, Geovane Almeida, Ednaete e aos demais. A todos vocês, obrigada por vários momentos que ajudaram a tornar essa vida acadêmica, e até pessoal, mais leve. Compartilhamos conhecimentos, perrengues, choro e muitas risadas, que ajudaram a aliviar toda a pressão que o universitário carrega.

Ás minhas amigas, Cinthia Vitória (e a sua família), Jackeline Nogueira, Eduarda Nascimento e Vanessa Santos. Obrigado por me estenderem a mão, cuidarem de mim e por me proporcionarem boas memórias e muitas alegrias, cada uma da sua maneira. Sou grata por serem pessoas com quem sei que posso contar, e saibam que vocês podem contar comigo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Thieres George Freire da Silva e ao Grupo GAS, com os qual obtive vários aprendizados que vou levar para a vida.

A Universidade Federal de Pernambuco- UFRPE UAST, e todos que fazem parte dela, por me possibilitarem ser a primeira da família a ter uma graduação.

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	10
2	**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**	13
2.1	CARACTERIZAÇÃO EDAFOCLIMÁTICA E IMPLICAÇÕES DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO	13
2.2	ESTRATÉGIAS DE ADAPTAÇÃO AGRÍCOLA AO DÉFICIT HÍDRICO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: MANEJO E USO DE FORRAGEIRAS ADAPTADAS	15
2.2.1	**Práticas agronômicas de adaptação ao déficit hídrico**	15
2.2.2	**Forrageiras adaptadas e potencial do milheto no Semiárido brasileiro**	16
2.2.3	**Desenvolvimento fenológico do milheto e implicações para manejo**	16
2.2.4	**Tolerância do milheto à salinidade e uso de águas salobras na irrigação**	17
2.3	ÉPOCA DE CULTIVO, PRODUTIVIDADE E BALANÇO HÍDRICO DO SOLO	18
2.3.1	**Balanço hídrico do solo: definição, equação e componentes**	20
2.3.2	**Armazenamento no solo, água disponível e déficit hídrico acumulado**	21
2.4	DEMANDA HÍDRICA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO MANEJO DA IRRIGAÇÃO	21
2.5	EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA	23
3	**OBJETIVOS**	26
3.1	GERAL	26
3.2	ESPECÍFICOS	26
4	**METODOLOGIA**	27
4.1	ÁREA DE ESTUDO	27
4.2	DESIGN E TRATAMENTOS	28
4.3	PROCEDIMENTOS DE CONDUÇÃO	28
4.4	DADOS COLETADOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS	30
4.4.1	**Umidade volumétrica do solo (θ) e instrumentação**	30
4.4.2	**Avaliações biométricas do milheto**	31
4.5	BALANÇO DE ÁGUA NO SOLO	31
4.6	ÍNDICES HÍDRICOS	33

4.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS 34
5 RESULTADOS 35
5.1 CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DO MILHETO EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE CULTIVO 35
5.2 PRODUTIVIDADE FORRAGEIRA DO MILHETO EM DUAS ÉPOCAS DE CULTIVO 36
5.3 DINÂMICA DO BALANÇO HÍDRICO DO SOLO 37
5.4 INDICADORES DE EFICIÊNCIA NO USO DA ÁGUA 39
6 DISCUSSÃO 40
6.1 CRESCIMENTO VEGETATIVO E PRODUTIVIDADE DO MILHETO EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE CULTIVO E DO CICLO, PLANTA E REBROTA 40
6.2 DINÂMICA HÍDRICA DO SOLO E BALANÇO HÍDRICO ENTRE ÉPOCAS DE CULTIVO 41
6.3 EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA E PRODUTIVIDADE HÍDRICA 43
7 CONCLUSÃO 44
REFERÊNCIAS 45

RESUMO

O estudo avalia a resposta produtiva e hídrica da cultura conduzida em dois ciclos sucessivos, planta e rebrota, sob condições de irrigação biossalina, comparando dois períodos do ano, com contrastes meteorológicos marcantes. O experimento foi realizado no Centro REF, UFRPE/UAST, em Serra Talhada, Pernambuco, em delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições, utilizando a cultivar IPA-Bulk-1. A semeadura ocorreu em 26/01/2023, com cortes em 11/04/2023 e 26/06/2023. A irrigação foi por gotejamento, três vezes por semana, com água de condutividade elétrica média de 1,6 dS m^{-1}. A demanda atmosférica foi estimada pelo método FAO Penman–Monteith, e a evapotranspiração real foi obtida como termo residual do balanço de água no solo, em volume de controle de 0,60 m, com monitoramento de umidade por sonda capacitiva. Observou-se maior expressão morfoestrutural e produtiva no ciclo de verão, com produtividade de matéria fresca e seca de 23,8 e 4,7 Mg ha^{-1}, respectivamente, enquanto no outono os valores foram 9,1 e 1,7 Mg ha^{-1}. O consumo hídrico acumulado foi superior no verão (ET_r 524,53 mm) em relação ao outono (364,10 mm). Os indicadores de produtividade da água foram maiores no verão, com PACET de 1,12 kg m^{-3}, PACP+I de 0,98 kg m^{-3} e PACI de 1,99 kg m^{-3}, enquanto no outono registraram-se 0,44, 0,37 e 0,74 kg m^{-3}, respectivamente. Conclui-se que a época de cultivo condiciona a conversão de água em biomassa e deve orientar o planejamento de manejo do cultivo e da irrigação.

Palavras-chave: balanço hidrico; evapotraspiração; Pennisetum glaucum (L.) R.Br.; índices hidricos.

ABSTRACT

The study evaluates the productive and water-related responses of the crop grown in two successive cycles, plant crop and regrowth, under biosaline irrigation conditions, comparing two periods of the year with marked meteorological contrasts. The experiment was carried out at the REF Center, UFRPE/UAST, in Serra Talhada, Pernambuco, Brazil, using a randomized complete block design with four replications and the cultivar IPA-Bulk-1. Sowing took place on 01/26/2023, and harvests were performed on 04/11/2023 and 06/26/2023. Drip irrigation was applied three times a week using water with a mean electrical conductivity of 1.6 dS m^{-1}. Atmospheric demand was estimated using the FAO Penman–Monteith method, and actual evapotranspiration was obtained as the residual term of the soil water balance, considering a 0.60 m control depth, with soil moisture monitored by a capacitance probe. Greater morphostructural development and productivity were observed in the summer cycle, with fresh and dry matter yields of 23.8 and 4.7 Mg ha^{-1}, respectively, whereas in autumn the values were 9.1 and 1.7 Mg ha^{-1}. Cumulative water consumption was higher in summer (ET_r 524.53 mm) than in autumn (364.10 mm). Water productivity indicators were higher in summer, with PACET of 1.12 kg m^{-3}, PACP+I of 0.98 kg m^{-3}, and PACI of 1.99 kg m^{-3}, while in autumn the values were 0.44, 0.37, and 0.74 kg m^{-3}, respectively. It is concluded that the growing season determines the conversion of water into biomass and should guide crop and irrigation management planning.

Keywords: water balance; evapotranspiration; Pennisetum glaucum (L.) R.Br.; water indices.

1 INTRODUÇÃO

O Semiárido brasileiro (SAB) é caracterizado por irregularidade pluviométrica e longos períodos de estiagem, condições que afetam processos edáficos, meteorológicos e hidrológicos, com implicações diretas na agricultura de sequeiro e na agricultura irrigada. Em sistemas pecuários, essas limitações repercutem de modo imediato na oferta de forragem, sobretudo nos intervalos de menor disponibilidade hídrica, quando a produção de biomassa tende a se reduzir e a estabilidade alimentar dos rebanhos é comprometida. Esse cenário amplia a vulnerabilidade socioeconômica, especialmente em sistemas de base familiar, e exige estratégias técnicas orientadas à adaptação e à eficiência do uso de recursos.

A mitigação desse problema demanda organização do sistema produtivo em torno de soluções complementares. Entre elas, destacam-se o planejamento da época de cultivo, o manejo do solo com foco em conservação e retenção hídrica, o uso racional da irrigação, quando disponível, e o melhoramento vegetal. Nesse conjunto, a adoção de culturas adaptadas às restrições do Semiárido assume papel central, pois permite reduzir riscos produtivos e sustentar a produção forrageira em condições ambientais desafiadoras (Borba *et al*., 2023; FAO, 2025; Rufino; Oliveira; Dias, 2025).

Nesse contexto, o milheto, ou *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br., tem se destacado como alternativa promissora para sistemas forrageiros, por associar adaptação a ambientes quentes e tolerância relativa ao déficit hídrico, com potencial para produção de biomassa e uso na alimentação animal. Por se tratar de gramínea de metabolismo fotossintético C4, a cultura tende a apresentar eficiência fisiológica superior em condições de alta radiação e temperatura, características frequentes no Semiárido, o que favorece o acúmulo de fitomassa quando o manejo hídrico e nutricional é adequado.

Trata-se de cultura de ciclo curto e precoce, com ampla adaptação edáfica e aptidão para produção de grãos e forragem, com potencial de produção de biomassa reportado na literatura em valores da ordem de 21,8–48,4 Mg ha^{-1} de massa verde e 5,8–12,1 Mg ha^{-1} de matéria seca, em dois cortes (Oliveira *et al*., 2025).

Nos sistemas produtivos de grãos no Brasil, o milheto é utilizado com frequência na safrinha e tem ganhado espaço com a expansão do plantio direto e com o fortalecimento das cadeias da pecuária de corte e de leite (Firmiano, 2021). Vasconcelos *et al*. (1999) destacam que, por apresentar sistema radicular profundo, o milheto pode explorar camadas subsuperficiais e contribuir para a ciclagem de nutrientes, com extração e posterior devolução ao solo via decomposição da palhada.

Nessa perspectiva, a cultura pode atuar como componente de melhoria do sistema, especialmente quando a produção de palhada e a ciclagem são quantificadas em cerca de 7,1 t ha^{-1} de matéria seca, com acúmulo aproximado de 122 kg ha^{-1} de N, 16 kg ha^{-1} de P, 124 kg ha^{-1} de K, 26 kg ha^{-1} de Ca e 17 kg ha^{-1} de Mg (magnésio), reforçando a relevância agronômica do milheto em ambientes de menor fertilidade (EMBRAPA, 2016).

Apesar da tolerância ao déficit hídrico, o milheto pode apresentar alterações no desenvolvimento e na produtividade, o que reforça a necessidade de estratégias de manejo que assegurem desempenho agronômico em condições restritivas (Frasca; Moraes Filho; Azevedo, 2020).

Frasca, Moraes Filho e Azevedo (2020), ao avaliarem cultivares de milheto submetidos a diferentes lâminas de irrigação, observaram que o aumento da disponibilidade hídrica não promoveu incrementos significativos em determinadas características agronômicas, evidenciando tolerância ao estresse hídrico. Os autores registraram alturas médias de 124 cm e 113 cm para os cultivares ADR 300 e ADR 500, respectivamente, além de produtividade de grãos entre 1,005 e 1,300 Mg ha^{-1}, mesmo sob restrição hídrica.

Ademais, Oresca *et al*. (2021) verificaram que, em estresse salino, a adubação nitrogenada elevou a altura de plantas de aproximadamente 135cm para até 175cm e aumentou a produção de matéria seca de 6,2 para 9,4 t ha^{-1}, indicando que o manejo nutricional pode atenuar efeitos do estresse e sustentar o desempenho agronômico da cultura.

Embora os ganhos potenciais com irrigação sejam relevantes, o seu uso no SAB deve ser orientado por estratégias de eficiência hídrica, considerando a limitação de recursos naturais e a vulnerabilidade regional a condições climáticas adversas. A ET_0, indicadora da demanda atmosférica potencial, é elevada no Nordeste brasileiro, associada ao déficit de chuva e às altas temperaturas médias, o que intensifica a demanda por água no período seco (Cabral Júnior; Bezerra; Guedes, 2018).

Estimativas em perímetros irrigados do SAB indicam que, em diferentes épocas de cultivo, a ET_0 pode variar de aproximadamente 5,4 a 6,1 mm dia^{-1}, evidenciando que a demanda atmosférica se altera ao longo do tempo e deve ser considerada no manejo da irrigação (Silva *et al*., 2012). Diante desse cenário, a redução do consumo de água na agricultura torna-se prioridade, e, para ampliar a eficiência do uso da água em sistemas irrigados, é essencial compreender a demanda hídrica das plantas, orientar a reposição e minimizar perdas por lixiviação (Ausiku *et al*., 2025).

Avanços nos estudos são necessários sobre evapotranspiração, desempenho agronômico, componentes do balanço de água no solo e indicadores de eficiência do uso da

água em cultivos de milheto sob condições de semiárido, com foco em delineamentos que contemplem ciclos sucessivos de planta e rebrota em épocas de cultivo distintas. Essa lacuna é relevante porque a adoção de práticas agrícolas mais eficientes pode elevar a produção ao mesmo tempo em que promove o uso racional da terra e da água (Pereira *et al*., 2023).

Parte-se da hipótese de que o crescimento, a produtividade, a evapotranspiração real (ET) e os indicadores de eficiência do uso da água e de produtividade da água do milheto variam significativamente em função das diferenças entre os períodos de cultivo, verão e outono, no Semiárido brasileiro, em razão de alterações nas condições climáticas, especialmente radiação solar, temperatura e disponibilidade hídrica, resultando em respostas ecofisiológicas associadas às relações hídricas do sistema solo–planta–atmosfera e em respostas morfoestruturais e produtivas distintas entre os ciclos de planta e rebrota.

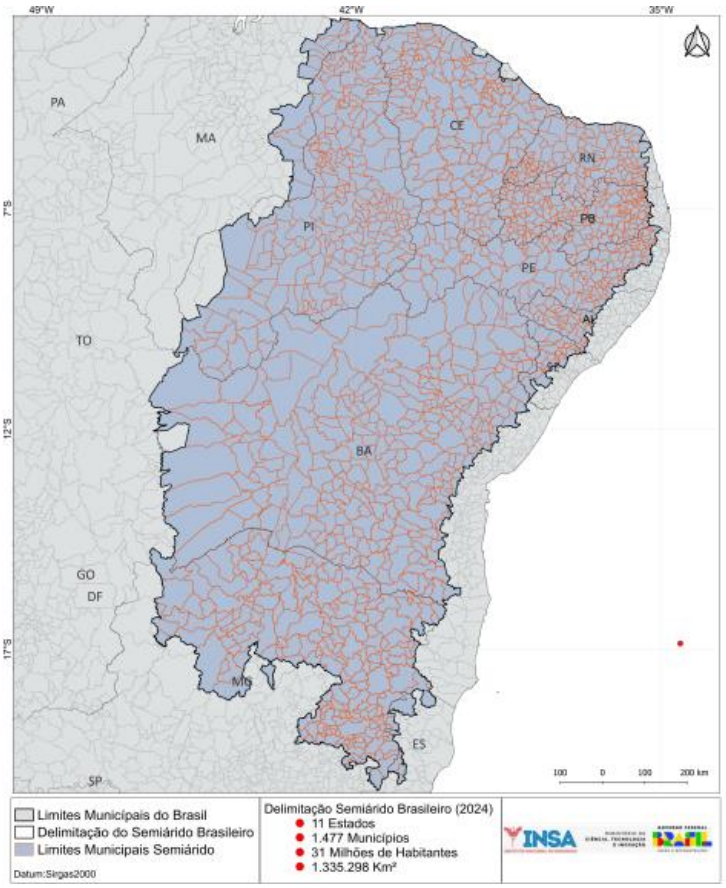
No presente estudo, as respostas ecofisiológicas são abordadas de forma indireta, por meio da evapotranspiração de referência (ET_0), estimada pelo método de Penman–Monteith, da evapotranspiração real (ET), obtida como termo residual do balanço de água no solo, e dos indicadores EUA, PACET, PACP+I e PACI, calculados a partir do rendimento e dos volumes de água consumidos e aplicados. Não são realizadas mensurações diretas de parâmetros fisiológicos foliares, como taxa fotossintética, condutância estomática, fluorescência da clorofila e potencial hídrico foliar (Allen *et al*., 1998; Venancio *et al*., 2019; Kijne *et al*., 2003; Rodrigues; Pereira, 2009; Fernández *et al*., 2020).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARACTERIZAÇÃO EDAFOCLIMÁTICA E IMPLICAÇÕES DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

As regiões semiáridas ocupam parcela expressiva do território mundial e concentram populações numerosas, além de apresentarem elevada sensibilidade à variabilidade climática, com reflexos diretos na estabilidade produtiva de sistemas agrícolas e pecuários (Santos *et al*., 2023; Saldivia-Tejeda *et al*., 2024). Nessas áreas, a irregularidade das chuvas e a elevada demanda atmosférica por água ampliam o risco de perdas de produtividade e restringem o planejamento agrícola, sobretudo em sistemas com baixa capacidade de armazenamento hídrico e menor acesso a tecnologias de manejo (Moreira *et al*., 2015).

Figura 1 – Delimitação do Semiárido Brasileiro (2024)



Fonte: INSA (2024).

A delimitação ilustrada na Figura 1 evidencia a abrangência territorial do SAB e sua distribuição em diferentes unidades federativas, ressaltando que o recorte não se limita a um único bioma ou a um único tipo de paisagem. Essa heterogeneidade espacial implica variações locais de clima e solo, com impactos sobre a aptidão agrícola, a disponibilidade de água e o risco produtivo, aspectos centrais para a análise de sistemas agropecuários em ambientes de semiárido (Rufino; Oliveira; Dias, 2025; INSA, 2024).

Do ponto de vista climático, o SAB é marcado por temperaturas elevadas, chuvas concentradas em poucos meses e um prolongado período seco, com precipitações médias anuais frequentemente inferiores a 800 mm, associadas a alta evapotranspiração potencial e balanço hídrico predominantemente negativo (Alvares *et al*., 2013; Moura *et al*., 2019). Importa destacar que o SAB não é homogêneo quanto à classificação climática de Köppen, pois há um mosaico de classes no Nordeste brasileiro, embora haja predominância de condições de clima semiárido quente, frequentemente representadas pelo tipo BSh em extensas áreas do interior (Alvares *et al*., 2013). Em termos meteorológicos, valores elevados de evapotranspiração potencial, próximos de 2.000 mm ano^{-1} e umidade relativa média próxima a 50%, ajudam a explicar a intensidade do déficit hídrico regional e suas implicações sobre a produção agropecuária (Moura *et al*., 2019; Jardim *et al*., 2021).

Quanto ao componente edáfico, predominam ambientes com elevada variabilidade de solos, frequentemente rasos ou com baixa profundidade efetiva, com ocorrência de pedregosidade e baixa matéria orgânica, condições que limitam a retenção e a disponibilidade de água às plantas, especialmente quando associadas a relevo e baixa cobertura do solo (INSA, 2024; Moura *et al*., 2019). Em áreas específicas, a salinização e a sodicidade, favorecidas por condições climáticas secas e por práticas inadequadas de manejo hídrico, podem comprometer a estrutura do solo, reduzir infiltração, restringir o crescimento radicular e, consequentemente, diminuir a produtividade agrícola (Saldivia-Tejeda et al., 2024). Assim, mais do que uma característica única, o SAB reúne combinações de clima e solo que, em conjunto, condicionam a dinâmica hídrica no perfil e a resposta das culturas ao déficit hídrico.

As implicações agropecuárias dessas condições incluem maior variabilidade de rendimento entre safras, redução da estabilidade de produção em sistemas de sequeiro e maior dependência de estratégias de manejo que minimizem o risco produtivo. Em sistemas dependentes de chuva, períodos prolongados de estiagem tendem a reduzir a disponibilidade de biomassa vegetal e a qualidade do alimento ofertado aos rebanhos, exigindo alternativas técnicas para sustentação do sistema produtivo (Moreira *et al*., 2015; Bondaruk *et al*., 2022). A adoção de espécies adaptadas, aliada a práticas que elevem a diversidade e o valor nutricional

da dieta animal, constitui medida relevante para a resiliência dos sistemas pecuários, com efeitos também sobre a sustentabilidade do uso do solo, especialmente em cenários de maior recorrência de eventos climáticos extremos (Salvador *et al*., 2022; Saldivia-Tejeda *et al*., 2024).

Diante desse contexto, torna-se necessária a adoção de estratégias adaptativas integradas, envolvendo planejamento da época de cultivo, conservação do solo, uso racional da água e escolha de culturas e sistemas de produção compatíveis com as limitações edafoclimáticas do SAB. Essa abordagem é fundamental para reduzir vulnerabilidades, ampliar a eficiência no uso de recursos e sustentar a produção agropecuária em ambiente de semiárido (INSA, 2024; Rufino; Oliveira; Dias, 2025).

2.2 ESTRATÉGIAS DE ADAPTAÇÃO AGRÍCOLA AO DÉFICIT HÍDRICO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: MANEJO E USO DE FORRAGEIRAS ADAPTADAS

A escassez hídrica constitui um dos principais obstáculos à produção agrícola em regiões áridas e semiáridas, afetando tanto sistemas de sequeiro quanto áreas irrigadas, com impacto direto sobre a estabilidade produtiva e o rendimento das culturas. Nesse cenário, ampliar a eficiência do uso da água (EUA) torna-se objetivo central, uma vez que parte das estratégias de manejo consiste em adequar a lâmina aplicada à demanda real da cultura. Quando a aplicação de água ocorre abaixo da evapotranspiração da cultura (ET_c), prática conhecida como irrigação deficitária, busca-se racionalizar o uso do recurso hídrico, reduzindo perdas e priorizando fases fenológicas mais sensíveis, desde que o estresse imposto não comprometa a produtividade em níveis indesejáveis (Alharbi *et al*., 2024; Allen *et al*., 1998).

2.2.1 Práticas agronômicas de adaptação ao déficit hídrico

Diversas práticas de manejo contribuem para reduzir efeitos do déficit hídrico e elevar a eficiência produtiva em ambientes de semiárido. Entre elas, destacam-se a irrigação estrategicamente planejada, o uso de cobertura morta, o consórcio de culturas, o ajuste de espaçamento e densidade de semeadura, além da orientação de cultivo, medidas que podem melhorar o aproveitamento de água no solo, reduzir evaporação e favorecer o acúmulo de biomassa, conforme o sistema produtivo e o objetivo da exploração (Maia *et al*., 2016; Alves *et al*., 2023; Alharbi *et al*., 2024). Em conjunto, essas estratégias são mais efetivas quando associadas ao planejamento da época de cultivo e à seleção de espécies compatíveis com as restrições edafoclimáticas do Semiárido brasileiro.

2.2.2 Forrageiras adaptadas e potencial do milheto no Semiárido brasileiro

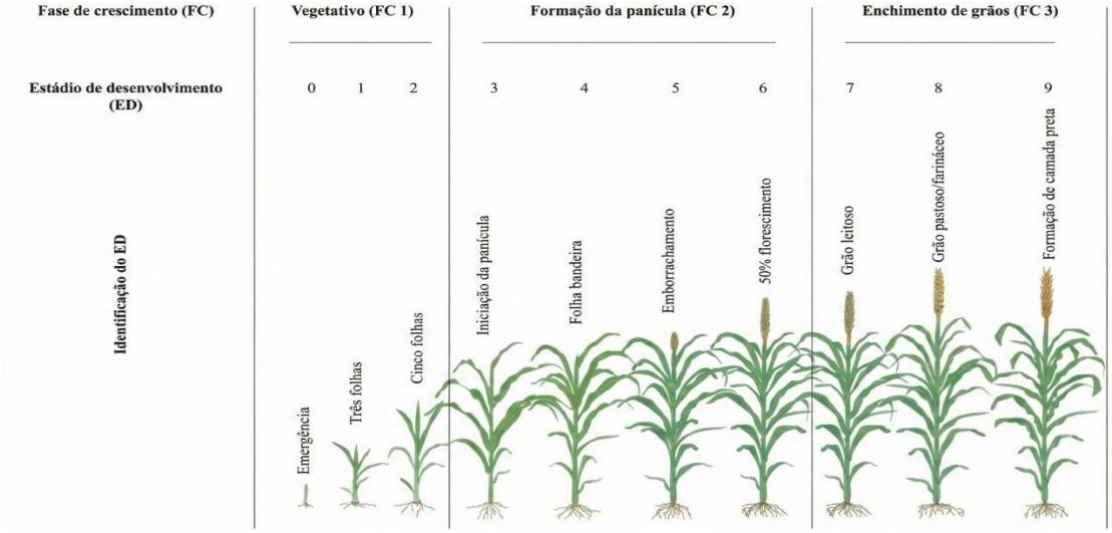
Na literatura, diferentes culturas forrageiras são indicadas como alternativas de adaptação ao clima do Semiárido brasileiro, como palma forrageira (Opuntia spp. e *Nopalea* spp.), pornunça (*Manihot* sp.) e gramíneas adaptadas, em razão de sua maior tolerância ao déficit hídrico e da capacidade de sustentar oferta de biomassa em ambientes de maior variabilidade hídrica (Jardim *et al*., 2021; Moura *et al*., 2020; Diniz *et al*., 2017). Entre as gramíneas, o milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) se destaca por ser espécie anual de metabolismo C4, com elevada capacidade de produção de biomassa e desempenho satisfatório sob menor disponibilidade hídrica, sendo opção relevante para sistemas forrageiros em ambientes semiáridos (Santos *et al*., 2025).

Como exemplo, a cultivar IPA Bulk 1 tem sido reportada como material de elevada eficiência do uso da água, com sistema radicular vigoroso e boa capacidade de rebrota, além de aceitabilidade pelos animais e qualidade de forragem. Há registros de produtividade de matéria seca da ordem de 14 Mg ha^{-1} ano^{-1}, associada a baixa incidência de pragas, características que reforçam seu potencial para uso forrageiro em condições restritivas (Monteiro, 2021; Silva *et al*., 2020). Essa cultivar foi desenvolvida pelo Instituto Agronômico de Pernambuco (IPA) com foco na adaptação às condições do Semiárido brasileiro, com maior estabilidade produtiva e tolerância ao estresse hídrico quando comparada a materiais avaliados em ambientes menos limitantes (Bezerra *et al*., 2011).

2.2.3 Desenvolvimento fenológico do milheto e implicações para manejo

O desenvolvimento do milheto ocorre em fases fenológicas bem definidas, iniciando-se com a emergência, avançando pelo crescimento vegetativo e culminando nas fases reprodutivas, como florescimento e enchimento de grãos, etapas determinantes para a expressão do potencial produtivo. A compreensão dessas fases é essencial para o manejo em ambientes semiáridos, pois fatores como disponibilidade hídrica, temperatura e fotoperíodo podem alterar a duração do ciclo e comprometer a produtividade (EMBRAPA, 2016) (Figura 2).

Figura 2 – Representação esquemática das fases de crescimento e do desenvolvimento fenológico da cultura do milheto (*Pennisetum glaucum*).



Fonte: EMBRAPA (2016).

A Figura 2 sintetiza a sequência de estádios de desenvolvimento da cultura e permite compreender por que o ajuste do manejo, especialmente hídrico e nutricional, deve ser compatível com a fase fenológica. Em termos práticos, o conhecimento dessas fases orienta o planejamento de cortes, a reposição hídrica e a condução da rebrota, especialmente quando se busca maximizar produção de biomassa e eficiência do uso da água em períodos de maior restrição hídrica.

2.2.4 Tolerância do milheto à salinidade e uso de águas salobras na irrigação

Além da tolerância relativa ao déficit hídrico, o milheto pode apresentar tolerância a condições de salinidade em faixas relatadas na literatura, o que amplia a viabilidade de cultivo em áreas com restrições de qualidade da água e do solo. Há indicação de tolerância em níveis de 2 a 4 dS m^{-1}, associada à capacidade de ajuste osmótico, que favorece a absorção de água mesmo sob maior estresse salino (Simões *et al*., 2020; Lira *et al*., 2020).

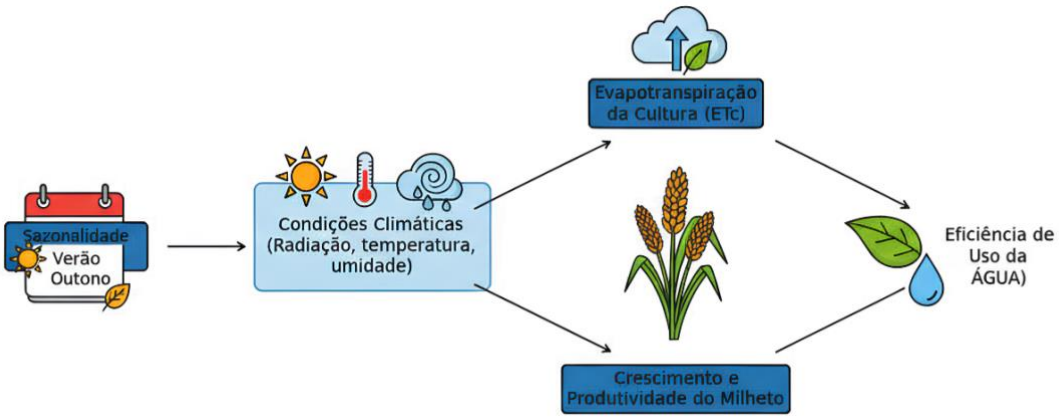
No Semiárido brasileiro, longos períodos de seca reduzem a recarga de mananciais superficiais e, em muitos contextos, o uso de águas subterrâneas se torna alternativa, ainda que essas águas frequentemente apresentem caráter salobro e condutividade elétrica elevada. Nessas condições, o uso agrícola de águas salobras pode contribuir para viabilizar cultivos, desde que associado a escolha de espécies tolerantes e a práticas de manejo que minimizem riscos de salinização e perdas de produtividade, como em sistemas que incluem o milheto (Araujo, 2021; Silva *et al*., 2020).

2.3 ÉPOCA DE CULTIVO, PRODUTIVIDADE E BALANÇO HÍDRICO DO SOLO

A época de cultivo exerce influência direta sobre o crescimento e a produtividade vegetal, pois condiciona fatores ambientais determinantes, como radiação solar, fotoperíodo, temperatura do ar e disponibilidade hídrica no solo. Alterações na duração do dia e na intensidade luminosa ao longo do ano afetam a fotossíntese, o metabolismo e o acúmulo de carbono nas plantas (Xu *et al*., 2024). Wang *et al*. (2023) indicaram que a produtividade primária bruta, associada à atividade fotossintética, pode variar entre 15% e 30% entre períodos de maior oferta de energia e períodos menos favoráveis, evidenciando o controle climático sobre a assimilação de carbono.

Além disso, oscilações na umidade do solo e na demanda atmosférica por vapor d'água regulam a fisiologia vegetal. A disponibilidade hídrica na zona radicular e o déficit de pressão de vapor modulam a condutância estomática, a transpiração e a eficiência do uso da água, com efeitos diretos sobre o desempenho produtivo. Aumento no déficit de pressão de vapor pode reduzir a condutância estomática em 20% a 40%, mesmo quando o solo mantém disponibilidade hídrica adequada, o que diminui a taxa fotossintética e limita o crescimento vegetal ao longo do ciclo (López; Way; Sadok, 2021). Nesse sentido, a Figura 3 sintetiza as relações entre condições meteorológicas, evapotranspiração, crescimento e eficiência do uso da água em sistemas agrícolas, com ênfase no milheto.

Figura 3 – Influência da época de cultivo sobre as condições meteorológicas, a evapotranspiração da cultura, o crescimento e a eficiência do uso da água do milheto.



Fonte: Autor (2025)

A Figura 3 auxilia na compreensão do encadeamento causal entre ambiente e resposta da cultura, indicando que variações entre períodos de cultivo alteram a demanda atmosférica e o consumo hídrico, refletindo-se no crescimento e na produção de biomassa. Essa leitura é particularmente relevante para culturas forrageiras conduzidas em ciclos sucessivos, planta e rebrota, em que a resposta ecofisiológica associada às relações hídricas tende a diferir conforme as condições meteorológicas predominantes em cada período.

No caso do milheto (*Pennisetum glaucum*), espécie anual de metabolismo fotossintético C4, essas relações são evidentes. Trata-se de cultura com elevada eficiência no uso da radiação e tolerância relativa ao déficit hídrico, atributos associados à sua origem em ambientes quentes e de menor disponibilidade hídrica. Em condições típicas do verão, com maior incidência de radiação solar e temperaturas favoráveis à atividade fotossintética, o milheto tende a expressar maior capacidade de assimilação de carbono e crescimento vegetativo (EMBRAPA, 2016).

Em estudos sob estresse hídrico, observaram-se reduções de aproximadamente 28,1% na altura de plantas, 47,2% no número de perfilhos e 34,0% na produção de forragem seca, além de diminuições em variáveis fisiológicas, evidenciando impactos diretos da restrição hídrica sobre o desempenho da cultura (Bakheit *et al*., 2021).

A época de cultivo, portanto, é determinante para a produtividade. Plantios conduzidos na primavera e no verão apresentam maior desenvolvimento da parte aérea, maior acúmulo de biomassa e elevação do índice de área foliar. Em contraste, cultivos no final do verão e no início do outono podem sofrer limitação pela redução gradual de temperatura, radiação e fotoperíodo, fatores que encurtam o período vegetativo, antecipam o florescimento e reduzem a produtividade (Minuzzi; Lopes, 2015).

Indica-se que condições de menor disponibilidade hídrica e maior restrição climática reduzem comprimento e largura de folhas, diminuem a área foliar ativa e reduzem a interceptação de radiação, resultando em menor crescimento vegetativo (Bazie *et al*., 2025).

Alterações morfofisiológicas sob déficit hídrico também foram descritas por Sithole *et al*. (2025), com reduções na massa foliar, condutância estomática e taxa fotossintética. Resultados de campo em ambientes secos confirmam redução de altura, peso de folhas e massa seca total, com perdas no crescimento e na produção do milheto (Yasir *et al*., 2024).

Embora plantas C4, como o milheto, apresentem eficiência elevada sob alta radiação e altas temperaturas, a taxa fotossintética tende a diminuir sob temperaturas mais baixas, fotoperíodos reduzidos e menor disponibilidade hídrica, condições que limitam a condutância estomática e a absorção de CO_2, com reflexos na produtividade (Wingler; Hennessy, 2016; Pires *et al*., 2007).

Nos sistemas produtivos do Semiárido brasileiro, a combinação de irregularidade pluviométrica e choques de seca eleva a variabilidade de rendimento entre safras, especialmente em sistemas dependentes de chuva. Evidências em escala regional indicam que eventos de seca reduzem área cultivada, produtividade e valor da produção, ampliando o risco produtivo e a vulnerabilidade dos sistemas agrícolas locais (Costa; Sant'Anna; Young, 2023). Assim, mesmo culturas tolerantes ao estresse hídrico, como o milheto, têm seu desempenho condicionado pelas condições meteorológicas predominantes em cada período de cultivo, o que reforça a necessidade de estratégias de manejo adaptativo.

2.3.1 Balanço hídrico do solo: definição, equação e componentes

A avaliação do consumo de água pelas culturas pode ser realizada por meio do balanço hídrico do solo, que consiste em quantificar entradas e saídas de água em um volume de controle no perfil, associado à zona radicular, e relacioná-las à variação do armazenamento hídrico no solo (Caporusso; Rolim, 2015; Moura *et al*., 2008). Em termos operacionais, o balanço hídrico do solo pode ser representado pela Equação 1:

Equação 1. $\Delta A = P + I + AC - ETr - R - DP$

em que ΔA é a variação do armazenamento de água no solo no período considerado; P é a precipitação; I é a irrigação; AC é a ascensão capilar; ETr é a evapotranspiração real; R é o escoamento superficial; e DP é a drenagem profunda (Venancio *et al*., 2019).

A partir dessa estrutura, o consumo de água da cultura pode ser interpretado como a própria ETr, em muitos estudos, é estimado por rearranjo da equação quando os demais termos são medidos ou estimados com consistência (Caporusso; Rolim, 2015; Venancio *et al*., 2019). A aplicação do método requer atenção, pois alguns componentes apresentam maior complexidade de mensuração, sobretudo fluxos subterrâneos, que dependem de propriedades hidráulicas do solo e podem introduzir incerteza na estimativa final (Cruz *et al*., 2005; Silva *et al*., 2007; Nouri *et al*., 2013).

Adicionalmente, a não uniformidade de irrigação, falhas na calibração de sensores e escolha inadequada de pontos de amostragem também podem comprometer resultados, exigindo padronização metodológica (Allen *et al*., 1998).

2.3.2 Armazenamento no solo, água disponível e déficit hídrico acumulado

O termo armazenamento de água no solo (A) está diretamente associado ao teor de água no perfil explorado pelas raízes. Na prática, a interpretação agronômica do armazenamento depende de limites físicos e fisiológicos, como a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). A CC representa, de forma operacional, o conteúdo de água retido no solo após a drenagem gravitacional, enquanto o PMP indica o conteúdo de água abaixo do qual as plantas não conseguem mais extrair água suficiente para manter turgor e funções fisiológicas. A diferença entre esses dois limites define a água disponível (AD) no solo para as plantas, expressa na Equação 2:

Equação 2. $AD = \theta CC - \theta PMP$

onde θCC é a umidade volumétrica na capacidade de campo e θPMP a umidade volumétrica no ponto de murcha permanente, considerando a profundidade efetiva do sistema radicular.

A partir da água disponível, pode-se interpretar o déficit hídrico acumulado como a parcela de água que deixa de estar disponível ao longo do tempo, em função de saídas superiores às entradas, o que se traduz em queda do armazenamento abaixo de níveis críticos para manutenção do crescimento. Esse déficit tende a se intensificar quando ocorre redução de precipitação, aumento da demanda atmosférica e limitações de reposição hídrica por irrigação,

afetando a transpiração, a fotossíntese e, consequentemente, a produtividade (López; Way; Sadok, 2021; Bakheit *et al*., 2021).

Em culturas como o milheto, que podem explorar diferentes profundidades e apresentar ajustes fisiológicos, o acompanhamento do armazenamento e do déficit ao longo do ciclo permite interpretar respostas de crescimento e produção entre épocas de cultivo e entre ciclos sucessivos, planta e rebrota (Wilson *et al*., 2001; Chen *et al*., 2023).

2.4 DEMANDA HÍDRICA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO MANEJO DA IRRIGAÇÃO

Diante da crescente pressão sobre os recursos hídricos, o uso da água na irrigação deve ocorrer de forma racional e tecnicamente orientada, de modo a reduzir desperdícios e evitar tanto o excesso quanto a restrição hídrica, condições que comprometem o desempenho das culturas (Oliveira Filho *et al*., 2022). A adoção de práticas de manejo e de tecnologias compatíveis com a necessidade hídrica das plantas constitui requisito para ampliar a produtividade e, simultaneamente, sustentar a eficiência do uso da água em sistemas agrícolas irrigados (ANA, 2017).

A determinação da demanda hídrica das culturas fundamenta-se na quantificação da evapotranspiração, distinguindo-se três grandezas, evapotranspiração de referência (ET_0), evapotranspiração da cultura (ET_c) e evapotranspiração real (ET_r). A ET_0 representa a demanda atmosférica potencial em condições padronizadas e, segundo o Boletim FAO 56, é estimada pela Equação 1 de Penman–Monteith (Allen *et al*., 1998). A ET_c corresponde à demanda hídrica específica da cultura e é obtida a partir da ET_0 ajustada por coeficiente de cultura (Kc), que varia conforme a fase fenológica e as condições de manejo (Moura *et al*., 2008; Allen *et al*., 1998). Já a ET_r reflete o consumo hídrico efetivo sob as condições reais de campo, sendo influenciada por limitações de água no solo, salinidade, variabilidade meteorológica entre períodos de cultivo e características do sistema radicular.

Em regiões de semiárido, a combinação de elevada demanda atmosférica e restrição hídrica sazonalmente concentrada em poucos meses tende a elevar a ET_0 e a ET_c, o que reforça a necessidade de estimativas consistentes para orientar a reposição de água. Em ambientes quentes e secos, a ET_c de culturas forrageiras pode ultrapassar 400 a 600 mm ao longo do ciclo, a depender da época de cultivo e da disponibilidade hídrica, destacando a relevância de métodos robustos de estimativa e manejo (Braga *et al*., 2023; Trindade, 2016). Variações nas condições meteorológicas entre períodos de cultivo também podem alterar a magnitude e a dinâmica do

consumo hídrico, com reflexos na produtividade e na eficiência do uso da água (Liu *et al*., 2013; Zhao *et al*., 2019).

Embora a ET_c seja referência central para o manejo, a estimativa do consumo efetivo pode requerer a quantificação da ETa, sobretudo quando o objetivo é interpretar respostas da cultura sob condições reais de campo. Uma alternativa amplamente empregada é o balanço hídrico do solo, que integra entradas e saídas de água no perfil explorado pelas raízes e permite estimar a ET_r por rearranjo da equação, conforme a Tabela 3 (Caporusso; Rolim, 2015; Venancio *et al*., 2019).

A aplicação desse método demanda atenção a fontes de incerteza, especialmente na mensuração de fluxos subterrâneos e na representação espacial do solo, além de cuidados com uniformidade de irrigação, calibração de sensores e escolha de pontos de amostragem (Cruz *et al*., 2005; Silva *et al*., 2007; Nouri *et al*., 2013; Allen *et al*., 1998). Movimentos ascendentes de água no perfil, quando presentes, também podem interferir nas estimativas, exigindo interpretação coerente com as condições do solo e do manejo adotado (Nouri *et al*., 2013).

Em culturas como o milheto, o entendimento de E ET_0, ET_c e ET_r torna-se particularmente relevante devido às características fisiológicas e estruturais associadas ao metabolismo C4, com elevada capacidade fotossintética e, em geral, maior eficiência do uso da água sob condições de alta radiação e temperatura (Chen *et al*., 2023). O milheto também apresenta plasticidade no sistema radicular, com potencial de explorar camadas mais profundas em situações de estresse hídrico, o que pode modificar padrões de extração de água ao longo do perfil e influenciar a dinâmica do consumo hídrico (Nielsen; Vigil, 2018). Além disso, a eficiência de transpiração em espécies C4 pode variar conforme tipo de solo, disponibilidade hídrica e demanda evaporativa, elementos que reforçam a necessidade de associar estimativas de evapotranspiração ao contexto edafoclimático e ao período de cultivo (Vadez *et al*., 2021).

Dessa forma, a caracterização da demanda atmosférica por meio da ET_0, a estimativa da ET_c com coeficientes adequados às fases fenológicas e a determinação da ET_r por balanço hídrico do solo constituem base técnica para o manejo da irrigação e para a interpretação dos indicadores de eficiência do uso da água, especialmente quando se comparam períodos de cultivo com condições meteorológicas distintas no Semiárido brasileiro.

2.5 EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA

Estratégias de manejo que otimizem a utilização dos recursos hídricos pelas culturas são fundamentais, especialmente em ambientes de semiárido, pois, além de favorecerem maior

produção por unidade de água, contribuem para a sustentabilidade ambiental e para a redução de vulnerabilidades frente a condições climáticas adversas (Alharbi *et al*., 2024; Kharrou *et al*., 2011).

A utilização de indicadores quantitativos permite avaliar a relação entre produção agrícola e água utilizada no sistema. Entre esses indicadores, destaca-se a eficiência do uso da água (EUA), a qual relaciona a produtividade, especialmente de biomassa ou grãos, ao volume de água efetivamente consumido durante o cultivo (Hoover *et al*., 2023).

Em termos agronômicos, essa relação é particularmente relevante no Semiárido brasileiro, em razão da limitação hídrica e da elevada demanda atmosférica, que tornam necessário planejar práticas de manejo capazes de maximizar a produção com menor consumo de água (Silva *et al*., 2015; Souza *et al*., 2011).

O milheto (*Pennisetum glaucum*) tem se destacado como alternativa promissora para produção de forragem e silagem, sobretudo em áreas sujeitas a déficit hídrico, em razão do bom desempenho em matéria seca. A cultura apresenta qualidade nutricional adequada, elevada adaptabilidade a solos de menor fertilidade e, diferentemente do sorgo, não contém durrina, o que amplia sua flexibilidade de uso em diferentes estádios vegetativos, seja para corte, pastejo, feno ou silagem, reforçando seu potencial em sistemas produtivos diversificados (Kollet *et al*., 2006; Firmiano, 2021).

Além disso, Ferreira *et al*. (2020) observaram que, sob diferentes lâminas de irrigação, o milheto atingiu produtividades de biomassa fresca e seca de até 22,96 e 6,05 t ha^{-1}, respectivamente, com melhor desempenho em lâminas entre 81% e 95% da ET_0.

Tem-se investigado a EUA em diferentes culturas e condições de manejo. Almeida *et al*. (2017) e Oliveira *et al*. (2025), ao analisarem produtividade e eficiência do uso da água em milho sob estratégias de manejo hídrico, verificaram que a irrigação suplementar pode elevar significativamente a produtividade, com ganhos relatados de até 70%, além de melhorar o aproveitamento da água quando comparado ao cultivo sem irrigação.

Crookston *et al*. (2020), ao avaliarem a eficiência do uso da água para produção de forragem de milheto perolado, verificaram que o aumento da irrigação elevou a produção de biomassa, porém a EUA permaneceu estável, sem diferença significativa entre tratamentos, mantendo-se em torno de 3,5 a 4,5 kg ha^{-1} mm^{-1}. Esse comportamento sugere que a cultura pode manter desempenho eficiente mesmo sob restrição hídrica moderada, o que é relevante em contextos de disponibilidade hídrica limitada, como o Semiárido brasileiro.

De forma semelhante, Silva *et al*. (2020) indicaram que práticas de manejo hídrico que limitam a reposição de água no solo podem otimizar a eficiência da cultura sem comprometer

significativamente a produção de biomassa, associando esse resultado à capacidade adaptativa do milheto e à manutenção de atividade metabólica sob déficit hídrico moderado, condição frequente no período seco do Semiárido brasileiro.

Por outro lado, Ismail (2012) relatou redução da EUA com o aumento do déficit hídrico e do número de cortes, indicando que o estresse hídrico acumulado ao longo do ciclo pode limitar a recuperação e o crescimento em cortes subsequentes. Em contraste, Oliveira *et al*. (2025), ao avaliarem genótipos de milheto perolado irrigados com água salobra sob diferentes níveis de gesso agrícola, observaram maior EUA no segundo corte, associando o resultado a condições meteorológicas mais favoráveis no período, como temperaturas adequadas e menor estresse atmosférico, o que reforça o papel da época de cultivo e do ambiente sobre a resposta produtiva.

Entende-se por água salobra a água com teor de sais dissolvidos intermediário entre a água doce e a água salina. No Brasil, a Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece, de forma objetiva, que são consideradas águas salobras aquelas com salinidade superior a 0,5‰ e inferior a 30‰, parâmetro que as distingue das águas doces, até 0,5‰, e das águas salinas, a partir de 30‰; em termos práticos, trata-se de uma água que pode elevar a condutividade elétrica e, quando utilizada na irrigação, tende a impor maior exigência de manejo por aumentar o estresse osmótico e o risco de efeitos iônicos sobre as plantas e o solo (CONAMA, 2005).

De forma geral, os estudos compilados evidenciam que a eficiência do uso da água pelo milheto é modulada pelas condições meteorológicas predominantes em cada período de cultivo, sendo favorecida quando há condições térmicas adequadas e menor demanda evaporativa. No contexto do Semiárido brasileiro, essa dependência das condições climáticas e do regime pluviométrico contribui para variações na eficiência hídrica entre ciclos produtivos, reforçando a necessidade de planejamento da época de cultivo e adoção de estratégias de manejo compatíveis com a dinâmica climática regional (Crookston *et al*., 2020; Silva *et al*., 2020; Costa; Sant'Anna; Young, 2023).

3 OBJETIVOS

3.1 GERAL

Neste contexto, o principal objetivo desta pesquisa é avaliar o crescimento, produtividade, componentes hidrodinâmicos do solo, evapotranspiração e indicadores de eficiência do uso da água durante o ciclo de planta e rebrota da cultura do milheto em condições semiáridas do Nordeste brasileiro.

3.2 ESPECÍFICOS

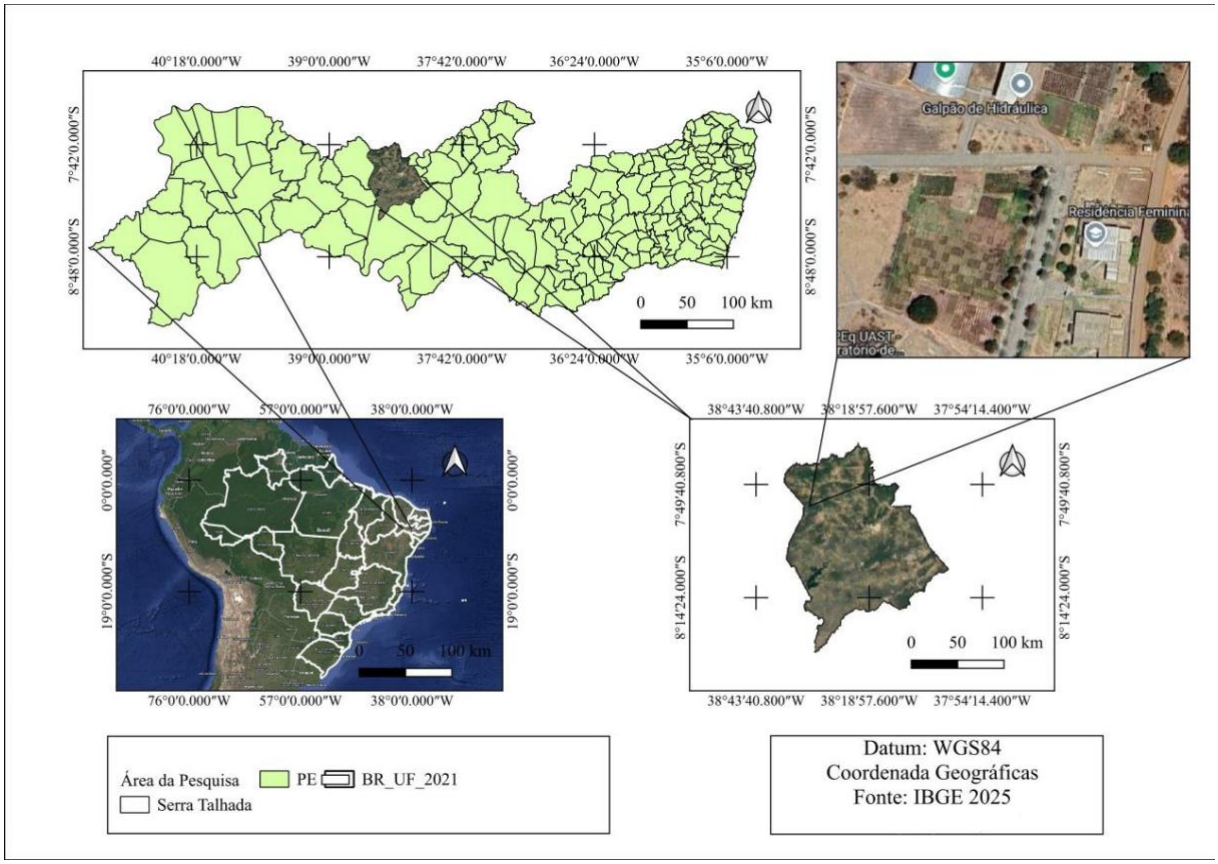
- Analisar o crescimento e produtividade durante dois ciclos sucessivos do milheto cultivado em ambiente semiárido avaliando a época de cultivo (verão e outono);
- Quantificar os componentes do balanço de água no solo em cultivo de milheto;
- Comparar os indicadores de eficiência do uso da água do milheto nos ciclos de planta e rebrota, a partir da evapotranspiração real estimada pelo balanço hídrico do solo.

4 METODOLOGIA

4.1 ÁREA DE ESTUDO

O experimento foi conduzido no Centro de Referência Internacional de Estudos Agrometeorológicos de Palma e outras Plantas Forrageiras (Centro REF), localizado na Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UFRPE/UAST), no município de Serra Talhada, Pernambuco, Brasil (7º56’20” S; 38º17’31” O; 499 m de altitude), conforme detalhado no mapa de localização da Figura 4.

Figura 4 – Localização da área experimental no Centro de Referência Internacional de Estudos Agrometeorológicos de Palma e outras Plantas Forrageiras (Centro REF), inserido na bacia hidrográfica do rio Pajeú, no município de Serra Talhada, Pernambuco, Brasil.



Fonte: Autor (2025)

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo BSh, classificado como semiárido quente, com chuvas concentradas em poucos meses e um período seco prolongado

(Alvares *et al*., 2013). O solo predominante na área experimental é o Cambissolo Háplico Ta Eutrófico típico, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos *et al*., 2018).

A caracterização físico-química do solo foi realizada na camada de 0,00–0,40 m. Os teores de areia, silte e argila foram 828,60; 148,23 e 23,10 g kg^{-1}, respectivamente, e a densidade aparente foi 1,45 g dm^{-3}, com porosidade total de 42,27%. Os valores de umidade volumétrica na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente foram 0,20 e 0,08 m^3 m^{-3}, respectivamente.

A caracterização química do solo contemplou pH em água (5,95), condutividade elétrica do extrato de saturação (0,32 dS m^{-1}), fósforo disponível (168,96 mg dm^{-3}), capacidade de troca catiônica (20,84 cmolc dm^{-3}), saturação por bases (97,12%), carbono orgânico (4,60 g kg^{-1}) e matéria orgânica (7,93 g kg^{-1}).

4.2 DESIGN EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados (DBC), com quatro blocos e quatro repetições, utilizando a cultivar de milheto *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br., cultivar IPA-Bulk-1. O espaçamento adotado foi de 100cm entre linhas e 5cm entre plantas, totalizando uma densidade de 200.000 plantas ha^{-1}. A semeadura foi realizada em fileiras simples, e o desbaste foi efetuado entre 15 e 20 dias após a emergência, mantendo-se 20 plantas por metro linear, visando à uniformidade da população final.

Foram conduzidos dois ciclos sucessivos de cultivo (planta e rebrota), com semeadura em 26/01/2023. O primeiro ciclo correspondeu ao período de crescimento inicial da cultura, desenvolvido sob condições típicas do verão, caracterizadas por maior disponibilidade hídrica e energética. O segundo ciclo correspondeu à fase de rebrota, conduzida durante a transição do verão para o outono, período marcado pela redução gradual da precipitação, da radiação solar e das temperaturas. Os cortes foram realizados em 11/04/2023 e 26/06/2023, respectivamente, de forma a permitir a avaliação do efeito do período de cultivo (verão e outono) sobre o crescimento, a produtividade e as respostas ecofisiológicas associadas ao uso da água, do milheto.

4.3 PROCEDIMENTOS DE CONDUÇÃO

Os eventos de irrigação foram realizados três vezes por semana (segundas, quartas e sextas-feiras) por sistema pressurizado de gotejamento, com emissores espaçados a 20cm. A

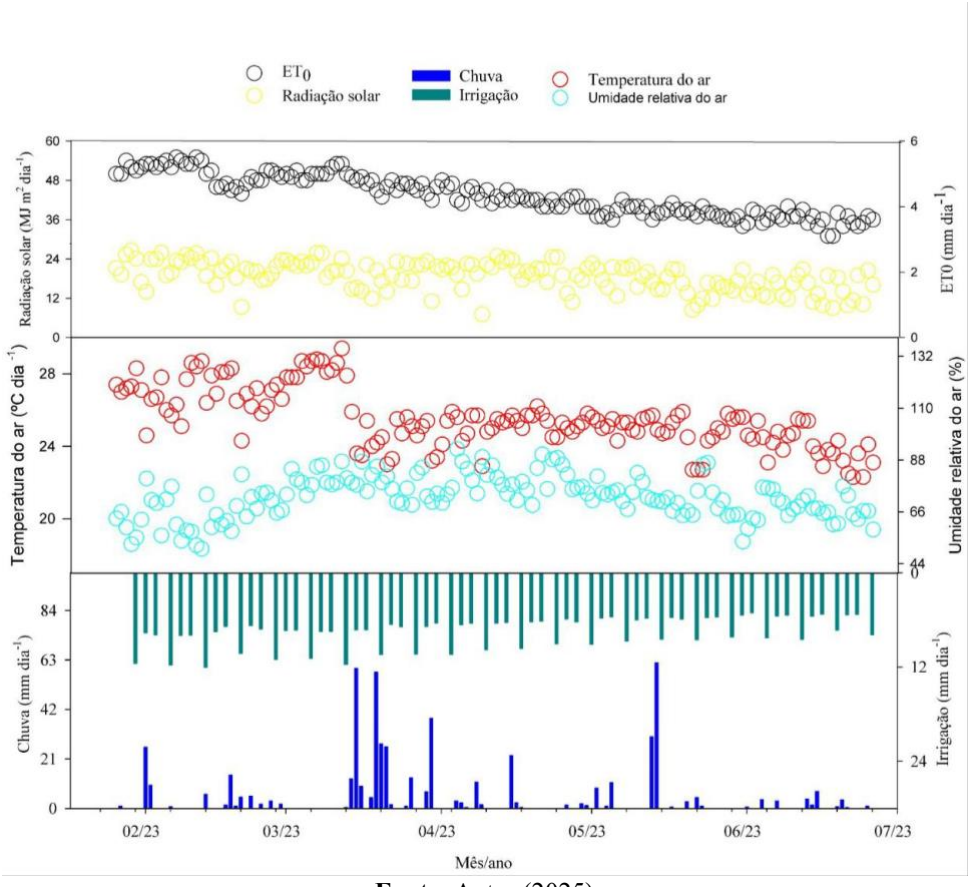
água utilizada apresentou condutividade elétrica média de 1,6 dS m^{-1} e foi proveniente de poço artesiano situado a aproximadamente 40 m da área experimental.

As variáveis meteorológicas foram obtidas por meio de estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), situada a aproximadamente 20 m da área experimental. Esses dados foram utilizados para estimar a ET_0 pelo método de Penman–Monteith, conforme as diretrizes do FAO 56 (Allen *et al*., 1998), descritas na Equação 3:

Equação 3. $ET_0 = [0{,}408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \cdot (900/(T + 273)) \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)] / [\Delta + \gamma \cdot (1 + 0{,}34 \cdot u_2)]$ (FAO Penman–Monteith)

em que: Δ é a inclinação da curva de pressão de vapor saturado em relação à temperatura (kPa ºC^{-1}); Rn é o saldo de radiação (MJ m^{-2} dia^{-1}); G é o fluxo de calor no solo (MJ m^{-2} dia^{-1}); γ é o coeficiente psicrométrico (kPa ºC^{-1}); T é a temperatura média do ar (°C); u_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1}); e_s é a pressão de vapor saturado (kPa); e_a é a pressão de vapor real (kPa).

Figura 5 – Variáveis meteorológicas e lâminas de irrigação e precipitação durante o período experimental (Jan - Jul 2023).



Fonte: Autor (2025)

A Figura 5 apresenta a variação das condições meteorológicas observadas no período experimental, incluindo temperatura do ar, radiação solar global, umidade relativa, precipitação e ET_0, além das lâminas de irrigação aplicadas, elementos utilizados no cálculo dos componentes do balanço hídrico do solo e na interpretação do manejo.

No ciclo de verão, a temperatura média do ar manteve-se em torno de 26,1 °C, com radiação solar global média próxima de 20,6 MJ m^{-2} dia^{-1}, umidade relativa média de aproximadamente 77,6% e ET_0 média em torno de 4,9 mm dia^{-1}; nesse mesmo período, registrou-se precipitação acumulada de 355,0 mm e lâmina total de irrigação aplicada de 276,55 mm.

No ciclo de outono, observou-se redução da demanda atmosférica, com temperatura média próxima de 24,0 °C, radiação média em torno de 17,1 MJ m^{-2} dia^{-1}, umidade relativa média de aproximadamente 77,0% e ET_0 média em torno de 3,9 mm dia^{-1}, acompanhadas de precipitação acumulada de 179,2 mm e lâmina total irrigada de 209,72 mm.

Em relação ao manejo, nos dias com ocorrência de precipitação, a irrigação programada foi ajustada com base no volume precipitado e na reposição hídrica necessária, de modo que, quando a chuva era suficiente para suprir a lâmina prevista, a aplicação era suspensa; quando insuficiente, aplicava-se apenas o complemento para evitar irrigação excessiva e reduzir perdas por drenagem e lixiviação, mantendo-se o critério de operação do sistema em três eventos semanais.

Realizou-se controle de plantas invasoras, quando necessário. A adubação foi realizada conforme as recomendações para o Estado de Pernambuco, nas doses 30-40-20 de N-P-K (kg ha^{-1}) (Cavalcanti *et al*., 2008).

4.4 DADOS COLETADOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS

4.4.1 Umidade volumétrica do solo (θ) e instrumentação

A umidade volumétrica do solo (θ) foi monitorada por tubos de acesso instalados até 1,00 m de profundidade, utilizando sonda capacitiva Diviner®2000 (Sentek Pty Ltd., Stepney, Adelaide, Austrália). A sonda foi calibrada previamente conforme procedimentos descritos por Primo *et al*. (2013) e Queiroz *et al*. (2023). As leituras foram realizadas duas vezes por semana (segundas e sextas-feiras), antes das irrigações, com registro a cada 0,10 m de profundidade, até 0,70 m (Silva *et al*., 2015).

4.4.2 Avaliações biométricas do milheto

As avaliações biométricas foram realizadas ao final de cada ciclo, em duas plantas por parcela previamente marcadas. Foram mensurados: número de folhas vivas e mortas (NFV e NFM, unidade), altura de plantas (AP, cm), espessura do colmo (EC, mm), comprimento e largura da terceira folha plenamente expandida (CF3+ e LF3+, cm), largura média das folhas (Lmédia, cm), bem como comprimento e largura da panícula (C. Panícula e L. Panícula, cm).

A área foliar (AF, cm²) foi estimada pela Equação 4, conforme Shih, Gascho e Rahi (1981):

Equação 4. $AF = 0{,}741 \cdot CF3+ \cdot LF3+$

Em seguida, estimou-se o índice de área foliar (IAF) pela Equação 5:

Equação 5. $IAF = (AF \cdot NFV) / (E1 \cdot E2)$

em que: AF é a área foliar da folha (cm²); CF3+ é o comprimento da terceira folha plenamente expandida (cm); LF3+ é a largura da mesma folha (cm); NFV é o número de folhas vivas por planta; E1 é o espaçamento entre linhas (cm) e E2 é o espaçamento entre plantas (cm).

A produtividade de matéria fresca (PMF) e de matéria seca (PMS), expressas em Mg ha^{-1}, foi determinada ao final de cada ciclo por amostragem de plantas na parcela útil. Inicialmente, contabilizou-se o estande de plantas na parcela útil. Em seguida, foram coletadas 10 plantas na parcela útil, cortadas rente ao solo, e pesadas para obtenção da massa fresca. Duas plantas representativas do conjunto foram particionadas em folha viva, folha morta, colmo e panícula, e cada fração foi pesada para obtenção da massa fresca por compartimento. A massa fresca total da planta foi obtida pela soma das frações.

Para obtenção da matéria seca, as amostras foram acondicionadas em sacos de papel identificados e levadas à estufa de circulação de ar forçada a 55 °C até massa constante, determinando-se a massa seca.

4.5 BALANÇO DE ÁGUA NO SOLO

A avaliação dos componentes do método de balanço de água no solo (BAS) foi realizada considerando uma profundidade de 0,70 m (Z), em intervalos de 7 dias. Para a determinação do

BAS, foi adotado o método descrito por Libardi (2005), o qual se fundamenta no princípio da conservação da massa de água em um volume de solo previamente definido.

A equação geral do balanço no volume de controle é apresentada na Equação 6 (Libardi, 2005):

Equação 6. $\Delta A = P + I - R - ET - Qz$

em que: ΔA é a variação do armazenamento de água no solo (mm) no intervalo; P é a precipitação (mm); I é a irrigação aplicada (mm); R é o escoamento superficial (mm); ET é a evapotranspiração real no intervalo (mm), obtida como resíduo do balanço; e Qz é o fluxo vertical acumulado (mm) na fronteira inferior (Z), no intervalo Δt.

O escoamento superficial (R) foi estimado por equação polinomial ajustada à relação entre R e P, obtida em área próxima ao experimento ($r^2 = 0,922$), conforme Equação 7:

Equação 7. $R = 0,0043 \cdot P^2 + 0,077 \cdot P$

O fluxo vertical de água na fronteira inferior foi calculado com base na equação de Darcy–Buckingham (Libardi, 2005), conforme Equação 8:

Equação 8. $qz = - K(\theta) \cdot (\Delta \Psi t / \Delta z)$

em que: qz é a densidade de fluxo vertical de água no solo (mm dia^{-1}); $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica do solo (mm dia^{-1}) em função da umidade; e $(\Delta \Psi t / \Delta z)$ é o gradiente de potencial hídrico total entre as profundidades de 0,50 m e 0,70 m. O fluxo acumulado no intervalo foi obtido por $Qz = qz \cdot \Delta t$.

A condutividade hidráulica não saturada foi estimada pelo método do perfil instantâneo (Libardi, 2005) e descrita pela Equação 9:

Equação 9. $K(\theta) = K0 \cdot \exp[\gamma \cdot (\theta - \theta 0)]$

em que: $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica (mm dia^{-1}); K0 é a condutividade hidráulica na condição de saturação; γ é o coeficiente angular do ajuste; e $\theta 0$ é o conteúdo de água no

tempo inicial de redistribuição. Foram adotados os coeficientes: $\gamma = 67{,}8947$; $K0 = 0{,}0001$ m h^{-1}; e $\theta 0 = 0{,}3105$ m^3 m^{-3} (Libardi, 2005).

O potencial hídrico total (Ψt) em cada profundidade foi estimado por relação exponencial ajustada no método do perfil instantâneo, conforme Equação 10 (Primo *et al*., 2013; Silva *et al*., 2015):

Equação 10. $\Psi t = \alpha \cdot \exp(-\beta \cdot \theta)$

em que: α e β são coeficientes adimensionais ajustados para as profundidades de 0,50 m ($\alpha = 249{,}9288$; $\beta = 20{,}2236$) e 0,70 m ($\alpha = 789{,}0253$; $\beta = 19{,}1510$) (Silva *et al*., 2015). O gradiente ($\Delta\Psi t/\Delta z$) foi obtido pela diferença entre potenciais estimados nas duas profundidades, dividida pela distância vertical entre elas (0,20 m).

A evapotranspiração real (ET, mm) em cada intervalo foi estimada como termo residual do balanço (Equação 6), após determinação de ΔA, P, I, R e Qz.

Para fins de apresentação dos componentes no balanço, quando Qz foi positivo (fluxo descendente), considerou-se drenagem profunda (DP) no intervalo; quando Qz foi negativo (fluxo ascendente), considerou-se ascensão capilar (AC), mantendo-se a mesma base de cálculo para o fluxo na fronteira inferior.

4.6 ÍNDICES HÍDRICOS

Os índices hídricos foram calculados para avaliar o uso e a eficiência da água no sistema e na cultura, conforme literatura de referência (Kijne *et al*., 2003; Fernández *et al*., 2020; Rodrigues; Pereira, 2009; Silva *et al*., 2023).

A eficiência do uso da água (EUA) foi calculada como a razão entre a água efetivamente consumida (ET) e a água disponível ao sistema no período, conforme Equação 11 (Fernández *et al*., 2020):

Equação 11. $EUA = ET / (P + I)$

A produtividade da água na cultura baseada no consumo (PACET, kg m^{-3}) foi calculada como a razão entre o rendimento (PMS, Mg ha^{-1}), convertido para kg ha^{-1} (1 Mg ha^{-1} = 1.000 kg ha^{-1}), e o volume de água consumido via evapotranspiração. Para expressar o indicador em

kg m^{-3}, a lâmina ET (mm) foi convertida para volume (m^3 ha^{-1}) multiplicando-se por 10, conforme Equação 12 (Kijne *et al*., 2003; Fernández *et al*., 2020):

Equação 12. $PAC_{ET} = PMS / ET$

A produtividade da água da cultura na irrigação (PACI, kg m^{-3}) foi definida como a razão entre o rendimento (PMS, Mg ha^{-1}), convertido para kg ha^{-1} (1 Mg ha^{-1} = 1.000 kg ha^{-1}), e o volume total aplicado por irrigação (I, mm), convertido para m^3 ha^{-1} (Rodrigues; Pereira, 2009; Fernández *et al*., 2020) conforme Equação 13:

Equação 13. $PAC_I = PMS / I$

A produtividade da água no sistema de cultivo (PACP+I, kg m^{-3}) foi obtida pela razão entre o rendimento e o volume total de água fornecido ao sistema (precipitação + irrigação), conforme Equação 14 (Silva *et al*., 2023):

Equação 14. $PAC_{P+I} = PMS / (P + I)$

4.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os componentes do balanço de água no solo foram analisados por estatística descritiva (média, desvio padrão e coeficiente de variação), por período de cultivo. As variáveis de crescimento, produtividade, evapotranspiração e índices hídricos foram submetidas à análise de variância (ANOVA) considerando o delineamento em blocos casualizados, com quatro blocos e dois períodos de cultivo (verão e outono). Quando identificadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). As análises foram realizadas no software R.

5 RESULTADOS

5.1 CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DO MILHETO EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE CULTIVO

As características estruturais do milheto avaliadas ao final de cada ciclo de cultivo estão apresentadas na Tabela 1. Observou-se efeito significativo da época de cultivo para a maioria das variáveis biométricas, com maiores valores no ciclo conduzido no verão em comparação ao ciclo conduzido no outono. A única variável que não apresentou diferença estatística entre as épocas foi a largura da folha 3+ (LF3+), cujo p-valor foi 0,6981, indicando estabilidade dessa medida entre os períodos avaliados.

Tabela 1 – Efeito da época de cultivo nas características estruturais do milheto cultivado sob condições semiáridas em cultivo biossalino.

Época de cultivo	Dias	AP cm	EC mm	LP Cm	NFV unid.	NFM unid.	CF3+ cm	LF3+ cm	C.Pan cm	L.Pan cm
Verão	75	189,2a	11,2a	49,1a	7,8a	1,9a	58,8a	3,4a	27,8a	2,0a
Outono	77	138,3b	7,5b	31,9b	4,9b	3,3b	47,4b	3,3a	23,4b	1,7b

p-valor	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0.6981	< 0,001	< 0,001

AP, altura da planta; EC, espessura do colmo; LP, largura da planta; NFV, número de folhas vivas; NFM, número de folhas mortas; CF3+, comprimento da folha 3+; LF3+, largura da folha 3+; C.Pan, comprimento da panícula; L.Pan, largura da panícula. Médias seguidas de letras diferentes na mesma coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.
Fonte: autora (2025).

De modo geral, as variáveis relacionadas ao porte e à arquitetura da planta apresentaram maior expressão no verão. A altura de plantas (AP) foi de 189,2 cm no verão e 138,3 cm no outono. Para expressar essa diferença em termos relativos, adotou-se o cálculo de variação percentual como (verão − outono) / outono × 100. Assim, para AP: (189,2 − 138,3) / 138,3 × 100 = 36,8%. O mesmo procedimento foi utilizado para os percentuais mencionados nesta seção, sempre comparando os valores observados no verão com os do outono.

A espessura do colmo (EC) também foi superior no verão (11,2 mm) em relação ao outono (7,5 mm), evidenciando diferença consistente entre épocas de cultivo. A largura da planta (LP) acompanhou esse padrão, com 49,1 cm no verão e 31,9 cm no outono, indicando plantas com maior expansão lateral no ciclo de verão.

No conjunto de variáveis foliares, o número de folhas vivas (NFV) foi maior no verão (7,8) do que no outono (4,9), ao passo que o número de folhas mortas (NFM) foi maior no outono (3,3) em comparação ao verão (1,9). Esses resultados indicam que, no ciclo conduzido no outono, houve menor manutenção de folhas ativas e maior presença de folhas senescentes ao final do ciclo, o que se reflete no contraste entre NFV e NFM nas duas épocas. Neste trabalho, quando se menciona “recursos meteorológicos disponíveis ao crescimento”, o termo se refere aos elementos do ambiente que condicionam a resposta da cultura, especialmente radiação solar, temperatura do ar e disponibilidade hídrica no solo, os quais variaram entre os períodos avaliados, conforme já indicado na caracterização do experimento.

O comprimento da folha 3+ (CF3+) foi maior no verão (58,8 cm) do que no outono (47,4 cm), sinalizando maior desenvolvimento foliar no ciclo de verão. Em contraste, a largura da folha 3+ (LF3+) manteve-se semelhante (3,4 cm no verão e 3,3 cm no outono), sem diferença estatística, o que sugere que a variação entre épocas se manifestou principalmente no comprimento, e não na largura, dessa folha de referência.

As características reprodutivas apresentaram o mesmo padrão de diferenciação entre épocas. O comprimento da panícula (C.Pan) foi maior no verão (27,8 cm) em comparação ao outono (23,4 cm), e a largura da panícula (L.Pan) foi de 2,0 cm no verão e 1,7 cm no outono. Considerando o conjunto dos resultados, verifica-se que o ciclo conduzido no verão apresentou maior expressão morfoestrutural, enquanto o ciclo conduzido no outono apresentou redução

consistente em variáveis de porte, folhas vivas e dimensões reprodutivas, com exceção de LF3+, que permaneceu estável.

5.2 PRODUTIVIDADE FORRAGEIRA DO MILHETO EM DUAS ÉPOCAS DE CULTIVO

Os valores de produtividade de matéria fresca (PMF) e produtividade de matéria seca (PMS) do milheto, em função da época de cultivo, estão apresentados na Tabela 2. Constatou-se efeito significativo da época de cultivo sobre ambas as variáveis ($p < 0,001$), com diferenciação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, conforme indicado pelas letras distintas na mesma coluna.

Tabela 2 – Efeito da época de cultivo na produtividade forrageira do milheto cultivado sob condições semiáridas em cultivo biossalino.

Época de cultivo	**Dias**	**PMF**	**PMS**
		Mg ha^{-1}	
Verão	75	23,8a	4,7a
Outono	77	9,1b	1,7b
p-valor		< 0,001	< 0,001

PMF, produtividade de matéria fresca; PMS, produtividade de matéria seca. Médias seguidas de letras diferentes na mesma coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.
Fonte: autora (2025).

A PMF foi de 23,8 Mg ha^{-1} no verão e 9,1 Mg ha^{-1} no outono, evidenciando redução expressiva no ciclo conduzido no outono. A PMS apresentou comportamento semelhante, com 4,7 Mg ha^{-1} no verão e 1,7 Mg ha^{-1} no outono. Em termos relativos, a diferença entre épocas resulta em redução da produtividade no outono quando comparada ao verão, reforçando a superioridade produtiva do ciclo de verão.

Ao descrever os resultados de produtividade, é importante observar que a duração dos ciclos foi semelhante (75 dias no verão e 76 dias no outono), o que reduz o efeito de diferenças de tempo de cultivo sobre a comparação direta entre as épocas. Assim, as diferenças observadas em PMF e PMS se apresentam de forma consistente com o padrão de redução do crescimento indicado na Tabela 3.

5.3 DINÂMICA DO BALANÇO HÍDRICO DO SOLO

A dinâmica de água no solo, estimada por meio do balanço hídrico, encontra-se apresentada na Tabela 4, discriminando os componentes por períodos de sete dias e, ao final, a soma acumulada de cada componente para os ciclos de verão e outono. A tabela apresenta

precipitação (P), irrigação (I), drenagem profunda (DP), ascensão capilar (AC), escoamento superficial (R), variação do armazenamento (ΔA) e evapotranspiração real (ET_r).

Tabela 3 – Dinâmica de água no solo em cultivo de milheto sob efeito da época de cultivo em ambientes semiáridos.

Verão								
Período	**Dias**	**P (mm)**	**I (mm)**	**DP (mm)**	**AC (mm)**	**R (mm)**	**ΔA (mm)**	**ET_r (mm)**
1	7	37.80	54.45	31.71	0.13	14.80	-1.05	46.92
2	7	6.00	26.79	24.49	0.12	4.09	-0.90	5.22
3	7	26.60	24.02	0.00	0.26	3.39	-0.76	48.25
4	7	7.00	25.63	0.01	2.06	3.79	6.15	24.75
5	7	0.00	25.68	0.11	0.39	3.80	-1.16	23.32
6	12	72.40	26.21	0.00	0.05	3.94	-0.35	95.07
7	7	127.00	24.15	0.00	0.01	3.42	13.34	134.40
8	7	21.20	23.74	0.44	0.00	3.32	-2.31	43.50
9	7	43.80	23.16	0.10	0.01	3.18	-6.20	69.88
10	7	13.20	22.73	0.06	0.01	3.08	-0.44	33.24
Soma	75	355.00	276.55	56.92	3.03	46.81	6.32	524.53

Outono								
Período	**Dias**	**P (mm)**	**I (mm)**	**DP (mm)**	**AC (mm)**	**R (mm)**	**ΔA (mm)**	**ET_r (mm)**
1	7	25.40	22.07	0.15	0.00	2.93	5.86	37.10
2	7	2.00	21.06	0.12	0.00	2.70	-6.85	30.36
3	7	11.80	20.72	0.06	0.00	2.63	3.41	26.29
4	7	12.00	20.45	0.06	0.00	2.57	-0.85	31.18
5	7	93.00	19.97	0.29	0.54	2.47	31.84	91.05
6	7	8.60	19.90	0.47	0.00	2.45	12.25	30.60
7	7	0.00	18.81	0.05	0.00	2.23	-7.34	24.05
8	7	7.80	19.07	0.05	0.00	2.28	-4.46	24.67
9	7	5.40	19.39	0.07	0.00	2.35	0.26	23.91
10	7	12.00	17.83	0.00	0.00	2.04	0.49	29.32
11	7	1.20	10.44	0.00	0.00	0.86	-2.95	15.55
Soma	77	179.20	209.72	1.31	0.54	25.51	31.66	364.10

P, precipitação; I, irrigação; DP, drenagem profunda; AC, ascensão capilar; R, escoamento; ΔA, variação no armazenamento; ET_r, evapotranspiração real.
Fonte: autora (2025).

Considerando-se os valores acumulados, as entradas hídricas (P + I + AC) totalizaram aproximadamente 634,6 mm no ciclo de verão e 389,4 mm no ciclo de outono. O contraste entre épocas é evidenciado pela precipitação acumulada, que foi de 355,0 mm no verão e 179,2 mm no outono, enquanto a irrigação total aplicada foi de 276,55 mm no verão e 209,72 mm no

outono. A contribuição de AC foi pequena em ambos os ciclos, com 3,03 mm no verão e 0,54 mm no outono, o que indica baixa magnitude desse componente no período avaliado.

As saídas hídricas também apresentaram variação entre ciclos. A ET_r acumulada foi de 524,53 mm no verão e 364,10 mm no outono. Ao relacionar ET_r com a duração do ciclo, obtém-se uma média diária aproximada de 7,0 mm dia^{-1} no verão (524,53/75) e 4,7 mm dia^{-1} no outono (364,10/77), indicando maior consumo hídrico acumulado no ciclo de verão.

O componente DP apresentou valores mais expressivos no verão (56,92 mm) do que no outono (1,31 mm), enquanto o escoamento superficial (R) foi de 46,81 mm no verão e 25,51 mm no outono. A variação do armazenamento (ΔA) foi positiva em ambos os ciclos, porém com magnitude contrastante: 6,32 mm no verão e 31,66 mm no outono, indicando maior variação de armazenamento no ciclo de outono. É relevante registrar que, pela organização do balanço, valores positivos de ΔA correspondem a aumento do armazenamento acumulado no período, enquanto valores negativos em subperíodos refletem redução pontual do armazenamento, conforme a sequência semanal apresentada.

A análise por subperíodos mostra também que há semanas com maior contribuição de P (por exemplo, no verão, período 7 com P = 127,00 mm; no outono, período 5 com P = 93,00 mm), o que se reflete em alterações concomitantes nos demais componentes, especialmente ET_r e ΔA, quando se observa a evolução ao longo dos intervalos de balanço. Assim, a Tabela 4 evidencia que a época de cultivo modificou a magnitude das entradas, saídas e variações de armazenamento no perfil de solo avaliado.

5.4 Indicadores de eficiência no uso da água

Os indicadores de eficiência e produtividade da água estão apresentados na Tabela 5, incluindo eficiência do uso da água (EUA), produtividade da água na cultura (PACET), produtividade da água no sistema (PACP+I) e produtividade da água de irrigação (PACI). Observou-se diferença entre épocas para PACET e PACI, com significância a 1% ($p < 0,01$), e para PACP+I, com significância a 5% ($p < 0,05$). A EUA não diferiu entre as épocas ($p = 0,845$), indicando manutenção desse indicador entre os ciclos.

Tabela 4 – Indicadores de eficiência no uso da água em cultivo de milheto sob efeito da época de cultivo em ambientes semiáridos.

Época de cultivo	EUA	PAC_{ET} (kg m^{-3})	PAC_{P+I} (kg m^{-3})	PAC_I (kg m^{-3})

Verão	0.89a	1.12a	0.98a	1.99a
Outono	0.83a	0.44b	0.37b	0.74b
p-valor	0.845	0.00814**	0.0204*	0.00567**

EUA, eficiência do uso da água; PACET, produtividade da água na cultura; PACP+I, produtividade da água no sistema; PACI, produtividade da água de irrigação. Médias seguidas de letras diferentes na mesma coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. * indica $p < 0,05$ e ** indica $p < 0,01$.
Fonte: autora (2025).

A PAC_{ET} foi de 1,12 kg m^{-3} no verão e 0,44 kg m^{-3} no outono, evidenciando desempenho superior do ciclo de verão quanto à conversão de água consumida em produtividade. Para a PACP+I, os valores foram de 0,98 kg m^{-3} no verão e 0,37 kg m^{-3} no outono, enquanto para a PACI os valores foram de 1,99 kg m^{-3} no verão e 0,74 kg m^{-3} no outono. Esses indicadores apresentam, portanto, redução expressiva no outono em comparação ao verão, padrão coerente com as reduções observadas em PMF e PMS.

A EUA apresentou valores de 0,89 no verão e 0,83 no outono, sem diferença estatística entre épocas. Embora os demais indicadores apresentem redução no outono, a ausência de diferença em EUA sugere que esse índice, tal como calculado no estudo, não foi sensível às variações entre épocas, diferentemente de PAC_{ET}, PAC_{P+I} e PAC_{I}, que apresentaram diferenciação estatística entre os ciclos.

6 DISCUSSÃO

6.1 CRESCIMENTO VEGETATIVO E PRODUTIVIDADE DO MILHETO EM FUNÇÃO DA ÉPOCA DE CULTIVO E DO CICLO, PLANTA E REBROTA

Os resultados evidenciam que a época de cultivo condiciona a expressão morfoestrutural e a produtividade do milheto, com desempenho superior no primeiro ciclo conduzido no verão e redução consistente no ciclo de rebrota no outono. De acordo com a Tabela 1, a maior altura de plantas, espessura de colmo e número de folhas vivas no verão indicam maior vigor vegetativo, o que se reflete no acúmulo de biomassa e na produtividade forrageira observada. Em gramíneas tropicais, esse comportamento é coerente com a fisiologia de espécies C4, que tendem a expressar maior taxa de crescimento quando a disponibilidade energética e as temperaturas estão em faixas favoráveis, desde que não haja limitação hídrica severa (EMBRAPA, 2016).

Esse comportamento evidencia o forte controle sazonal sobre o crescimento vegetativo do milheto e está diretamente associado às condições ambientais mais favoráveis observadas no período do verão, caracterizado por maior disponibilidade de radiação solar, maior

precipitação acumulada e temperaturas mais elevadas. Essas condições são compatíveis com maior atividade metabólica e maior crescimento em espécies C4, o que, neste estudo, se expressa nos maiores valores de altura de plantas, espessura de colmo, número de folhas vivas e produtividade forrageira observados no ciclo de verão.

A redução das variáveis estruturais no outono, associada ao aumento do número de folhas mortas, conforme Tabela 1, sugere que o ciclo de rebrota foi mais sensível às condições meteorológicas menos favoráveis e ao efeito do corte. Após a colheita, a rebrota depende de rápida recomposição de área foliar, e o processo pode ser limitado quando as condições ambientais reduzem o potencial fotossintético e a capacidade de recuperação. Em pastagens anuais de gramíneas, a literatura mostra que o manejo de corte, especialmente a altura residual, interfere no vigor de rebrota e na produção por corte, pois altera a proporção de tecidos remanescentes e a velocidade de recomposição da estrutura foliar, aspecto relevante para interpretar a queda de desempenho entre ciclos sucessivos (Comasseto *et al*., 2020).

Do ponto de vista produtivo, a magnitude das diferenças entre PMF e PMS nas duas épocas reforça a integração entre estrutura e produtividade, conforme Tabela 2. O ciclo de verão, além de apresentar maior crescimento, resultou em maior produtividade forrageira (Tabela 2), enquanto o ciclo de outono apresentou redução expressiva. Esse padrão é compatível com a ideia de que, em ambientes com limitação climática e alta variabilidade de oferta de recursos, a produtividade é altamente dependente da combinação entre disponibilidade hídrica e condições de demanda atmosférica, como a diminuição da radiação solar, da temperatura do ar e da demanda evaporativa, além do efeito do corte sobre a rebrota, sobretudo quando o cultivo ocorre em ciclos sucessivos como é o caso da rebrota (Steduto *et al*., 2012; Wang e Wang 2025).

Estudos recentes demonstram que as concentrações dessas reservas, incluindo açúcares solúveis e amido, que funcionam como reservas de energia, são influenciadas por fatores sazonais e diminuem durante períodos de estresse hídrico, comprometendo a capacidade de recuperação e crescimento em ciclos posteriores de cultivo. Esse conjunto de fatores limita a reposição das reservas energéticas da planta e reduz o potencial produtivo do milheto, evidenciando que o desempenho da cultura resulta de ajustes morfofisiológicos em resposta à sazonalidade climática do Semiárido brasileiro (Pires *et al*., 2007; Pereira *et al*., 2023). Assim, a queda de produtividade no outono não deve ser interpretada apenas como efeito de água, mas como resultado da interação entre estado fisiológico pós-corte e condições meteorológicas do período.

Além disso, como o experimento foi conduzido sob irrigação com água salobra de condutividade elétrica moderada, o comportamento observado se alinha à literatura que indica

que o milheto pode ser utilizado em condições de restrição hídrica e qualidade de água limitada, desde que o manejo, especialmente irrigação e nutrição, seja ajustado para reduzir riscos de estresse combinado (Có *et al*., 2023). Em cenários de maior salinidade, entretanto, espera-se redução do desempenho agronômico, o que reforça a necessidade de interpretar os resultados deste estudo à luz da magnitude real da salinidade utilizada, considerada baixa a moderada.

6.2 DINÂMICA HÍDRICA DO SOLO E BALANÇO HÍDRICO ENTRE ÉPOCAS DE CULTIVO

A dinâmica do balanço hídrico evidenciou contraste entre os ciclos, tanto nas entradas quanto nas saídas de água. No verão, as entradas hídricas foram superiores, com P + I = 631,55 mm (P = 355,00 mm; I = 276,55 mm), e a evapotranspiração real acumulada também foi mais elevada, com 524,53 mm (Tabela 3).

Na Figura 5, observam-se, no mesmo intervalo, valores mais altos de ET_0 e de radiação solar, além de maior temperatura do ar, com a ocorrência de eventos de chuva e reposições por irrigação ao longo do ciclo, o que corrobora a maior demanda atmosférica e o maior consumo hídrico estimado no balanço.

No outono, as entradas somaram 388,92 mm (P = 179,20 mm; I = 209,72 mm) e a evapotranspiração real acumulada reduziu para 364,10 mm (Tabela 3), padrão compatível com a diminuição da demanda atmosférica indicada na Figura 5. Esse comportamento é descrito na literatura, na medida em que a evapotranspiração real tende a responder à demanda atmosférica e à atividade do dossel, sobretudo quando há reposição hídrica por irrigação e precipitação (Allen et al., 1998; Venancio et al., 2019).

Ainda no verão, a maior magnitude de drenagem profunda e escoamento superficial, apresentada na Tabela 3, sugere maior circulação de água no sistema e maior propensão a perdas hídricas, o que é compatível com o padrão de solo mais arenoso descrito para a área, que tende a apresentar menor capacidade de retenção e maior susceptibilidade à drenagem. Esse comportamento reforça que, em períodos com maior aporte de água, o planejamento de lâminas e a frequência de irrigação devem ser compatíveis com a capacidade de armazenamento do perfil, para evitar percolação além da zona radicular e perdas de água e nutrientes. A literatura em ambientes semiáridos, incluindo estudos com milheto sob estresse salino, mostra que a frequência de irrigação influencia fortemente o desempenho, e intervalos mais longos podem agravar o estresse, ao passo que frequências mais curtas tendem a favorecer o desenvolvimento, sobretudo quando a água apresenta salinidade (Costa *et al*., 2024).

No outono, o aumento do armazenamento (ΔA) que totalizou 31,66 mm, valor cerca de cinco vezes superior ao observado no verão (6,32 mm), e a redução da evapotranspiração real acumulada, que passou de 524,53 mm no verão para 364,10 mm no outono, diferença de 160,43 mm (aproximadamente 31%), como indicado na Tabela 3, indicam maior estabilidade hídrica no perfil ao final do ciclo, porém com menor uso efetivo da água pela cultura. Esse padrão pode ocorrer quando a demanda atmosférica diminui e a rebrota apresenta menor área foliar ativa após o corte, reduzindo transpiração, mesmo havendo disponibilidade hídrica no solo. Assim, o armazenamento maior no outono não implica, necessariamente, melhor condição produtiva, pois a conversão de água em biomassa depende da capacidade fisiológica de uso dessa água, modulada pela energia disponível no ambiente e pelo estado fisiológico do cultivo (López; Way; Sadok, 2021).

Nesse contexto, o contraste entre épocas reforça a necessidade de ajustar a irrigação à demanda atmosférica e ao armazenamento do perfil. No verão, a combinação de maiores entradas hídricas e maior evapotranspiração real (Tabela 3), associada a ET_0, radiação solar e temperatura mais elevadas (Figura 5), indica maior consumo hídrico e maior risco de perdas quando há sobreposição de irrigação com eventos de chuva. No outono, a menor demanda atmosférica (Figura 5), concomitante ao maior armazenamento final e à redução da evapotranspiração real (Tabela 3), converge com o menor desempenho estrutural e produtivo observado (Tabela 1; Tabela 2), sugerindo menor conversão da água disponível em biomassa.

6.3 EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA E PRODUTIVIDADE HÍDRICA

Os indicadores hídricos evidenciaram que a produtividade da água foi superior no verão, com redução consistente no outono, conforme a Tabela 4. Esse resultado é coerente com a ideia de que a produtividade hídrica depende simultaneamente de produção e consumo, e tende a ser maior quando a cultura consegue converter a água utilizada em biomassa sob condições meteorológicas favoráveis. Em estudos com milheto forrageiro em ambiente semiárido, observa-se que a eficiência relacionada ao uso de água pode se manter em faixas relativamente estáveis em determinados cenários de manejo, mas a produtividade hídrica varia conforme o regime hídrico, o padrão de crescimento e o manejo de colheita, especialmente quando há cortes sucessivos (Crookston *et al*., 2020; Comasseto *et al*., 2020).

A ausência de diferença estatística para a eficiência do uso da água (EUA), contrastando com diferenças em PAC_{ET}, PAC_{P+I} e PAC_I, conforme sintetizado na Tabela 4, sugere que cada indicador captura dimensões distintas da relação água-produção. Enquanto os indicadores de

produtividade hídrica enfatizam a conversão de água em biomassa, a EUA, tal como definida no trabalho, pode ser menos sensível às variações entre épocas, sobretudo quando a relação entre consumo hídrico e disponibilidade total de água se mantém proporcional. Esse tipo de comportamento também é discutido na literatura de resposta de produtividade à água, em que diferentes métricas podem gerar interpretações complementares, sem necessariamente convergir para o mesmo padrão estatístico (Steduto *et al*., 2012).

Como o cultivo foi conduzido com água salobra, é importante considerar que, em condições de maior salinidade, a produtividade hídrica pode ser reduzida por efeitos osmóticos e iônicos que limitam crescimento e transpiração. Estudos experimentais com milheto mostram que estratégias de irrigação com água salina e ajustes de adubação podem mitigar parte do impacto, mas a resposta depende da intensidade do estresse, da frequência de irrigação e do manejo adotado (Có *et al*., 2023; Costa *et al*., 2024). Logo, embora o milheto apresente potencial para ambientes com restrição hídrica, o manejo deve ser orientado para reduzir riscos de estresse combinado, hídrico e salino.

7 CONCLUSÃO

Conclui-se que a época de cultivo do milheto IPA-Bulk-1 condiciona o crescimento, a produtividade e a eficiência do uso da água em sistemas irrigados no Semiárido brasileiro, apresentado elevado potencial forrageiro para a região. Recomenda-se priorizar o ciclo principal no verão e otimizar o manejo da irrigação para reduzir perdas, já que possuiu os melhores atributos morfoestruturais e maior produtividade em relação ao outono.

REFERÊNCIAS

AGLIARDI, Guinther; GASPARIN, Fabiano Perin; KRENZINGER, Arno. Monitoramento de um sistema fotovoltaico utilizando bases de dados de radiação solar e temperatura do INMET. *In:* **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR (CBENS)**, IX., 2022, Florianópolis. Anais [...]. Florianópolis: CBENS, 2022.

AHMED, U.; IQBAL, W.; AMIN, H.; NOOR, E.; JAMAL, A.; SAEED, M. F.; ČERNÝ, J. Comparative performance of summer cereals under limited water and fertilizer inputs. **Discover Agriculture**, v. 3, n. 1, p. 116, 2025.

ALHARBI, S.; FELEMBAN, A.; ABDELRAHIM, A.; AL-DAKHIL, M. Agricultural and technology-based strategies to improve water-use efficiency in arid and semiarid areas. **Water**, v. 16, n. 13, p. 1842, 2024.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration**: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALMEIDA, A. C. S.; BONIFÁCIO, J.; PUSCH, M.; OLIVEIRA, F. C.; GESEINHOFF, L. O.; BISCARO, G. A. Produtividade e eficiência de uso da água em milho cultivado com diferentes estratégias de manejo hídrico. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 3, p. 1448, 2017. DOI: 10.7127/rbai.v11n300577.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ALVES, H. K. M. N.; SILVA, T. G. F.; JARDIM, A. M. D. R. F.; SOUZA, L. S. B.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SOUZA, C. A. A.; CRUZ NETO, J. F. The use of mulch in cultivating the forage cactus optimizes yield in less time and increases the water use efficiency of the crop. **Irrigation and Drainage**, v. 72, n. 1, p. 75–89, 2023. DOI: 10.1002/ird.2758.

ALVES, C. P.; EUGENIO, D. S.; SOUZA, L. S. B.; JARDIM, A. M. D. R. F.; SOUZA, C. A. A.; SILVA, G. I. N.; SILVA, T. G. F. Aprimorando o manejo da água e o uso de recursos naturais em sistemas de pastagens tropicais em condições semiáridas: abordagem Kc dupla. **Biomass and Bioenergy**, v. 208, p. 108776, 2026. DOI: 10.1016/j.biombioe.2025.108776.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas irrigação**: uso da água na agricultura irrigada. Brasília: ANA, 2017.

ARAÚJO, E. R.; SILVA, S.; SILVA, C. S.; SOUZA, J. E.; SOUSA, A. C. P.; TEODORO, I. Balanço sazonal de água no solo para manejo da irrigação de milho no semiárido de Alagoas. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 16, n. 3, p. 253–258, 2021.

AUSIKU, P. A.; ANNANDALE, J.G.; STEYN, M.J.; SANEWE, A. Análise do crescimento de genótipos de milheto cultivados sob diferentes práticas de manejo. **Agronomia** , v. 15, n. 4, p. 767, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy15040767

BAKHEIT, B. R.; ALI, M. B. M.; MAHDY, R. E. E.; KANDEEL, M. N. Performance of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) genotypes for forage yield and its components under normal and water stress irrigation. **Assiut Journal of Agricultural Sciences**, v. 52, n. 5, p. 1–12, 2021. DOI: 10.21608/ajas.2022.113072.1076.

BAZIE, L. V.; DRABO, I.; SOME, K.; ROUAMBA, A.; BATIONO, P. Response of pearl millet (*Pennisetum glaucum* [L.] R. Br.) growth to post-emergence water stress. **Agronomy**, v. 15, n. 10, p. 2321, 2025. DOI: 10.3390/agronomy15102321.

BEZERRA, J. D. C.; SANTOS, I. A. S.; ALMEIDA, G. A. P.; PEREIRA, M. S.; LIMA, D. F. F.; FERREIRA, G. D. C. Morfoanatomia do colmo de milheto (IPA BULK 1 BF) sob condições de irrigação no Agreste Pernambucano. **Revista Cientifica de Produção Animal**, v. 13, p. 38-42, 2011. DOI: 10.15528/2176-4158/rcpa.v13n1p38-42

BONDARUK, V. F.; OÑATIBIA, G. R.; FERNÁNDEZ, R. J.; AGÜERO, W.; BLANCO, L.; BRUSCHETTI, M.; YAHDJIAN, L. Forage provision is more affected by droughts in arid and semi-arid than in mesic rangelands. **Journal of Applied Ecology**, v. 59, n. 9, p. 2404–2418, 2022. DOI: 10.1111/1365-2664.14243.

BORBA, M. C.; RAMOS, J. E. S.; BARROS, J. E. M.; MACHADO, J. A. Difusão de tecnologias no meio agrícola na Caatinga: a região de clima semiárido brasileiro. **Interações** (Campo Grande), v. 24, n. 1, p. 69–93, 2023. DOI: http://dx.doi.org/10.20435/inter.v24i1.3767.

BRAGA, L. G. S.; BOUIX, C. P. S.; PÓVOAS, C. E.; RAMOS, A. Estimativa da evapotranspiração de referência por três métodos para a região de Ilhéus/BA. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 4, e7812440936, 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução n. 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 53, 18 mar. 2005. p. 58-63.

CABRAL JÚNIOR, JÓRIO BEZERRA; BEZERRA, BERGSON GUEDES. Análises da evapotranspiração de referência e do índice de aridez para o Nordeste do Brasil. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 4, n. 1, p. 71–89, 2018. DOI: 10.21680/2447-3359.2018v4n1ID14746.

CAPORUSSO, N. B.; ROLIM, G. S. Reference evapotranspiration models using different time scales in the Jaboticabal region of São Paulo, Brazil. Acta Scientiarum. **Agronomy**, v. 37, p. 1–9, 2015.

CAVALCANTI, F. J. de A. (coord.). **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco**: 2ª aproximação. 3. ed. rev. e ampl. Recife: IPA, 2008.

CHEN, L.; YANG, Y.; ZHAO, Z.; LU, S.; LU, Q.; CUI, C.; HU, Y. G. Genome-wide identification and comparative analyses of key genes involved in C4 photosynthesis in five

main gramineous crops. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1134170, 2023. DOI: 10.3389/fpls.2023.1134170.

CÓ, Erickson Gomes de; SOUSA, Geocleber Gomes de; GOMES, Silas Primola; FREIRE, Márcio Henrique da Costa; SILVA, Fred Denilson Barbosa da. Estratégias de irrigação com água salina e adubação nitrogenada na cultura do milheto. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 36, n. 2, p. 424–431, abr./jun. 2023.

COMASSETO, Danielli dos Santos *et al*. Effects of cutting height managements on yield and composition of different annual pastures. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, Salvador, v. 21, e2121282020, 2020. DOI: 10.1590/S1519-99402121282020.

COSTA, L.; SANT'ANNA, A.A.; YOUNG, C.F.B. lives: drought shocks and agricultural vulnerability in the Brazilian Semi-Arid. **Environment and Development Economics**, v. 28, n. 6, p. 603-623, 2023.

COSTA, F. H. R. *et al*. Frequencies of irrigation in millet crop under salt stress. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 3, e272197, 2024. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v28n3e272197.

CROOKSTON, B.; BLASER, B.; DARAPUNENI, M.; RHOADES, M. Pearl millet forage water use efficiency. **Agronomy**, v. 10, n. 11, p. 1672, 2020.

CRUZ, A. C. R.; LIBARDI, P. L.; CARVALHO, L. A.; ROCHA, G. C. Balanço de água no volume de solo explorado pelo sistema radicular de uma planta de citros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 1–10, 2005.

DEUTSCHER WETTERDIENST – DWD. **Sunshine duration**: Product Description Sheet. Version 2.4. Offenbach: DWD, jun. 2023.

DINIZ, W. J. S.; SILVA, T. G. F.; FERREIRA, J. M. S.; SANTOS, D. C.; MOURA, M. S. B.; ARAÚJO, G. G. L.; ZOLNIER, S. 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. DOI: 10.1590/s0100-204x2017000900004.

EITELBERG, L.; SUN, Y.; AMELUNG, W.; BAUKE, S. L. Water-use efficiency–indications from carbon and oxygen stable isotope composition of crop plants. **Plant and Soil**, p. 1–32, 2025. DOI: 10.1007/s11104-025-07629-7.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Cultivo do milheto**. 5. ed. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2016. (Sistema de Produção, 3).

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Semiárido Show**: FAO expõe impactos das mudanças climáticas na agricultura e na alimentação. FAO Brasil, 28 ago. 2025.

FERNÁNDEZ, J. E.; ALCON, F.; DIAZ-ESPEJO, A.; HERNANDEZ-SANTANA, V.; CUEVAS, M. V. Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: a case study of a super high density olive tree orchard. **Agricultural Water Management**, v. 237, p. 106074, 2020. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106074.

FERREIRA, F. N.; OLIVEIRA, I. C. M.; ANDRADE, C. L. T.; SIMEÃO, R. M.; SOUZA, I. R. P. **Produção de silagem de milheto sob diferentes lâminas de irrigação**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2020.

FIRMIANO, R. S. **Uso do milheto como alternativa para alimentação de ruminantes**. 2021.

FRASCA, L. L. M.; MORAES FILHO, I. M.; AZEVEDO, J. B. Desempenho do milheto submetido a lâminas de irrigação. **Revista JRG de Estudos Acadêmicos**, v. 3, n. 6, p. 138–145, 2020. DOI: 10.5281/zenodo.3895197.

GORGEN, A. V. **Produtividade e qualidade da forragem de milheto (Pennisetum glaucum (L.) R. Br.) e de trigo mourisco (Fagopyrum esculentum Moench) cultivado no Cerrado**. 2013. Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

HOOVER, D. L.; ABENDROTH, L. J.; BROWNING, D. M.; SAHA, A.; SNYDER, K.; WAGLE, P.; SCOTT, R. L. Indicators of water use efficiency across diverse agroecosystems and spatiotemporal scales. **Science of the Total Environment**, v. 864, p. 160992, 2023.

IBGE. **Quadro Geográfico de Referência para Produção, Análise e Disseminação de Estatísticas**: Semiárido. Ajustado à malha territorial de referência 2024. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO – INSA. **Delimitação do Semiárido Brasileiro (mapa)**. Versão 2024. Brasília: INSA/MCTI, 2024.

ISMAIL, S. M. Optimizing productivity and irrigation water use efficiency of pearl millet as a forage crop in arid regions under different irrigation methods and stress. **African Journal of Agricultural Research**, v. 7, n. 16, p. 2509–2518, 2012.

JARDIM, A. M. D. R. F.; SILVA, T. G. F.; SOUZA, L. S. B.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; ALVES, H. K. M. N.; SÁ SOUZA, M.; MOURA, M. S. B. 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. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2021.104464.

KHARROU, M. H.; ER-RAKI, S.; CHEHBOUNI, A.; DUCHEMIN, B.; SIMONNEAUX, V.; LE PAGE, M.; JARLAN, L. Water use efficiency and yield of winter wheat under different irrigation regimes in a semi-arid region. **Agricultural Sciences in China**, v. 2, n. 3, p. 273–282, 2011.

KIJNE, J. W.; BARKER, R.; MOLDEN, D. J. (eds.). **Water productivity in agriculture**: limits and opportunities for improvement. Wallingford: CABI, 2003.

KOLLET, J. L.; DIOGO, J. M. D. S.; LEITE, G. G. R. Rendimento forrageiro e composição bromatológica de variedades de milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.). **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 35, p. 1308–1315, 2006. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/S1516-35982006000500008.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005.

LIMA, A. F. *et al*. Cultivo do milheto irrigado com água salina em diferentes coberturas mortas. **Irriga**, v. 25, n. 2, p. 347–360, 2020.

LIU, S. M.; XU, Z. W.; ZHU, Z. L.; JIA, Z. Z.; ZHU, M. J. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China. **Journal of Hydrology**, v. 487, p. 24–38, 2013.

LIRA, J. B. D.; ANDRADE, A. P. D.; MAGALHAES, A. L. R.; CAMPOS, F. S.; ARAÚJO, G. G. L. D.; DEON, D. S.; NAGAHAMA, H. D. J. Production of pearl millet irrigated with different levels of brackish water and organic matter. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 51, n. 5, p. 701-709, 2020. DOI: https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1729794

LÓPEZ, J.; WAY, D. A.; SADOK, W. Systemic effects of rising atmospheric vapor pressure deficit on plant physiology and productivity. **Global Change Biology**, v. 27, n. 9, p. 1704–1720, 2021. DOI: 10.1111/gcb.15548.

MAIA, A. G.; CESANO, D.; MIYAMOTO, B. C.; EUSÉBIO, G. D. S.; ANDRADE, P. **Climate change and adaptive strategies in agriculture**: assessing the impacts on small farmers in the Brazilian Sertão. 2016. DOI: 10.22004/ag.econ.236255.

MONTEIRO, I. **Técnico do "Forrageiras para o Semiárido" apresenta resultados no Piauí**. Senar Piauí: notícias, 21 maio 2021.

MOREIRA, J. A. S.; FAGUNDES, J. L.; MISTURA, C.; LEMOS, N. L. S.; MOREIRA, J. N.; BACKES, A. A.; MOREIRA, A. L. Características morfogênicas, estruturais e produtivas de acessos de capim-buffel. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 1, p. 391–400, 2015. DOI: 10.5433/1679-0359.2015v36n1p391.

MOURA, G. B. A.; MELO, J. S. P.; GIONGO, P. R.; LIRA JÚNIOR, M. A.; SILVA, A. P. N. Relação entre condições hídricas e o crescimento vegetal da cana-de-açúcar no município de Itambé, Pernambuco. **Revista Caatinga**, v. 21, p. 171–177, 2008.

MOURA, M. S. B.; SOBRINHO, J. E.; SILVA, T. G. F. Aspectos meteorológicos do semiárido brasileiro. In: **Tecnologias de convivência com o semiárido brasileiro**. Brasília: Embrapa, 2019. v. 1, p. 85–104.

MOURA, E. A.; LUCENA, L. R. R.; LEITE, M. L. M. V.; MOURA, G. A.; SIMÕES, V. J. L. P.; SIMPLÍCIO, J. B. Relación entre altura de la planta y número de cladodios del clon de cactus Little Sweet asociado con "pornunça". **Cuban Journal of Agricultural Science**, v. 54, n. 2, p. 279–288, 2020.

MINUZZI, R. B.; LOPES, F. Z. Desempenho agronômico do milho em diferentes cenários climáticos no Centro-Oeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 8, p. 734–740, 2015.

NIELSEN, D. C.; VIGIL, M. F. Soil water extraction for several dryland crops. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 6, p. 2447–2455, 2018. DOI: 10.2134/agronj2018.05.0335.

NOURI, H.; BEECHAM, S.; KAZEMI, F.; HASSANLI, M. A. A review of ET measurement techniques for estimating the water requirements of urban landscape vegetation. **Urban Water Journal**, v. 10, n. 4, p. 247–259, 2013.

OLIVEIRA FILHO, S. F.; FERNANDES, A. C. G.; BORGES, I. M. S.; *et al*. Use of the GIS tool for monitoring crop development in the semi-arid region of Paraíba. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 4, p. e53611427728, 2022.

OLIVEIRA, G. A.; RIBEIRO, O. L.; ARAÚJO, G. G. L.; CAMPOS, F. S.; TABOSA, J. N.; REGITANO NETO, A.; GOIS, G. C. Pearl millet genotypes irrigated with brackish water under different levels of agricultural gypsum. **Grasses**, v. 4, n. 2, p. 13, 2025.

ORESCA, D.; OLIVEIRA, A. C.; SILVA, T. G. F.; *et al*. Desempenho agronômico de sorgo forrageiro e milheto cultivados sob irrigação com água salina e doses de nitrogênio no semiárido brasileiro. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 10, p. e359101018976, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i10.18976.

PEREIRA, R. C. G.; COSTA, S. A. T.; NASCIMENTO ARAÚJO, G. Modelo de simulação AquaCrop na determinação do yield gap do milheto e do sorgo forrageiro em ambiente semiárido: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 6, p. 3225–3245, 2023. DOI: 10.26848/rbgf.v16.6.p3225-2545.

PIRES, F. R.; ASSIS, R. L.; SILVA, G. P.; BRAZ, A J. B. P.; SANTOS, S. C.; VIEIRA NETO, A. S.; SOUSA, P. G. Desempenho agronômico de variedades de milheto em razão da fenologia em pré-safra. 2007.

PRIMO, J. T. A. **Dinâmica de água no solo e eficiência do uso de água em clones de palma forrageira no semiárido pernambucano**. 2013. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Serra Talhada, 2013.

QUEIROZ, T. B.; KUPPER, A. P. F.; SILVA, M. T.; *et al*. Conteúdo volumétrico de água e crescimento do eucalipto em condições de solo e clima contrastantes. **Série Técnica IPEF**, v. 26, n. 48, 2023. DOI: https://doi.org/10.18671/sertec.v26n48.031.

RODRIGUES, G. C.; PEREIRA, L. S. Assessing economic impacts of deficit irrigation as related to water productivity and water costs. **Biosystems Engineering**, v. 103, n. 4, p. 536–551, 2009. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2009.05.002.

RUFINO, S.; OLIVEIRA, A. L. B.; OLIVEIRA DIAS, P. O. Formação e sustentabilidade no semiárido: implantação de unidade técnica agroflorestal. **InterAção**, v. 16, n. 1, p. e90067, 2025. DOI: 10.5902/2357797590067.

SALDIVIA-TEJEDA, A.; URIBE-GUERRERO, M. Á.; ROJAS-CRUZ, J. M.; GUERA, O. G. M.; VERHULST, N.; FONTEYNE, S. Conservation agriculture enhances maize yields and profitability in Mexico's semi-arid highlands. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 29638, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-80928-8.

SALVADOR, K. R.; SILVA, J. O. N.; SOUZA SANTOS, J. P. A. S.; LEITE, R. M. C.; AVIZ, R. O.; SANTOS, A. R. M.; SILVA, T. G. F. Indicadores de eficiência biológica, habilidade competitiva e benefício econômico de sistemas de produção sustentável de forragem: uma revisão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 6, p. 2730–2754, 2022. DOI: 10.26848/rbgf.v15.6.p2730-2754.

SANTOS, A. R. M.; BEZERRA, R. C. A.; CORDEIRO, L. R. B. A.; LEITE, M. L. M. V.; SALVADOR, K. R.; SOUSA, L. D. C.; SILVA, T. G. F. Valor nutritivo de plantas forrageiras cultivadas no semiárido brasileiro: uma revisão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 3, p. 1466–1489, 2023. DOI: 10.26848/rbgf.v16.3.p1466-1489.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2018.

SANTOS, I. M. A. DOS; SILVA, G. M. DA; NASCIMENTO, G. DE S. S.; ALVES , N. DOS S.; AMORIM, A. T. DE; SÁ, C. G. Q. DE; OLIVEIRA, A. L. F. DE P.; FRANÇA, J. G. E. DE. Melhoramento do Milheto-Pérola (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) - uma revisão. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, [S. l.], v. 8, n. 4, p. e84723, 2025. DOI: 10.34188/bjaerv8n4-207.

SHIH, S. F.; GASCHO, G. J.; RAHI, G. S. Modeling biomass production of sweet sorghum. **Agronomy Journal**, v. 73, n. 6, p. 1027–1032, 1981.

SILVA, K. D. F.; MENEZES, F. M. N.; OLIVEIRA, M. F.; SILVA, N. L.; GUEDES, F. L.; POMPEU, R. C. F. F.; SOUZA, H. A. **Produção, clorofila e eficiência do uso da água em milheto cultivado em solo de área degradada**. 2015.

Silva *et al*., 2023

Silva *et al*. (2011) apud UFRN

Silva, 2025

SILVA, A. L.; REICHARDT, K.; ROVERATTI, R.; BACCHI, O. O. S.; TIMM, L. C.; OLIVEIRA, J. C. M.; DOURADO-NETO, D. On the use of soil hydraulic conductivity functions in the field. **Soil and Tillage Research**, v. 93, n. 1, p. 162–170, 2007.

SILVA, B. B.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C.; OLIVEIRA, L. M. M.; GALVÍNCIO, J. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Evapotranspiração e estimativa da água consumida em perímetro irrigado do Semiárido brasileiro por sensoriamento remoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 1218–1226, 2012. DOI: 10.1590/S0100-204X2012000900006.

SILVA, H. M. da. Análise estatística do brilho solar no estado do Acre entre os anos de 1991 e 2015 para determinação de Normais Climatológicas Provisórias de insolação. **Revista Brasileira de Energia Solar**, ano 14, v. 14, n. 2, p. 73-82, dez. 2023.

SILVA, J. R. I.; JARDIM, A. M. D. R. F.; SOUZA, E. S.; *et al*. Inter-relação de técnica de manejo de água e solo aplicadas à cultura do milheto: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, p. e569974503, 2020.

SIMÕES, V. J. L. P.; LEITE, M. L. M. V.; SOUZA, E. S.; LUCENA, L. R. R.; SILVA, J. R. I.; ALMEIDA, M. C. R.; ALMEIDA, J. C. Utilização de bioestimulante e extrato vegetal no milheto submetido a estresse salino. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 10, p. e1079108318, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i10.8318.

SITHOLE, C.; SINTHUMULE, R. R.; GAORONGWE, J. L.; RUZVIDZO, O.; DIKOBE, T. B. Unraveling the complexities: morpho-physiological and proteomic responses of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) to dual drought and salt stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, p. 1495562, 2025. DOI: 10.3389/fpls.2025.1495562.

SOUSA, R.; SILVA, C.; SOUSA, M.; PUNDRICH, M. G.; SOUZA, C.; FREITAS, E. C. Métodos práticos alternativos para determinação da disponibilidade de água em substratos para produção de mudas. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 21, n. 1, p. 1–7, 2025. DOI: 10.30969/9ggws194.

SOUZA, L. S. B.; MOURA, M. S. B.; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, T. G. F. Water use efficiency of cowpea and maize crops on single and intercropping systems in the Brazilian semiarid region. **Bragantia**, v. 70, p. 715–721, 2011.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; RAES, D. **Crop yield response to water**. Rome: FAO, 2012. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 66). https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i2800e. Acesso em: 21 fev. 2026.

TRINDADE, L. D. L. **Gestão integrada de recursos hídricos**: papel, potencialidades e limitações dos comitês de bacias hidrográficas. 2016.

VADEZ, V.; CHOUDHARY, S.; KHOLOVÁ, J.; HASH, C. T.; SRIVASTAVA, R.; KUMAR, A. A.; ANJAIAH, M. Transpiration efficiency: insights from comparisons of C4 cereal species. **Journal of Experimental Botany**, v. 72, n. 14, p. 5221–5234, 2021. DOI: 10.1093/jxb/erab251.

VASCONCELLOS, C. A.; PEREIRA, E.; NETTO, D.; SANTOS, F. G. Avaliação do potencial de extração de nutrientes por cultivares de milheto para uso no plantio direto. Embrapa-CNPMS. **Pesquisa em Andamento**, v. 35, 1999.

VENANCIO, L. P.; CUNHA, F. F.; MANTOVANI, E. C.; AMARAL, C. H.; REIS, E. F. Evapotranspiração de cultura: uma abordagem dos principais métodos aplicados às pesquisas científicas e na agricultura. **Irriga**, v. 24, n. 4, p. 719–746, 2019. Disponível em: https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/2888. Acesso em: 21 fev. 2026.

WANG, Y.; LIU, J.; WENNBERG, P. O.; HE, L.; BONAL, D.; KÖHLER, P.; FRANKENBERG, C.; SITCH, S.; FRIEDLINGSTEIN, P. Elucidating climatic drivers of photosynthesis by tropical forests. **Global Change Biology**, v. 29, n. 17, p. 4811–4825, 2023. DOI: 10.1111/gcb.16837.

WANG, Z.; WANG, C. Dynamics of nonstructural carbohydrates during drought and subsequent recovery: A global meta-analysis. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 363, p. 110429, 2025. DOI: 10.1016/j.agrformet.2025.110429.

WILSON, K. B.; HANSON, P. J.; MULHOLLAND, P. J.; BALDOCCHI, D. D.; WULLSCHLEGER, S. D. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 106, n. 2, p. 153–168, 2001.

WINGLER, A.; HENNESSY, D. Limitação da produtividade de pastagens pela baixa temperatura e sazonalidade do crescimento. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 1130, 2016. DOI: 10.3389/fpls.2016.01130.

XU, Y.; KOROMA, A. A.; WEISE, S. E.; FU, X.; SHARKEY, T. D.; SHACHAR-HILL, Y. Daylength variation affects growth, photosynthesis, leaf metabolism, partitioning, and metabolic fluxes. **Plant Physiology**, v. 194, n. 1, p. 475–490, 2024. DOI: 10.1093/plphys/kiad507.

YASIR, T. A. *et al*. Foliar applied calcium chloride alleviated drought stress in pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.) by improving growth and yield contributing traits and antioxidant activity. **PLOS ONE**, v. 19, n. 12, p. e0310207, 2024. DOI: 10.1371/journal.pone.0310207.

ZHAO, T.; WANG, Q. J.; SCHEPEN, A. A. A Bayesian modelling approach to forecasting short-term reference crop evapotranspiration from GCM outputs. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 269–270, p. 88–101, 2019.