

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

AVALIAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO NO ESTADO DO CEARÁ UTILIZANDO MÉTODOS DE THORNTHWAITE E PENMAN-MONTEITH

*Elmo Jorge Rodrigues¹ ; Francisco Leonardo Gomes Morais²; Alan Michell Barros Alexandre³;
José Kerlly Soares de Araújo⁴ & Tatiane Lima Batista⁵*

Abstract: Characterizing hydrological variability is essential for water resources planning and management in semi-arid regions. This study aimed to evaluate the Climatological Water Balance (CWB) in the state of Ceará, Brazil, using historical datasets (1961–2020) from 12 meteorological stations managed by INMET. Potential evapotranspiration (PET) was estimated using both the Thornthwaite and Penman-Monteith methods. The methodology followed the procedures of Thornthwaite and Mather (1955), employing the automated BHídrico GD 4.0 spreadsheet and adopting a fixed available water capacity (AWC) of 100 mm. The results revealed substantial spatial heterogeneity, with prevailing water deficits in inland areas and surplus concentrated in coastal and highland regions. The comparison between methods showed that Penman-Monteith, due to its incorporation of multiple climatic variables, produced higher PET values under certain conditions, notably in Guaramiranga and Tauá. However, the annual patterns across methods were generally consistent, supporting the use of the Thornthwaite method as a practical alternative in data-scarce environments.

Resumo: A caracterização da variabilidade hídrica é essencial para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos em regiões semiáridas. Este estudo teve como objetivo avaliar o Balanço Hídrico Climatológico (BHC) no estado do Ceará a partir de séries históricas (1961–2020) de 12 estações meteorológicas do INMET, aplicando os métodos de Thornthwaite e Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração potencial (ETP). A metodologia adotada baseou-se nos procedimentos de Thornthwaite e Mather (1955), com utilização da planilha automatizada BHídrico GD 4.0, considerando uma capacidade de água disponível (CAD) fixa de 100 mm. Os resultados revelaram significativa heterogeneidade espacial, com predominância de déficit hídrico nas regiões interioranas e excedente nas áreas litorâneas e serranas. A comparação entre os métodos evidenciou que Penman-Monteith apresentou maior sensibilidade às variáveis meteorológicas, resultando em maiores valores de ETP em determinadas condições, especialmente em Guaramiranga e Tauá. Contudo, observou-se coerência nos padrões anuais entre os métodos, validando o uso de Thornthwaite como alternativa em contextos com escassez de dados.

Palavras-Chave – balanço hídrico climatológico; evapotranspiração; Ceará.

1) Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús - Avenida Professora Machadinho Lima, S/N, Príncipe Imperial, Crateús-CE, CEP 63708-825. Fone: +55 (88) 3691-9700 - e-mail: elmojrodrigues@gmail.com

2) Universidade Federal do Ceará – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici – Bloco 713. Cep: 60400-900. Fortaleza – Ceará, Brasil. E-mail: leonardogmorais@alu.ufc.br

3) Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús - Avenida Professora Machadinho Lima, S/N, Príncipe Imperial, Crateús-CE, CEP 63708-825. Fone: +55 (88) 3691-9700 - e-mail: alanmichell@crateus.ufc.br

4) Universidade Federal do Ceará – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici – Bloco 713. Cep: 60400-900. Fortaleza – Ceará, Brasil. E-mail: josekerlly@alu.ufc.br

5) Universidade Federal do Ceará – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici – Bloco 713. Cep: 60400-900. Fortaleza – Ceará, Brasil. E-mail: tatiane@crateus.ufc.br

INTRODUÇÃO

A escassez de água é um dos principais desafios enfrentados pelas regiões semiáridas, especialmente no Nordeste do Brasil (NEB), onde secas sazonais e periódicas comprometem atividades agrícolas, pecuárias e o abastecimento das populações (Sá e Silva, 2010). Esse cenário exige estratégias eficazes de gestão dos recursos hídricos e adaptação às mudanças climáticas, visando garantir a sustentabilidade e a resiliência da região.

O NEB apresenta uma climatologia complexa, com elevada variabilidade interanual e chuvas concentradas em poucos meses do ano. Esse padrão é influenciado por diversos sistemas atmosféricos que condicionam a formação de chuvas (Nobre, 2012). Diante disso, torna-se essencial compreender a dinâmica hídrica regional e utilizar ferramentas que permitam monitorar a disponibilidade de água no solo ao longo do tempo.

O Balanço Hídrico Climatológico (BHC) é uma dessas ferramentas, pois possibilita estimar os fluxos de entrada e saída de água no solo com base em variáveis como precipitação, evapotranspiração, armazenamento, excedente e deficiência hídrica (Matos *et al.*, 2020). A metodologia desenvolvida por Thornthwaite e Mather (1955) permite a aplicação do BHC de forma prática, utilizando parâmetros como precipitação total (P), evapotranspiração de referência (ET_o) e capacidade de água disponível no solo (CAD).

A escolha dos métodos para estimar a evapotranspiração potencial (ETP) é fundamental. O método de Thornthwaite destaca-se pela simplicidade, exigindo apenas temperatura e latitude. Já o método de Penman-Monteith, adotado como padrão pela FAO (Allen *et al.*, 1998), possui base física mais robusta e utiliza múltiplas variáveis meteorológicas, fornecendo estimativas mais precisas (Bezerra *et al.*, 2010).

Este estudo analisa a variabilidade do BHC no estado do Ceará, com base em dados históricos (1961–2020) de 12 estações do INMET. Foram aplicados os métodos de Thornthwaite e Penman-Monteith para estimar a ETP, possibilitando a caracterização do balanço hídrico, com vistas a apoiar o planejamento agrícola e a gestão hídrica regional.

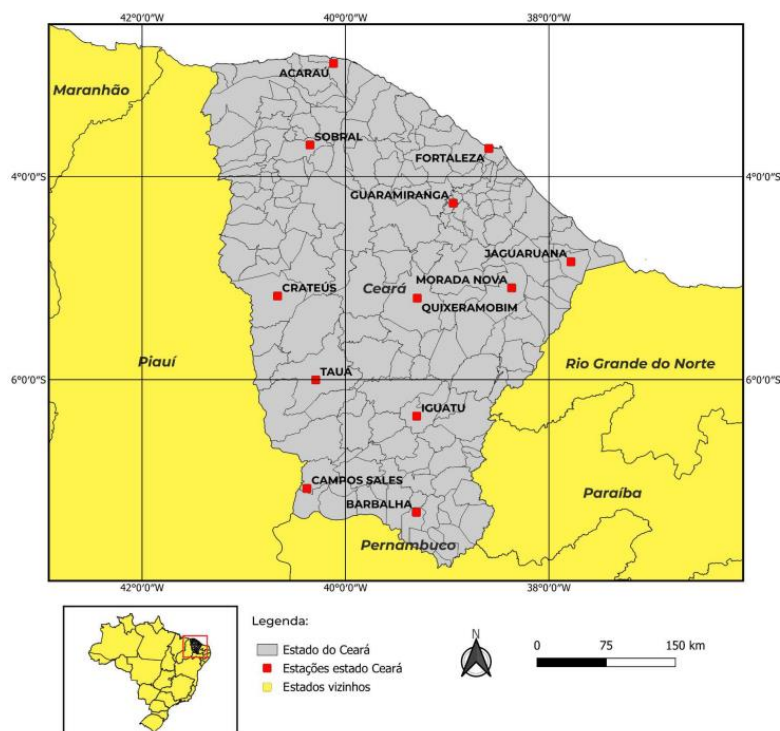
MÉTODO

A pesquisa foi estruturada em três etapas principais: a primeira consistiu na coleta, organização e análise das séries históricas de dados meteorológicos; a segunda envolveu a estimativa da evapotranspiração potencial por dois métodos distintos (Thornthwaite e Penman-Monteith); e, por fim, foram aplicadas as fórmulas do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) e conduzidas análises comparativas e espaciais dos resultados.

Área de estudo

O estudo foi realizado no estado do Ceará, situado na porção norte da região Nordeste do Brasil, delimitado pelas coordenadas 2,5° S e 10° S de latitude e 34° W e 42° W de longitude. Com uma área territorial de 148.826 km², o estado corresponde a 9,58% do território nordestino e 1,75% do território nacional (IPECE, 2022). Foram selecionadas 12 estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), distribuídas em diferentes regiões do estado (Figura 1), representando desde áreas litorâneas e serranas até as regiões do sertão central e do Cariri. Essa diversidade espacial permitiu caracterizar a variabilidade intraestadual do regime hídrico e avaliar a sensibilidade dos métodos de ETP aos diferentes contextos climáticos.

Figura 1 – Mapa de localização das estações.



Estimativa da Evapotranspiração Potencial (ETP)

As variáveis meteorológicas utilizadas incluíram precipitação (mm), temperatura média do ar (°C), umidade relativa (%), velocidade do vento (m/s), radiação solar (MJ/m²), evaporação (mm) e horas de insolação. Os dados foram obtidos da base oficial do INMET.

As séries temporais foram analisadas quanto à consistência e completude. Para tratamento de falhas, adotou-se o método de regressão linear simples com auxílio de estações vizinhas. Foram aceitas apenas correlações com coeficiente de Pearson (*r*) superior a 0,7, garantindo robustez no preenchimento. A estimativa da evapotranspiração potencial foi realizada por dois métodos: Thornthwaite (1948) e Penman-Monteith FAO-56 (Allen *et al.*, 1998).

O método de Thornthwaite, é um método empírico que baseia-se na temperatura média mensal do ar e na latitude do local, conforme a equação 1:

$$ETP = 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot T}{I} \right)^a \quad (1)$$

Em que: *ETP* é a evapotranspiração potencial mensal (mm), *T* é a temperatura média do mês (°C), *I* é o índice de calor anual (soma dos índices mensais), *a* é um expoente calculado em função de *I*. Esse método foi concebido para ser aplicado em regiões áridas e semiáridas (Conceição, 2003).

Já o método de Penman-Monteith FAO-56 é baseado em princípios físicos e recomendado pela FAO como padrão global. Sua formulação é (Equação 2):

$$ETP = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (2)$$

Em que: ETP é a evapotranspiração de referência (mm/dia), R_n é a radiação líquida na superfície do cultivo (MJ/m^2), G é o fluxo de calor no solo (MJ/m^2), T é a temperatura média diária ($^{\circ}\text{C}$), u_2 é a velocidade do vento a 2 m (m/s), $e_s - e_a$ é o déficit de pressão de vapor (kPa), Δ é a inclinação da curva de pressão de vapor ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$), γ é o coeficiente psicrométrico ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$).

As estimativas foram feitas com o auxílio de planilhas eletrônicas em Excel, seguindo os parâmetros e correções sugeridos pela FAO. Para comparar os resultados, foi calculada a variação percentual entre os métodos, utilizando a Equação 3.

$$\text{var (\%)} = \frac{|x_{\text{método1}} - x_{\text{método2}}|}{x_{\text{método2}}} \times 100 \quad (3)$$

Cálculo do Balanço Hídrico Climatológico (BHC)

O BHC foi determinado com base na metodologia de Thornthwaite e Mather (1955), a partir da relação entre precipitação (P) e evapotranspiração potencial (ETP), com uso da planilha automatizada BHídrico GD 4.0 (D'Angiolella e Vasconcellos, 2004).

O modelo simula, mês a mês, os fluxos de entrada (P) e saída de água (ETP), considerando a capacidade de armazenamento no solo. Neste estudo, adotou-se uma CAD fixa de 100 mm para todas as estações, visando uniformizar a análise espacial.

Os principais componentes estimados foram:

- Evapotranspiração Real (ETR),
- Armazenamento Hídrico (ARM),
- Excedente (EXC): volume de água que excede a capacidade de armazenamento e pode gerar escoamento superficial,
- Deficiência (DEF): volume não suprido às necessidades evapotranspirativas das plantas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da aplicação dos métodos de Thornthwaite e Penman-Monteith, foram estimadas as séries climatológicas de evapotranspiração potencial (ETP) mensal e anual para o Estado do Ceará. Esses dados, combinados com os registros de precipitação observada, permitiram calcular o balanço hídrico climatológico para diferentes regiões do estado ao longo do período de análise. Os resultados revelam contrastes marcantes entre as estimativas dos dois métodos, especialmente nas regiões semiáridas, onde a sensibilidade às variáveis meteorológicas é mais acentuada. A seguir, são apresentados os padrões espaciais e temporais do déficit e excedente hídrico, com destaque para as diferenças sazonais e interanuais.

A Tabela 1 apresenta a comparação dos totais anuais de evapotranspiração potencial (ETP) obtidos pelos métodos de Thornthwaite (T) e Penman-Monteith (PM) para nove estações meteorológicas no estado do Ceará. Observa-se que, de forma geral, os valores anuais estimados pelos dois métodos são próximos, com variações que variam de 0,1% (Morada Nova) a 27,4% (Campos Sales). Em estações como Fortaleza e Sobral, localizadas em regiões próximas ao litoral e de baixa altitude, as diferenças foram inferiores a 7%. Por outro lado, Guaramiranga, localizada em região serrana com clima mais ameno, apresentou maior ETP anual estimada por Penman-Monteith, refletindo sensibilidade às variáveis climáticas adicionais consideradas por esse método.

A variação média anual entre os métodos, considerando todas as estações analisadas, foi de 7,3%. Esses resultados indicam que, embora o método de Thornthwaite utilize menos variáveis meteorológicas, suas estimativas anuais são consistentes com aquelas obtidas por Penman-Monteith

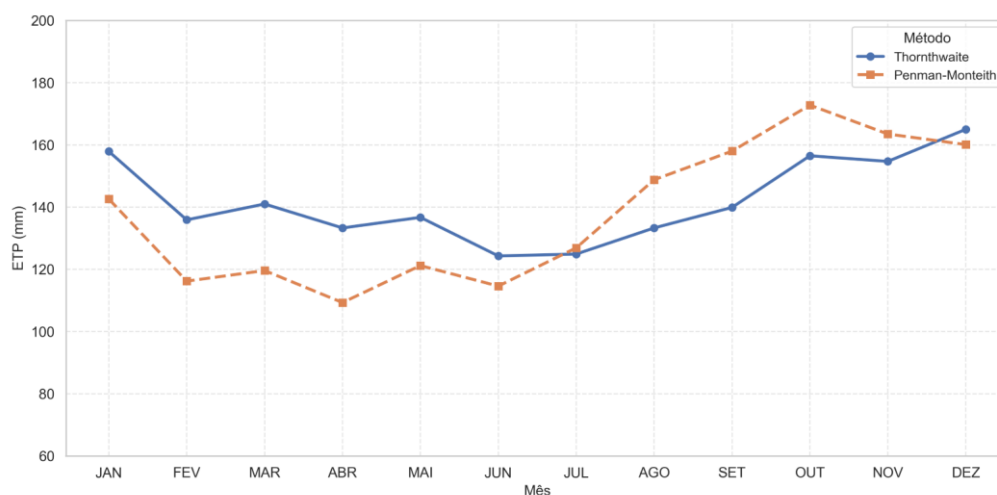
na maioria dos casos. Isso reforça sua aplicabilidade em regiões com escassez de dados climáticos, oferecendo uma alternativa viável e de baixo custo para o cálculo da evapotranspiração potencial em estudos hidrológicos e climáticos.

Tabela 1 – Evapotranspiração potencial método Thornthwaite e Penman-Monteith (mm).

Estação	Total Anual (T)	Total Anual (PM)	Variação (%)
Acaraú	1739.8	1663.5	4.6
Sobral	1749.1	1648.9	6.1
Fortaleza	1703.3	1653.6	3
Guaramiranga	944.3	1103.4	14.4
Jaguaruana	1814.3	1832.1	1
Crateús	1785.8	1869.8	4.5
Quixeramobim	1769.3	1895.4	6.7
Morada Nova	1793	1791.5	0.1
Tauá	1759.6	1832.5	4
Iguatu	1760.6	1893.4	7
Campos Sales	1360.4	1874.8	27.4
Barbalha	1477	1615.8	8.6

Para ilustrar a variação sazonal das estimativas entre os métodos, foram selecionadas três estações representativas do estado do Ceará: Fortaleza – litoral (Figura 2), Guaramiranga - região serrana (Figura 3) e Tauá - semiárido interiorano (Figura 4).

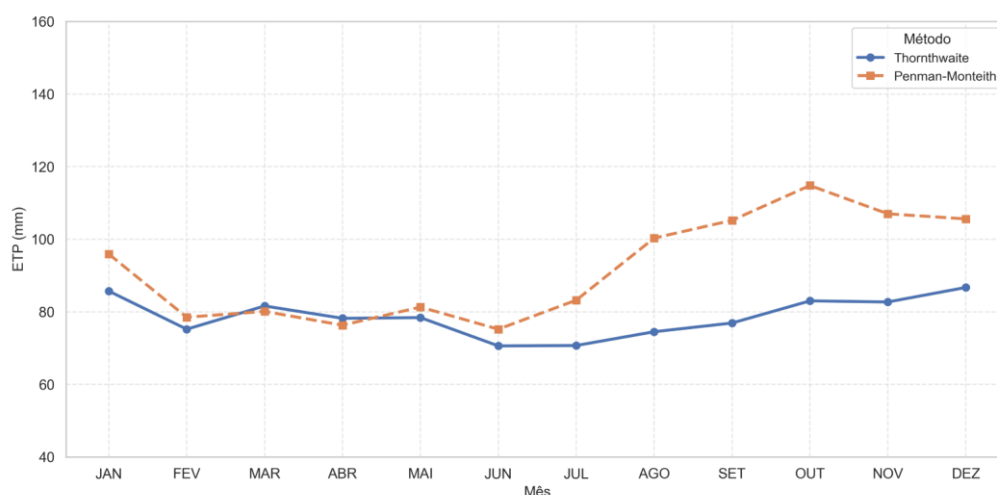
Figura 2 – Evapotranspiração Potencial Mensal – Estação Fortaleza



Em Fortaleza (Figura 2), os valores mensais de ETP estimados pelo método de Thornthwaite foram superiores aos obtidos por Penman-Monteith na maior parte do primeiro semestre, com destaque para os meses de março (diferença de 17,9%) e abril (22,0%). No entanto, essa relação se inverte no segundo semestre, quando Penman-Monteith passa a indicar valores ligeiramente mais elevados, especialmente entre agosto e outubro. O total anual de ETP foi de 1703,3 mm pelo método de Thornthwaite e 1653,6 mm pelo método de Penman-Monteith.

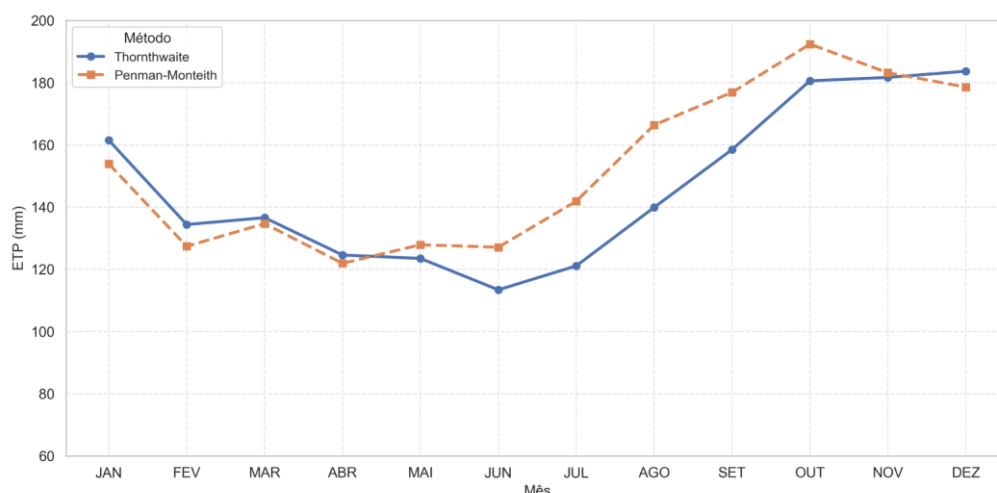
Em Guaramiranga, observou-se o comportamento oposto, ilustrado na Figura 3, o método de Penman-Monteith produziu estimativas mensais consistentemente mais elevadas que Thornthwaite ao longo de todo o ano. Essa diferença foi particularmente acentuada nos meses secos (agosto a outubro), período em que a ETP pelo método PM superou em até 40% os valores obtidos por T. Essa estação, localizada em área de altitude elevada e clima mais ameno, apresentou o menor total anual de ETP estimado por Thornthwaite (944,3 mm), enquanto o método de Penman-Monteith indicou um total de 1103,4 mm — uma diferença de 14,4% ao longo do ano.

Figura 3 – Evapotranspiração Potencial Mensal – Estação Guaramiranga



Já em Tauá (Figura 4), inserida na região semiárida do estado, os dois métodos apresentaram maior divergência durante o período seco (junho a novembro), com Penman-Monteith estimando valores mensais significativamente superiores. As diferenças mais expressivas ocorreram nos meses de julho (+20,8 mm) e agosto (+26,5 mm). Os totais anuais foram de 1785,8 mm para Thornthwaite e 1869,8 mm para Penman-Monteith, com variação de 4,5%.

Figura 4 – Evapotranspiração Potencial Mensal – Estação Tauá

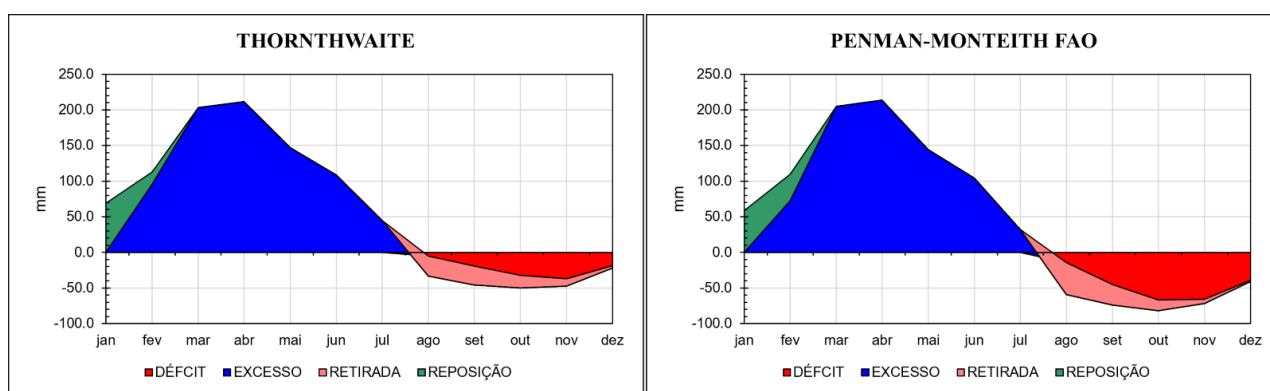


De modo geral, os resultados indicam que o método de Thornthwaite tende a superestimar a ETP nos meses mais quentes e subestimar em regiões de maior altitude ou menor temperatura média. Já o método de Penman-Monteith, por considerar variáveis adicionais como radiação solar, umidade

relativa e velocidade do vento, demonstrou maior sensibilidade às características climáticas locais. Apesar dessas diferenças, os valores anuais entre os métodos são, em muitos casos, próximos, o que reforça a utilidade do método de Thornthwaite como alternativa em regiões com limitada disponibilidade de dados meteorológicos.

A análise do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) permitiu identificar importantes padrões espaciais e sazonais de disponibilidade hídrica no estado do Ceará. Os principais parâmetros avaliados incluíram: precipitação (P), evapotranspiração potencial (ETP), armazenamento de água no solo (ARM), evapotranspiração real (ETR), déficit (DEF), excedente (EXC), alteração no armazenamento (ALT) e o saldo $P - ETP$. As figuras 5, 6 e 7 ilustram os resultados do BHC para estações representativas de diferentes regiões fisiográficas do estado, como mencionado.

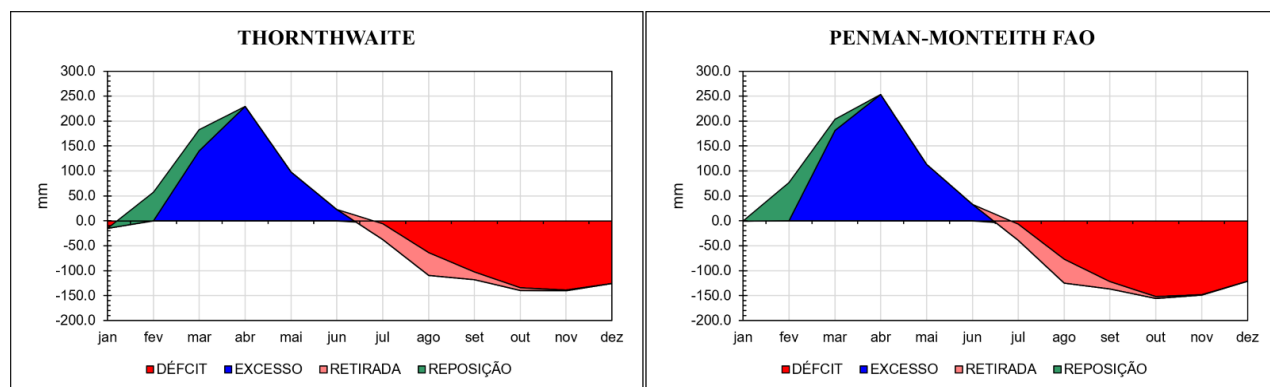
Figura 5 – Evapotranspiração Potencial Mensal – Estação Guaramiranga



Guaramiranga (Figura 5) apresentou os maiores níveis de armazenamento de água no solo ao longo do ano, com destaque para o período de janeiro a agosto, quando os valores de ARM se mantêm próximos da capacidade máxima. Esse comportamento reflete a elevada precipitação da região serrana e menor taxa de ETP, especialmente evidenciado pelo método de Thornthwaite, que subestima valores em áreas de maior altitude. Além disso, Guaramiranga foi a única estação a apresentar excedentes hídricos consecutivos entre fevereiro e julho.

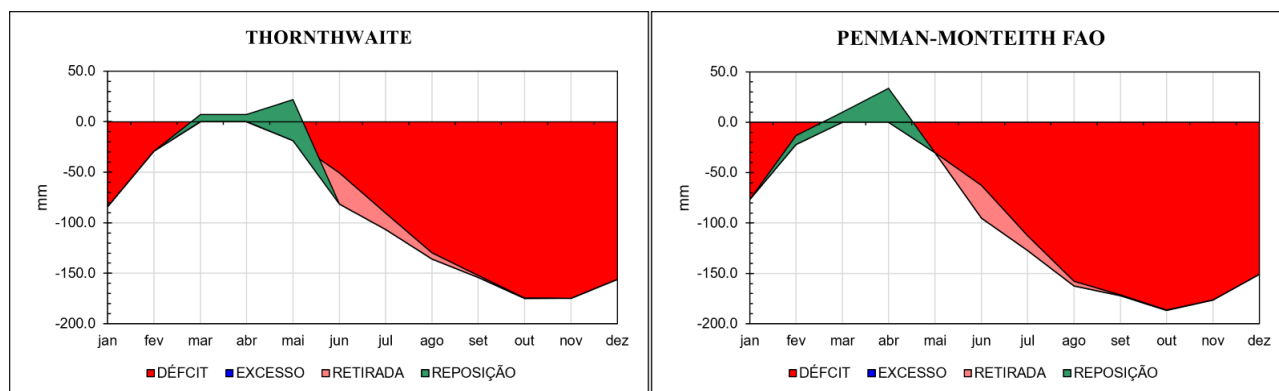
Já Fortaleza (Figura 6) apresenta um padrão intermediário. O armazenamento hídrico se eleva entre março e julho, com um pico em abril, coincidente com o período mais chuvoso do litoral cearense. O excedente hídrico ocorre, majoritariamente, em abril, o que reforça a importância desse mês para o escoamento superficial e recarga de reservatórios na região costeira.

Figura 6 – Evapotranspiração Potencial Mensal – Estação Fortaleza



Por outro lado, Tauá (Figura 7) evidencia o cenário mais crítico de deficiência hídrica. Apesar de registrar algum acúmulo de ARM em maio - mês de máxima pluviosidade – os valores não ultrapassam 55mm, indicando que o solo raramente atinge sua capacidade de armazenamento total. O déficit hídrico anual na estação chega a 1.068,8mm, o maior entre todas as localidades analisadas, seguido por Crateús (1.058,7mm) e Jaguaruana (1.026,4mm). Além disso, Tauá Morada Nova e Quixeramobim não apresentaram excedente hídrico em nenhum mês do ano, segundo o método de Thornthwaite.

Figura 7 – Evapotranspiração Potencial Mensal – Estação Tauá



Os meses de outubro e novembro se destacam como os de maior deficiência hídrica em todas as estações, com valores de ARM próximos de zero e altas taxas de ETP. Esse padrão é coerente com os achados de Barra *et al.* (2002), que identificou novembro como o mês de maior recorrência de seca severa no Ceará, com aproximadamente 60% da área do estado afetada. Além disso, a comparação do BHC nas estações representativas mostra diferenças importantes entre os métodos de Thornthwaite e Penman Monteith. Em Guaramiranga, Penman-Monteith estimou valores de ETP mais altos ao longo do ano, resultando em menor excedente hídrico e maior déficit, especialmente nos meses mais secos.

Em Fortaleza, Thornthwaite superestimou a ETP no primeiro semestre, reduzindo os excedentes no período chuvoso, enquanto Penman-Monteith indicou maior déficit no segundo semestre. Já em Tauá, as diferenças foram mais marcantes durante a estação seca, com Penman-Monteith indicando déficits maiores. Esses resultados evidenciam que a escolha do método de estimativa da ETP impacta diretamente a interpretação da disponibilidade hídrica regional. No entanto, apesar das variações observadas, os padrões gerais do balanço hídrico se mantêm próximos na maioria dos casos.

CONCLUSÕES

A avaliação do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) no estado do Ceará, aplicando os métodos de Thornthwaite e Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração potencial, permitiu caracterizar de forma eficaz os padrões sazonais e espaciais de disponibilidade hídrica em diferentes regiões do estado. Os resultados revelaram significativa variabilidade entre as regiões litorâneas, serranas e do semiárido central, evidenciada pelas diferenças nos valores de armazenamento de água no solo, déficit e excedente hídrico ao longo do ano.

As análises demonstraram que, embora existam divergências entre os métodos de ETP — com Penman-Monteith apresentando maior sensibilidade às variáveis climáticas — os comportamentos anuais gerais do balanço se mostraram, em muitos casos, semelhantes. Essa constatação reforça a

utilidade do método de Thornthwaite como uma alternativa válida e acessível em contextos com escassez de dados meteorológicos mais detalhados.

Além disso, a escolha de estações representativas permitiu destacar as particularidades hidrológicas locais: Guaramiranga, com excedente hídrico mais prolongado e armazenamento elevado; Fortaleza, com padrão intermediário e excedente pontual no período chuvoso; e Tauá, com forte deficiência hídrica ao longo do ano. Tais contrastes reforçam a importância do BHC como ferramenta estratégica para o planejamento agrícola, a gestão dos recursos hídricos e a definição de políticas públicas em regiões semiáridas. Estudos futuros podem ampliar essa abordagem com o uso de séries mais recentes, integração com dados de uso do solo e análise de cenários climáticos prospectivos.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 300 p. (FAO Irrigation and drainage paper, 56), 1998.
- BARRA, Tarcisio da S. et al. Caracterização climatológica da severidade de secas do estado do Ceará-Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 6, p. 266-272, 2002.
- BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; BEZERRA, J. R. C.; BRANDÃO, Z. N. Evapotranspiração real obtida através da relação entre o coeficiente dual de cultura da FAO-56 e o NDVI. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Santa Maria, v.25, n.3, p.404-414, 2010.
- CONCEIÇÃO, M. A. F. Estimativa da evapotranspiração de referência com base na temperatura do ar para as condições do Baixo Rio Grande, SP. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 229-236, 2003.
- D'Angiolella, G.; Vasconcellos, V. L. D. BHídrico GD 4.0-2004: Planilha eletrônica Cálculo do balanço hídrico climatológico. *Bahia Agríc.*, v.6, n.3, nov. 2004.
- IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. Anuário Estatístico do Ceará, 2022. Disponível:
<http://www2.ipece.ce.gov.br/publicacoes/ceara_em_numeros/2022/territorial/index.htm>. Acesso: 02 mar. 2024.
- MATOS, Rigoberto Moreira et al. Balanço hídrico climatológico normal e sequencial para o município de Barbalha-CE. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 3, p. 973-982, 2020.
- NOBRE, Paulo. As origens das águas no Nordeste. A questão da água no Nordeste. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Agência Nacional de Águas. Brasília, DF: CGEE, p. 31-43, 2012.
- SÁ, I. B.; SILVA, P. C. G. Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação. Petrolina: EMBRAPA Semiárido, 2010.

THORNTHWAITE, Charles Warren. An approach toward a rational classification of climate. Geographical review, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. Publications in climatology, VIII (1). 1955.